

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ENERGETICA**

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

**CONVERSIONE DI FONTI FOSSILI E
RINNOVABILI IN PRODOTTI UTILI: MODELLI E
OTTIMIZZAZIONE DI SISTEMI CON ACCUMULO
DI ENERGIA**

Relatore: Prof. Ing. Andrea Lazzaretto

Correlatore: Dott. Ing. Sergio Rech

Laureando: Enrico Miconi

Anno Accademico: 2013-2014

Sommario

I recenti cambiamenti nel panorama energetico mondiale, in relazioni ai problemi di esauribilità delle fonti fossili, e all'utilizzo di risorse, seppur inesauribili, caratterizzate da forte variabilità temporale e bassa densità di potenza (rinnovabili), hanno portato alla ricerca di configurazioni dei sistemi di conversione dell'energia sempre più complesse. Infatti, l'aumento dell'efficienza di questi sistemi è spesso raggiunto grazie a una maggiore integrazione tra i processi che avvengono al loro interno. In quest'ottica è sempre più rilevante la necessità di adottare strumenti che permettano di valutare il comportamento dei sistemi in modo accurato, ma che siano allo stesso modo semplici. Questo lavoro di tesi ha come oggetto proprio i sistemi di conversione di fonti fossili e rinnovabili in prodotti utili. In particolare l'attenzione è posta su come sia possibile definire in modo semplice un modello matematico per la loro rappresentazione, e su come tale modello possa essere utilizzato nella fase di progetto e nella fase di gestione di tali sistemi.

In questa tesi viene presentato ed applicato un approccio generale per la modellazione e l'ottimizzazione dei sistemi di conversione dell'energia che permette di analizzare in modo semplice questi sistemi, anche se molto complessi e/o di grandi dimensioni. Il principale obiettivo è quello di ridurre l'impegno nella fase di creazione dei modelli e lo sforzo computazionale nella loro risoluzione.

Inizialmente l'attenzione è posta sulla modellazione del sistema con l'obiettivo di individuare la "tipologia" e il numero di relazioni matematiche necessarie a descrivere in modo adeguato il comportamento di un qualsiasi sistema di conversione. Per far questo si sono identificate tutte le possibili traiettorie di conversione delle sorgenti energetiche in prodotti utili richiesti dalle utenze. Ogni diversa traiettoria di conversione è caratterizzata da una o più specifiche unità elementari che costituiscono il sistema e dalle interazioni con l'ambiente esterno che queste unità presentano. Per l'individuazione di tutte le possibili traiettorie è stato necessario classificare le diverse forme di energia e materia che possono interagire con i sistemi di conversione. Questa classificazione ha così permesso di individuare tutte le possibili interconnessioni che il sistema può avere con ciò che lo circonda (ambiente esterno) e tutte le possibili unità che lo compongono. Per ogni unità e per ogni interazione sono state identificate ed enumerate le equazioni necessarie a descriverne il comportamento e la configurazione. Questo in definitiva consente di individuare, con esattezza, il numero e la "tipologia" di equazioni necessarie a costruire il modello di un qualsiasi sistema di conversione, una volta nota la traiettoria di conversione che lo rappresenta. Le diverse unità sono state suddivise in categorie in relazione alla loro funzione: unità per la conversione di massa e di energia (unità di trasformazione) e unità per l'immagazzinamento di massa ed energia (unità di accumulo). Ampio spazio viene dato all'analisi dei benefici che le unità di accumulo possono portare nella progettazione e nella gestione di un sistema di conversione.

Successivamente viene trattata la fase di ottimizzazione dei sistemi. Dopo una riassuntiva classificazione ed esamina dei diversi tipi di problemi di ottimizzazione, dei principali algoritmi e delle tecniche per la loro risoluzione viene definito il problema generale di ottimizzazione di un sistema di conversione di energia con lo stesso approccio semplice utilizzato nella modellazione.

Per definire il problema devono essere completate quattro fasi: l'individuazione dei confini del sistema, l'individuazione del criterio per determinare la soluzione ottima (funzione obiettivo), la scelta delle variabili di decisioni e la definizione del modello matematico del sistema. Il tipo di analisi a cui si vuol sottoporre il sistema (sintesi, progetto, funzionamento) condiziona fortemente le scelte che devono essere svolte in queste quattro fasi. Infine l'approccio di modellazione ed ottimizzazione viene applicato a due sistemi di conversione complessi per testarne validità e potenzialità. In particolare si osserva come l'approccio permetta effettivamente di semplificare l'analisi definendo un modello semplice composto da un numero limitato di relazione, ma che permettono comunque una corretta descrizione della composizione e del funzionamento del sistema. Inoltre, negli esempi, si evidenzia l'utilità dei sistemi di accumulo nella fase di gestione e di progettazione di un sistema di conversione. La possibilità di svincolare temporalmente la fase di trasformazione dell'energia dalla fase di cessione all'utenza permette sia di poter gestire il sistema in modo indipendente sia di poter dimensionare il sistema su taglie minori.

Indice

| | |
|---|------------|
| Introduzione | vii |
| 1 Identificazione di tutte le traiettorie di conversione di fonti energetiche in prodotti utili. | 1 |
| 1.1 Introduzione | 1 |
| 1.2 Categorie dei flussi che interagiscono con un sistema di conversione | 2 |
| 1.3 Interazioni dei sistemi di conversione con l'ambiente esterno: Utenze e Sorgenti | 7 |
| 1.3.1 Utenze | 8 |
| 1.3.2 Sorgenti | 11 |
| 1.4 Unità di trasformazione di un sistema di conversione | 13 |
| 1.4.1 Unità di trasformazione con 1 output | 15 |
| 1.4.2 Unità di trasformazione con 2 output | 19 |
| 1.4.3 Unità di trasformazione con 3 output | 20 |
| 1.4.4 Unità di trasformazione con 4 output | 23 |
| 1.5 Superstruttura che include tutte le possibili traiettorie di conversione | 24 |
| 1.6 Conclusioni | 29 |
| 2 Modellazione di Macro-Sistemi | 31 |
| 2.1 Introduzione | 31 |
| 2.2 Il modello di un sistema | 32 |
| 2.2.1 Concetti preliminari e assunzione utilizzate nella fase di modellazione | 34 |
| 2.3 Modellazione delle interazioni tra sistema di conversione e ambiente esterno | 36 |
| 2.4 Modellazione delle unità del sistema di conversione e delle interazioni tra unità | 42 |
| 2.4.1 Collegamenti | 43 |
| 2.4.2 Unità di trasformazione | 44 |
| 2.5 Definizione delle mappe caratteristiche | 49 |
| 2.5.1 Linearizzazione delle mappe caratteristiche | 56 |
| 2.6 Definizione del modello del sistema di conversione | 65 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.6.1 | Esempi di modellazione di sistemi di conversione | 66 |
| 3 | Ottimizzazione della configurazione e del funzionamento di un Macro-Sistema | 73 |
| 3.1 | Introduzione | 73 |
| 3.2 | Problemi di ottimizzazione | 74 |
| 3.2.1 | Classificazione dei problemi di ottimizzazione | 77 |
| 3.2.2 | Ottimizzazione mono e multi-obiettivo | 79 |
| 3.3 | Ottimizzazione nel campo dei Macro-Sistemi | 82 |
| 3.4 | Review sui principali metodi di ottimizzazione | 85 |
| 3.4.1 | Metodi analitici e diretti | 87 |
| 3.4.2 | Programmazione lineare | 90 |
| 3.4.3 | Programmazione intera | 92 |
| 3.4.4 | Programmazione dinamica | 93 |
| 3.5 | Formulazione del problema di ottimizzazione di un sistema di conversione . | 95 |
| 3.6 | Conclusioni | 100 |
| 4 | Sistemi di accumulo: interazioni con il Macro-Sistema e modellazione | 103 |
| 4.1 | Introduzione | 103 |
| 4.2 | I sistemi di accumulo e il loro utilizzo nei sistemi di conversione | 104 |
| 4.3 | Review sui principali sistemi d'accumulo | 107 |
| 4.3.1 | Accumulo di flussi di energia termica e frigorifera Q | 107 |
| 4.3.2 | Accumulo di flussi di energia elettrica E | 113 |
| 4.3.3 | Accumulo di flussi di energia chimica e meccanica F | 120 |
| 4.3.4 | Accumulo di flussi di materie prime M e di prodotti finiti W | 123 |
| 4.4 | Interazioni dei sistemi d'accumulo con il sistema di conversione | 124 |
| 4.5 | Modellazione generale dei sistemi di accumulo | 130 |
| 4.5.1 | Modello della generica unità di accumulo | 132 |
| 4.5.2 | Esempio di modellazione di un sistema di conversione in presenza di unità di accumulo | 138 |
| 4.6 | Conclusioni | 142 |
| 5 | Modellazione ed ottimizzazione dei Macro-Sistemi: Applicazioni | 143 |
| 5.1 | Introduzione | 143 |
| 5.2 | Ottimizzazione del design e del funzionamento di un sistema di conversione per la produzione di energia elettrica e termica | 145 |
| 5.2.1 | Criterio TSO-STO per la semplificazione dell'ottimizzazione dinamica | 154 |
| 5.2.2 | Perdite di energia del sistema d'accumulo | 158 |

| | | |
|-------|---|------------|
| 5.3 | Ottimizzazione completa di un sistema di conversione che soddisfa un'utenza termica | 162 |
| 5.3.1 | Configurazione senza il sistema d'accumulo | 167 |
| 5.3.2 | Configurazione con il sistema d'accumulo | 174 |
| 5.4 | Conclusioni | 179 |
| | Conclusioni | 181 |
| | Bibliografia | 187 |

Introduzione

I sistemi di conversione dell'energia sono dei sistemi che hanno il compito di soddisfare le richieste di determinate forme di energia o di materia sfruttando ciò che l'ambiente mette a disposizione.

In passato, soprattutto in relazione alla grande disponibilità di fonti fossili e alla scarsa preoccupazione verso la salvaguardia ambientale, l'attenzione degli ingegneri nei confronti di questi sistemi era sostanzialmente posta sulla massimizzazione dell'affidabilità e la minimizzazione dei costi. In quest'ottica venivano privilegiati sistemi di grandi dimensioni che nella maggior parte dei casi erano adibiti alla produzione di un solo prodotto (energia elettrica, energia termica, combustibili). Così, ad esempio la richiesta di energia elettrica su grande scala è stata per anni affidata principalmente a impianti "tradizionali" basati sul ciclo Rankine ad acqua (vapore) e sul ciclo Brayton-Joule ad aria (gas) alimentati da combustibili fossili più o meno pregiati e disponibili. Per la progettazione di questi sistemi era fondamentale la profonda conoscenza dei processi termodinamici che avvengono al loro interno e una consolidata esperienza su queste tecnologie tradizionali.

Negli ultimi anni si è potuto osservare un notevole cambiamento nel panorama energetico mondiale. L'aumento della richiesta di energia e di prodotti energetici, la maggior consapevolezza dell'esauribilità delle fonti fossili e le crescenti attenzioni per le tematiche ambientali sono solo alcuni dei principali aspetti che hanno portato ad una sostanziale modifica nel progetto e nella gestione dei sistemi di conversione dell'energia. In questo contesto l'attenzione degli ingegneri, pur senza trascurare le questioni relative ad affidabilità e costo, si è focalizzata anche su altri aspetti. In particolar modo hanno preso piede le tematiche relative alla massimizzazione dell'efficienza energetica, allo sviluppo di tecnologie adibite allo sfruttamento di risorse "pulite" come le fonti rinnovabili, ad un uso più ponderato delle risorse esistenti e alla riduzione delle emissioni di sostanze inquinanti, grazie anche ad una legislazione più restrittiva. In quest'ottica si è assistito ad un graduale passaggio dai grandi sistemi di conversione mono-prodotto efficienti nello sfruttamento di fonti energetiche ad alta densità e disponibilità (combustibili fossili) a sistemi di conversione di dimensioni minori, capaci di sfruttare anche fonti meno concentrate (rinnovabili), e adibiti al soddisfacimento di più utenze. Le dimensioni minori degli impianti hanno quindi portato alla differenziazione dello sfruttamento delle fonti primarie e alla distribuzione nel territorio degli impianti di generazione con un'esplosione del loro numero. L'attenzione si è focalizzata sul rendere tali sistemi il più possibile autonomi (smart grid), minimizzando lo sfruttamento della rete di distribuzione elettrica e preferendo la generazione distribuita (GD). In questo contesto si è potuto notare anche un crescente interesse per l'inclusione di sistemi di accumulo di materia e di energia all'interno del sistema. Questi sistemi permettono di poter svincolare temporalmente sia la generazione di energia dall'utenze, sia le diverse utenze fra loro, nei limiti delle dimensioni e delle caratteristiche dei sistemi di

accumulo stessi. In questo modo il sistema può produrre una certa quantità di energia quando è più conveniente, anche in assenza di una corrispettiva domanda, e non produrre tale energia quando è sconveniente (o impossibile per assenza di risorse), anche in presenza di una domanda corrispondente. Per contro la presenza di sistemi di accumulo all'interno di sistemi energetici apre al progettista nuove soluzioni, rendendo più complessa la corretta progettazione dei sistemi risultanti e la definizione di una loro corretta gestione.

Questi sostanziali cambiamenti hanno però posto nuovi problemi agli ingegneri: le richieste che deve soddisfare un singolo sistema di conversione, a differenza di ciò che accadeva in passato, sono in numero maggiore, hanno una maggior variabilità temporale, possono avere un andamento contrastante tra loro e possono dipendere fortemente da fenomeni aleatori (clima, comportamento delle persone). Anche per ciò che concerne le risorse che il sistema può sfruttare si possono riscontrare problemi analoghi, principalmente legati alla forte aleatorietà della disponibilità delle fonti rinnovabili e dei prezzi di combustibili fossili e non.

Tutti questi aspetti, sempre in accordo con la volontà di progettare sistemi efficienti, hanno fatto sì che gli attuali sistemi di conversione dell'energia presentino configurazioni molto articolate, composte cioè da un gran numero di impianti e caratterizzate da numerose interazioni tra questi e con l'ambiente esterno. Questo aumento di complessità ha influenzato pesantemente le fasi di progettazione e di gestione di tali sistemi, facendo sì che l'esperienza del progettista sulle singole configurazioni non possa essere più ritenuta sufficiente ad ottenere un buon progetto. Pur rimanendo la necessità di una profonda conoscenza della termodinamica e dei singoli processi, diviene necessario sviluppare tecniche che consentano agli ingegneri di semplificare le fasi di progettazioni e di definizione del funzionamento di sistemi molto complessi. Per ottenere i risultati desiderati è fondamentale che tali tecniche permettano uno studio accurato dei sistemi, ma che contestualmente risultino semplici per poter ridurre al minimo gli sforzi che competono a questa fase di studio (una piccola perdita in accuratezza può essere giustificata da una maggiore semplicità).

La via più economica per eseguire questi studi è sicuramente la costruzione di una rappresentazione matematica, detta modello, che permette di valutare il comportamento del sistema e dei suoi componenti. La rappresentazione matematica di un sistema ha la prerogativa di esser facilmente implementabile nei principali programmi di calcolo in quanto il numero di variabili in gioco è notevole, rendendo impensabile la sola risoluzione "manuale" dei modelli.

Oltre a ciò, le numerose scelte che devono essere prese dal progettista comportano la necessità di stabilire quali sia la migliore tra tutte le possibili, in funzione degli obiettivi che esso si pone. Il processo che permette di determinare le scelte migliori è noto come "processo di ottimizzazione" il quale solitamente ricorre all'utilizzo di algoritmi e modelli matematici per la sua risoluzione. Anche la disponibilità di strumenti di calcolo sempre più avanzati e potenti non esclude la necessità di una notevole esperienza, per la necessità di un loro uso intelligente e conveniente. Ciò significa non sopravvalutare il valore di questi strumenti, e non sovra-utilizzarli (non devono essere cioè utilizzati dove non serve). Sistemi complessi possono, infatti, richiedere tempi di modellazione e computazionali molto lunghi, e quindi costi elevati, che a volte non possono essere giustificati dalla migliore accuratezza del risultato ottenuto. È fondamentale quindi definire preliminarmente e con esattezza il problema da analizzare e fare la semplificazione che permettano di ridurre gli sforzi computazionali per l'ottenimento di risultati validi.

L'oggetto di questa tesi sono quindi i sistemi di conversione di energia e materia in prodotti utili energetici e non. Con il termine prodotti utili si intendono sia flussi di energia, quali ad esempio richiesta di energia elettrica e termica, sia flussi di materiali, quali combustibili o prodotti finiti. In particolar modo si focalizzerà l'attenzione sugli aspetti che permettono di stabilire: quali impianti (componenti) debbano essere inclusi o esclusi dalla configurazione del sistema, quali debbano essere le caratteristiche di progetto di questi componenti in condizioni nominali, e come essi debbano funzionare nel periodo di analisi. Viene cioè trattato il problema dell'ottimizzazione del progetto e del funzionamento del sistema di conversione. Per far questo ampio spazio sarà dato alla fase di modellazione del sistema, poiché la costruzione del modello di un sistema è propedeutico alla definizione del problema di ottimizzazione. Il problema della modellazione e dell'ottimizzazione è stato ampiamente trattato in letteratura. Nel campo della modellazione di sistemi un interessante contributo è [1], nel quale vengono trasmesse chiaramente le conoscenze preliminari per lo studio dei sistemi energetici e viene trattato in modo completo il problema della modellazione di progetto di sistemi, fornendo al lettore i principi termodinamici e termoeconomici per l'analisi energetica, exergetica ed economica dei sistemi. In [2], [3] la modellazione di progetto dei sistemi è trattata esaustivamente come prerequisito per la loro ottimizzazione. In particolare in [2] vengono forniti chiari esempi che permettono una comprensione completa del problema.

Per quanto riguarda l'ottimizzazione di sistemi energetici i già citati [2], [3] formulano il problema di ottimizzazione in termini generali e rigorosi, e riportano sintesi chiare dei principali metodi di ottimizzazione. Un ottimo lavoro sui metodi di ottimizzazione necessari alla risoluzione dei principali problemi di ottimizzazione di sistemi ingegneristici è [4] nel quale le procedure matematiche rigorose e i principali svantaggi e punti di forza dei metodi di ottimizzazione e dei modelli di approssimazione delle funzioni vengono espone in modo chiaro. I testi fin qui citate forniscono le basi per affrontare il problema di modellazione e ottimizzazione dei sistemi di conversione dell'energia. Un grande contributo all'analisi della modellazione e dell'ottimizzazione dei sistemi di conversione è stato dato da R. Yokoyama e K. Ito. In [5] viene definito il modello e il problema di ottimizzazione della taglia e del funzionamento di un sistema adibito al soddisfacimento di una richiesta di energia elettrica, energia termica e di raffreddamento. Nel lavoro vengono introdotte delle variabili binarie per considerare l'inclusione o l'esclusione di un componente nella configurazione del sistema. Gli stessi autori in [6] analizzano un problema di ottimizzazione di un sistema di conversione, in cui le variabili binarie vengono utilizzate per determinare l'accensione o lo spegnimento di un componente. In [7] gli autori introducono lo studio di sistemi di conversione dell'energia mediante l'utilizzo di modelli lineari, al fine di ridurre gli sforzi e i tempi computazionali; questa formulazione rientra nell'ambito più ampio dei cosiddetti problemi MILP (Mixed Integer Linear Programming). Problemi simili sono trattati anche in altri articoli presentati sempre dagli stessi autori. Per completezza si citano [8],[9]. Oltre ai già citati Ito e Yokoyama altri autori hanno effettuato studi su questi temi. In [10] viene formulato un problema di ottimizzazione completamente gestito tramite la programmazione lineare mista intera per determinare l'ottima configurazione e funzionamento per i sistemi di generazione distribuita. La modellazione e l'ottimizzazione dei sistemi di conversione in presenza di accumulo è stata introdotta nel già citato [8]. In [11] viene analizzata la convenienza dell'installazione di sistemi di accumulo all'interno di un sistema cogenerativo inserito in un contesto di mercato elettrico libero (prezzo dell'energia elettrica molto variabile). La presenza di sistemi di accumulo rende il problema di modellazione e

ottimizzazione del sistema un problema dinamico, aumentandone la complessità e lo sforzo computazionale richiesto per la sua risoluzione. Può risultare quindi conveniente adottare tecniche di semplificazione del problema, quali la linearizzazione di tutte le equazioni del modello. In questo articolo tutte le equazioni vengono linearizzate applicando la tecnica Glover al fine di poter risolvere il problema in tempi accettabili senza perdere eccessiva accuratezza nei risultati. In [12] viene proposta un'analisi di ottimizzazione multi-obiettivo per sistemi cogenerativi che possono sfruttare componenti di accumulo. I due obiettivi sono la minimizzazione dei costi e la minimizzazione delle emissioni. Nel modello del sistema sono stati introdotti dei vincoli sulle massime variazioni di carico consentite agli impianti, rendendo il problema dinamico. Infine S. Rech in [13] riassume i concetti fondamentali per la modellazione e l'ottimizzazione dei sistemi energetici, in particolare applicati a macrosistemi (insiemi di impianti) di conversione di energia. In [13] viene analizzato nel dettaglio la fase di costruzione del modello di un sistema, soffermandosi in particolar modo sull'individuazione delle relazioni che descrivono il funzionamento dei componenti del sistema (dette mappe caratteristiche). Successivamente sono presi in considerazione il problema di ottimizzazione del progetto e del funzionamento di tale macrosistemi con un approccio MILP.

In questa tesi, a partire dallo studio della letteratura, che ha permesso di acquistare le conoscenze necessarie ad affrontare problematiche di modellazione e di ottimizzazione dei sistemi di conversione, è stato proposto un approccio per la semplificazione dell'analisi di progetto e di funzionamento dei sistemi di conversione. Le semplificazioni introdotte permettono di poter efficacemente analizzare sistemi di conversione, composti da un elevato numero di impianti e/o di grandi dimensioni (come ad esempio intere regioni o nazioni). In particolar l'approccio descritto è utile sia in fase di modellazione e ottimizzazione del sistema, poiché consente di ridurre i tempi per la creazione del modello e per la definizione del problema di ottimizzazione; sia in fase risolutiva, in quanto consente di ridurre sforzi e tempi computazionali.

Nel capitolo 1 verranno individuate tutte le possibili traiettorie di conversione delle risorse energetiche nei prodotti utili richiesti dalle utenze. Per far questo sarà proposta una classificazione arbitraria delle diverse unità che costituiscono un generico sistema di conversione e delle interazioni che queste possono avere con l'ambiente esterno. Si vedrà come tali interazioni potranno essere distinte in relazione a ciò che l'ambiente richiede al sistema e ciò che rende disponibile. L'individuazione della traiettoria che rappresenta il processo di trasformazione permette di definire in modo semplice il numero e il tipo di relazioni matematiche necessarie alla completa descrizione del comportamento del sistema. Come si vedrà le diverse tipologie di relazioni sono in numero contenuto anche per sistemi di grandi dimensioni, e questo permette di affrontare l'analisi con un approccio semplice ed efficace. Nel capitolo 2 verrà analizzata la fase di modellazione di un generico sistema di conversione. Si individuerà ed enumererà le relazioni matematiche necessarie a descrivere una qualsiasi traiettoria di conversione, ed in particolar modo le unità e le interazioni che la caratterizzano. Nel capitolo 3 si analizzerà la fase di ottimizzazione dei sistemi, in particolar modo si descriverà come possa venir definito un generale problema di ottimizzazione applicabile ai sistemi di conversione. Nel capitolo 4 si concentrerà l'attenzione sui sistemi di accumulo. Dopo una breve panoramica sulle tecnologie dei principali sistemi di accumulo, si passerà ad evidenziare come tali componenti possono essere considerati nel modello del sistema. Infine, nell'ultimo capitolo, l'approccio individuato verrà applicato a due sistemi di conversione che sfruttano fonti di diverse energia per il soddisfacimento di diverse ri-

chieste di energia termica e che includono numerose tipologie differenti di componenti. In particolare nel primo esempio si analizzerà un'ottimizzazione del progetto e funzionamento di un sistema composto da un impianto cogenerativo, da una caldaia e da un sistema di accumulo. Verrà determinata l'ottima taglia del sistema di accumulo in funzione della massimizzazione del profitto dell'interno sistema e si osserverà come la presenza del componente di accumulo permetta un gestione separata della fase di trasformazione dell'energia da quella di cessione all'utenza. Inoltre sarà applicata una tecnica innovativa (TSO-STO) studiata da [14] per la semplificazione del problema di ottimizzazione dinamica. Nel secondo esempio è analizzata un'ottimizzazione completa di un sistema per il soddisfacimento di un'utenza termica. In particolare si determinerà quali unità debbano essere incluse nel sistema, le loro caratteristiche e il loro funzionamento. Il tutto sarà applicato a due casi: in presenza e in assenza di un sistema di accumulo. Si potrà osservare come la presenza del componente di accumulo permetta dimensionare i vari componenti del sistema su potenze minori. L'obiettivo di entrambe queste applicazioni è di mostrare la validità e gli eventuali punti critici dell'approccio.

Legenda

Simboli letterali

| | |
|-----------------|---|
| a_{P_i} | costo di ammortamento annuo specifico [€/W anno] |
| A | generico flusso di energia lato sorgenti, categoria generica A [W] |
| Acc_A | unità di accumulo di flussi A |
| B | generico flusso di energia lato utenze, categoria generica B [W] |
| C_{P_i} | costo di capitale per l'acquisto di P_i [€] |
| c_A | costo unitario del generico flusso A [€/Wh] |
| c_{s,P_i} | costo specifico di acquisto di P_i [€/W] |
| cm_{P_i} | costo concentrato di manutenzione del componente P_i [€/W anno] |
| c_p | calore specifico [$\frac{kJ}{kg \cdot K}$] |
| d_{P_i} | parametro della mappa caratteristica |
| E | flusso di energia elettrica [W] |
| f | funzione generica |
| F | flusso di energia chimica e meccanica accumulabile [W] |
| h | entalpia specifica [$\frac{kJ}{kg}$] |
| $[H]$ | matrice Hessiana |
| H_{P_i} | costo di ammortamento annuo dell'unità P_i [€/anno] |
| I | tasso periodico di interesse |
| K | coefficiente globale di scambio termico [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$] |
| l_e | numero dei flussi di energia scambiati tra sistema e ambiente |
| l_m | numero dei flussi di massa scambiati tra sistema e ambiente |
| $L(x, \lambda)$ | funzione Lagrangiana |
| M | flusso di materie prime [$\frac{kg}{s}$] |
| Ma | Massa [g] |
| \dot{m} | generico flusso di massa [$\frac{kg}{s}$] |
| m_{P_i} | coefficiente angolare della mappa caratteristica linearizzata |
| p | pressione [MPa] |
| p_A | prezzo unitario del generico flusso A [€/Wh] |
| P_i | generica unità di trasformazione |
| q_{P_i} | quota della mappa caratteristica linearizzata |
| Q_t | flusso di energia termica [W] |
| Q_c | flusso di energia di raffreddamento [W] |
| r | calore latente [J/kg] |
| R | flusso di energia chimica e meccanica non accumulabile [W] |
| t | istante temporale [h] |
| T | temperatura [K] |
| U | energia interna [Wh] |
| v | velocità [$\frac{m}{s}$] |
| W | flusso di materia di prodotti finiti [$\frac{kg}{s}$] |
| x | variabile indipendente (di decisione) |
| z | valore della funzione obiettivo |

Simboli Greci

| | |
|-------------|---|
| α | rapporto tra il minimo valore di un flusso e il massimo |
| δ | variabile binaria |
| Δ | generica differenza |
| η_{el} | rendimento elettrico |
| η_I | rendimento di primo principio |
| η_{el} | rendimento termico |
| ϕ | generica caratteristica di un flusso |
| λ | moltiplicatore di Lagrange |
| Ω | generica proprietà |
| ρ | densità [$\frac{kg}{m^3}$] |
| π_p | flusso di perdita di energia [W] |
| π_m | flusso di perdita massa [$\frac{kg}{s}$] |

Pedici

| | |
|-------------|--|
| * | ottimo (valore, soluzione) |
| <i>Acc</i> | unità di accumulo |
| <i>amb</i> | condizioni ambientali |
| <i>car</i> | fase di carica |
| <i>DP</i> | condizioni di progetto (design point) |
| <i>e</i> | flusso di energia elettrica |
| <i>f</i> | flusso di energia chimica e meccanica accumulabile |
| <i>in</i> | in ingresso |
| <i>l</i> | perdita |
| <i>m</i> | flusso di materie prime |
| <i>max</i> | massimo |
| <i>min</i> | minimo |
| <i>out</i> | in uscita |
| <i>P</i> | unità di trasformazione |
| <i>qt</i> | flusso di energia termica |
| <i>qc</i> | flusso di energia di raffreddamento |
| <i>r</i> | flusso di energia chimica e meccanica non accumulabile |
| <i>s</i> | sorgente |
| <i>scar</i> | fase di scarica |
| <i>stoc</i> | fase di stoccaggio |
| <i>u</i> | utenze |
| <i>w</i> | flusso di materia di prodotti finiti |

Acronimi

| | |
|------------------|--|
| <i>ATES</i> | Aquifer Thermal Energy Storage |
| <i>c.c</i> | condizioni al contorno |
| <i>CAES</i> | Compressed Air Energy Storage |
| <i>CHP</i> | Combined heat and power |
| <i>EES</i> | Electrical Energy Storage |
| <i>HTTES</i> | High Temperature Thermal Energy Storage |
| <i>LP</i> | programmazione lineare (<i>Linear Programming</i>) |
| <i>LHV</i> | lower heating value |
| <i>LTTES</i> | Lower Temperature Thermal Energy Storage |
| <i>MILP</i> | programmazione lineare mista intera (<i>Mixed-Integer Linear Programming</i>) |
| <i>MINLP</i> | programmazione non lineare mista intera (<i>Mixed-Integer Non-Linear Programming</i>) |
| <i>MT</i> | media tensione |
| <i>ORC</i> | Organic Rankine Cycle |
| <i>PCM</i> | Phase Change Material |
| <i>PHEs</i> | Pumped Hydro Energy Storage |
| <i>SPQ</i> | Sequential Quadratic Programming |
| <i>TsO – sTO</i> | Two-Step Optimization of Storage |
| <i>TES</i> | Thermal Energy Storage |

Capitolo 1

Identificazione di tutte le traiettorie di conversione di fonti energetiche in prodotti utili.

I sistemi di conversione consentono la trasformazione di energia e materia in prodotti utili. Lo studio di tali sistemi viene generalmente eseguito con l'aiuto di una rappresentazione matematica semplificata del sistema reale, chiamata modello del sistema. In questo capitolo verrà presentata una schematizzazione, originale e soggettiva, atta a classificare i diversi sistemi in relazione alle caratteristiche comuni ai fine del processo di modellazione. Queste caratteristiche sono rappresentate dalla tipologia d'interazioni tra l'ambiente e il sistema, e dalla tipologia di componenti che costituiscono il sistema. Nella schematizzazione, che sarà definita superstruttura, saranno dunque presenti tutte le possibili traiettorie di conversione di fonti energetiche in prodotti utili.

1.1 Introduzione

Un sistema di conversione è una specifica regione dello spazio atta alla conversione di una determinata quantità di energia o di materia in energia o materia di un'altra forma. Tale regione può essere separata da tutto il resto (ambiente esterno) mediante una ben definito volume, che solitamente è detto *volume di controllo* [15].

La scelta dei confini del sistema dipende dall'analisi che si vuole svolgere. Per evitare che lo studio assuma una complessità eccessiva occorre che questi siano i più stretti possibili, in modo da includere solamente ciò che è indispensabile per caratterizzare il comportamento del sistema. La scelta dei confini del sistema non deve essere, tuttavia, troppo restrittiva. Per analizzare interamente un sistema ingegneristico, può essere necessario espandere i suoi confini per includere altri sottosistemi che influenzano fortemente il funzionamento di quello in analisi.

Il sistema di conversione e l'ambiente esterno non sono due entità indipendenti, hanno, infatti, la possibilità di interagire tra loro. Le interazioni sono rappresentate dalle quantità di energia o materia che vengono scambiate reciprocamente. Dette quantità nel seguito saranno espresse in termini di flussi di massa o di energia, ovvero come le quantità di materia o di energia scambiate nell'unità di tempo.

Nel paragrafo 1.2 si andranno a classificare le possibili tipologie di flussi di energia (potenze) in relazione alle caratteristiche comuni che contraddistinguono le diverse forme di energia. In molti casi i flussi di energia possono essere associati ai flussi di massa che "trasportano" tale energia. Ragionando a livello di Macro-Sistemi, e quindi con un grado di dettaglio basso, in molti casi può risultare conveniente considerare esclusivamente i flussi di energia e non i relativi flussi di massa associati. Si prenderanno quindi in considerazione i flussi di massa solo quando lo specifico caso lo richieda. Per questo motivo non si è ritenuto opportuno presentare una classificazione anche per detti flussi.

Un sistema di conversione ha lo scopo di soddisfare la richiesta di determinati flussi di energia o di materia; per poter adempiere a questo compito può sfruttare la sorgente dei differenti flussi presenti nell'ambiente esterno.

Gli scambi tra ambiente e sistema possono essere quindi distinti in due "lati":

- Lato *sorgenti*: considera i flussi che l'ambiente rende disponibile al sistema, e che quindi sono un input per quest'ultimo.
- Lato *utenze*: considera i flussi che vengono richiesti al sistema, e che quindi rappresentano l'output del sistema.

Nel paragrafo 1.3 si analizzeranno in modo specifico le utenze e le sorgenti, osservando in particolare quali tipologie di flussi possano essere associate all'una o all'altra.

Per realizzare il suo scopo il sistema deve compiere una conversione: i flussi prelevati dall'ambiente lato sorgenti devono essere trasformati nei flussi richiesti dall'utenze. Questo avviene poiché i flussi richiesti dell'utenza raramente corrispondono a quelli che si trovano disponibili nell'ambiente.

In quest'ottica l'obiettivo di questo capitolo è di individuare tutte le possibili traiettorie di conversione dei flussi prelevati dalle sorgenti nei flussi richiesti dalle utenze. Per svolgere tale processo di conversione il sistema si serve di una o più unità che nell'analisi verranno definiti *unità di trasformazione*.

Nel paragrafo 1.4 si analizzeranno le differenti unità di trasformazione, distinte in relazione al numero di flussi in uscita e alla categoria di appartenenza, e le loro interazioni con l'ambiente. Si potrà osservare come, in definitiva, un'unità di trasformazione che presenta in ingresso tutte le diverse tipologie di flussi nel lato sorgenti ed in uscita tutti i possibili flussi per il lato utenza, possa rappresentare efficacemente tutti i fattibili processi di trasformazione e tutte le possibili interazioni tra ambiente e sistema. Tale unità, definita unità base, potrà essere quindi utilizzata per descrivere il comportamento di un qualsiasi sistema.

Nel paragrafo 1.5 verranno riassunti tutti i risultati e le classificazioni presentate nei paragrafi precedenti utilizzando uno schema grafico che sarà chiamato superstruttura. Tale superstruttura avrà la caratteristica di mostrare tutte le possibili traiettorie di conversione dei flussi prelevati dalle sorgenti, convertiti nelle unità di trasformazione, e ceduti alle utenze.

1.2 Categorie dei flussi di massa ed energia che interagiscono con un sistema di conversione

In questo paragrafo si analizzeranno le possibili connessioni che si possono avere sia tra il sistema e l'ambiente sia tra le diverse unità all'interno dello stesso sistema. Si ha una

connessione tra due unità del sistema o tra un componente del sistema e l'ambiente esterno quando è possibile identificare una interazione tra due. Tale interazione solitamente rappresenta lo scambio di determinate quantità di energia o di materia. In questa analisi le interazioni saranno espresse in termini di flusso (di materia e di energia), e cioè le quantità di energia e/o di materia che viene scambiata tra due componenti nell'unità di tempo. In particolare si avranno:

- Flussi di massa [kg/s]: rappresentano a tutti gli effetti delle portate di materia fisica. Sono da considerarsi flussi di massa, ad esempio, la portata di combustibile fossile in alimento ad una centrale termoelettrica, ma anche la portata d'acqua che fa funzionare una turbina idraulica, e ancora la portata d'acqua o di olio diatermico che trasporta il calore in una rete di teleriscaldamento.
- Flussi di energia [W]: rappresentano le potenze che il sistema scambia con l'ambiente e/o che sono presenti all'interno del sistema. Queste possono essere, ad esempio, la potenza elettrica prodotta da un motore a combustione interna e immessa in rete, oppure la potenza associata a una particolare portata di combustibile in relazione al suo potere calorifico.

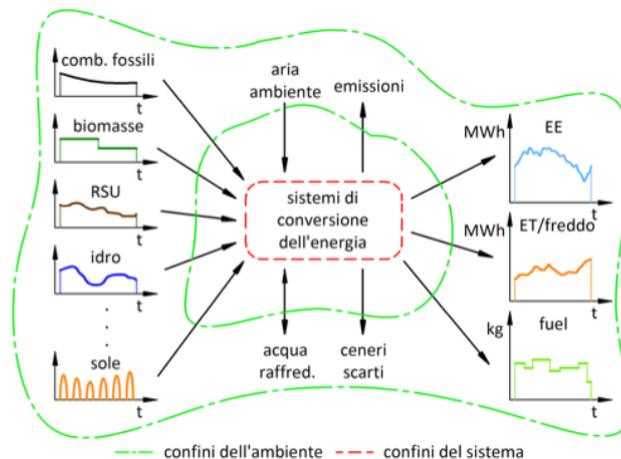


Figura 1.1: Schema generale delle ipotetiche interazioni con l'ambiente

La figura 1.1 mostra un generico sistema energetico racchiuso all'interno di definiti confini ove sono evidenziate alcune possibili interazioni che il sistema ha con l'ambiente esterno. Sia i flussi di massa sia i flussi di energia possono essere costanti o variabili nel tempo. Per dare un carattere generale e omnicomprensivo si considereranno i flussi come funzione del tempo.

Il trasporto di energia, e quindi il flusso di energia, spesso può essere associato ad un trasporto di massa (flusso di massa). Esemplicando, si consideri una tubazione che porta gas naturale e che alimenta un gruppo turbogas. Tale tubazione sarà caratterizzata da una certa portata di gas. Il gas, a sua volta, sarà contraddistinto da un definito potere calorifico (energia specifica). Il flusso di massa sarà quindi identificato dalla portata espressa in kg/s o in m^3/s , mentre il flusso di energia sarà calcolato come prodotto della suddetta portata per il potere calorifico.

4 Identificazione di tutte le traiettorie di conversione di fonti energetiche in prodotti utili.

In termici termodinamici la relazione matematica che lega il flusso di energia al relativo flusso di massa a cui è associato è rappresentato da:

$$\text{Flusso di energia [W]} = \text{Flusso di massa [g/s]} \cdot \text{Energia specifica [J/g]} \quad (1.1)$$

Nell'analisi dei Macro-Sistemi molto spesso si fa l'assunzione di trascurare i flussi di massa associati ai flussi di energia, e si ipotizza che i relativi bilanci di massa siano direttamente verificati dai bilanci di energia. Ciò permette di considerare nello studio esclusivamente i flussi di energia, e quindi di ridurre il numero di relazioni necessarie a descrivere il comportamento del sistema e di conseguenza ridurre la complessità dell'analisi. Questa assunzione è sempre valida e corretta quando la 1.1 esprime una corrispondenza biunivoca tra il flusso di massa e il flusso di energia, poichè, una volta noto il valore del flusso di energia, è sempre possibile ricavare il valore del flusso di massa associato. Qual'ora ciò non fosse vero quest'assunzione rappresenta una semplificazione, poichè il flusso di massa non è determinabile conoscendo il valore del flusso di energia.

Questa semplificazione può portare ad errori in fase di analisi poichè può non consentire di descrivere correttamente il funzionamento di un sistema. Deve essere quindi posta attenzione ai casi in cui sia possibili o meno associare i flussi di massa ai relativi flussi di energia. Nel seguito dell'analisi comunque, i flussi di massa associabili ai flussi di energia saranno quasi sempre trascurati, in quanto il grado di dettaglio, e gli ampi intervalli temporali assunti nelle diverse analisi permettono di considerare le eventuali approssimazione introdotte da tale procedura trascurabili. Tuttavia i flussi di massa verranno considerati qualora l'associazione ai flussi di energia non sia fattibile. Chiarendo con un esempio, nell'industria di processo (in cui sono prodotti materiali non energetici) risulta difficile, e non conveniente, collegare ad un flusso di massa la rispettiva energia. Si pensi ad un'azienda che produce prodotti in legno (tavoli, sedie, ecc); l'analisi sarà svolta sulle quantità di prodotto finito da ottenere, non su il potere calorifico di quest'ultimi.

Nel seguito i flussi che possono interagire con un sistema energetico sono divisi in CATEGORIE. Si sono distinte 4 CATEGORIE relative ai flussi di energia, una CATEGORIA per i flussi di perdita e due CATEGORIE per flussi di massa (per poter caratterizzare l'industria di processo). In questa ripartizione si è cercato di raggruppare tutti i flussi che presentano caratteristiche simili ai fini del processo di modellazione.

CATEGORIE DI FLUSSI

- **E – Flussi di energia elettrica [W]:** sono associati al moto degli elettroni all'interno di un conduttore elettrico. In pratica rappresentano le potenze elettriche che un componente del sistema può scambiare con un altro, o con l'ambiente esterno. Questi flussi possono venir calcolati come media della potenza istantanea sul periodo. Assumendo che la potenza abbia caratteristica periodica, ipotesi valida nei casi in questione.

$$E(t) = V(t) \cdot I(t) \cdot \cos(\varphi) \quad (1.2)$$

[17] In cui $V(t)$ rappresenta la tensione, $I(t)$ l'intensità di corrente e $\cos(\varphi(t))$ il coseno dell'angolo compreso tra il vettore della tensione e il vettore della corrente,

- **F – Flussi di energia (chimica, potenziale, cinetica) accumulabile[W]:** uno specifico flusso di energia chimica o meccanica appartiene a questa categoria se e

solo se presenta la possibilità di essere accumulato. Quindi se l'energia associata a tale flusso non deve essere obbligatoriamente sfruttata nel momento in cui tale flusso è disponibile, ma può essere stoccata e utilizzata negli momenti opportuni. In questa analisi si farà spesso riferimento all'energia chimica associata ad una portata di combustibile, ma le considerazioni fatte potranno essere facilmente estese anche ad altre forme di energia, come ad esempio l'energia potenziale associata ad una portata d'acqua posta ad una certa altezza, ad una portata d'aria in pressione, o ad altri casi che presentano le stesse caratteristiche. Il calcolo di tale flusso di energia, considerando nella maggior parte dei casi sistemi con deflusso, può essere ricavato dalla 1.1, in particolar modo per i flussi appartenenti a questa categorie che saranno considerati in questa trattazione si ha:

Flusso di energia chimica associato ad un combustibile rinnovabile e non:

$$F(t) = m_f(t) \cdot LHV(t) \quad (1.3)$$

In cui $m_f(t)$ identifica la portata di combustibile e $LHV(t)$ rappresenta il potere calorifico [MJ/kg].

Flusso di energia potenziale associata ad una portata d'acqua :

$$F(t) = m_{H_2O}(t) \cdot g \cdot \Delta H(t) \quad (1.4)$$

Dove $m_{H_2O}(t)$ rappresenta la portata d'acqua, g la costante di gravitazione universale e delta $H(t) = h_1(t) - h_0(t)$ il salto disponibile.

- **R – Flussi di energia (chimica, potenziale, cinetica) non accumulabile [W]:** uno specifico flusso di energia chimica o meccanica appartiene a questa categoria se e solo se NON presenta la possibilità di essere accumulato. La grande differenza rispetto alla categoria F sta nella necessità di sfruttare i flussi R nel momento in cui essi sono effettivamente disponibili, al fine di non perdere l'energia ad essi associata. Si pensi, ad esempio, ad una corrente ventosa e all'energia in essa contenuta in un istante δt . Se in tale intervallo di tempo l'energia non viene sfruttata, ad esempio convertendola in energia elettrica per mezzo di una turbina eolica, essa è definitivamente persa. I flussi compresi nella categoria R presentano la caratteristica, quindi, di non poter essere accumulati come tali. Ad esempio ragionando ancora sul caso precedente, l'energia posseduta da una corrente ventosa non potrà essere accumulata, a meno di non trasformarla in un'energia di altra forma, come elettrica, termica, chimica, ecc. Un discorso analogo può essere fatto, per citare altri esempio, per la radiazione solare o per gli impianti che sfruttano l'acqua fluente. Per il calcolo di tale flusso si potranno fare delle considerazioni analoghe al caso precedente e quindi utilizzare la 1.1. I casi che verranno incontrati in questa analisi sono:

Flusso di energia meccanica associato una corrente ventosa:

$$R(t) = 0.5 \cdot \rho \cdot A(t) \cdot v^3(t), \quad (1.5)$$

dove $v(t)$ è la velocità della corrente ventosa [m/s], ρ è la densità del fluido [kg/m^3] e A è l'area interessata. Nel caso di radiazione solare $R(t) = I(t) \cdot A$, dove I è la radiazione solare [W/m^2].

- **Q – Fussi di energia termica e frigorifera [W]:** identificano gli scambi di calore che possono verificarsi tra i componenti del sistema o tra il sistema e l'ambiente.

6 Identificazione di tutte le traiettorie di conversione di fonti energetiche in prodotti utili.

Fisicamente questi scambi possono avvenire o mediante un circuito chiuso in cui un fluido assorbe calore da un unità (incrementando il suo contenuto entalpico) e lo cede ad un'altra (diminuendo la sua entalpia) o mediante il fenomeno dell'irraggiamento (essendo meno frequente sarà però tralasciato). In questa analisi il processo fisico (circuito chiuso) è rappresentato da un flusso Q che collega i due unità. 1.2. Il flusso

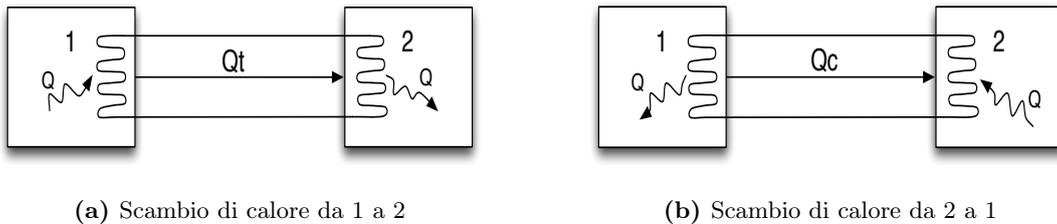


Figura 1.2: Scambi di flussi Q tra l'unità 1 e l'unità 2

può essere calcolato mediante la 1.1 in particolare:

$$Q(t) = m(t) \cdot \Delta h(t) \quad (1.6)$$

In cui $m(t)$ rappresenta la portata di fluido [g/s] mentre $\Delta h(t) = h_1(t) - h_2(t)$ è la variazione dell'entalpia specifica (energia specifica) nei due rami del circuito chiuso (si trascurano le perdite nelle tubazioni di collegamento). In questa analisi saranno distinti due diversi flussi Q :

- Q_t flusso di energia termica, in riferimento alla figura 1.2a un flusso Q_t identifica un passaggio di calore dal unità 1 al unità 2, $\Delta h(t) > 0$
 - Q_c flusso di energia frigorifera, in riferimento alla 1.2b un flusso Q_c identifica un passaggio di calore dal unità 2 al unità 1, $\Delta h(t) < 0$
- **M – Flussi di massa associati a materie prime [kg/s]:** sono portate di massa identificative di materia non utile ai fini energetici ma utili all'industria di processo. In questa categoria s'inseriscono i materiali (materie prime) che devono subire un processo o una lavorazione per venir trasformati in un materiale differente. A titolo d'esempio e riprendendo il caso visto in precedenza, il legno utile alla produzione di sedie o di tavoli può essere inserito all'interno di questa categoria. Svolgere il calcolo del flusso per questa categoria non è semplice vista la molteplicità dei materiali presenti al suo interno, per cui verrà specificato il valore di volta in volta in relazione ai casi in esame.
 - **W – Flussi di massa associati a prodotti finiti non energetici [kg/s]:** sono portate di massa del tutto analoghe alle precedenti ma riferite all'output. In questo caso ci riferisce a prodotti non energetici che hanno subito una lavorazione o un processo. Considerando sempre l'esempio dell'azienda produttrice di tavoli, la portata di legno è un flusso M mentre i tavoli finiti sono flussi W .
 - π_p e π_m – **Flussi di energia e di massa associati alle perdite [W] , [kg/s]:** i flussi di perdita rappresentano la quantità di energia (pedice p) e di massa (pedice m) che non può essere sfruttata all'interno del sistema. Questi flussi sono inevitabili a causa delle irreversibilità dei processi di trasformazione. Sono flussi che connettono

il componente del sistema, in cui è presente il fenomeno di perdita, direttamente all'ambiente. In questa categoria, ad esempio, sono considerati i fumi all'uscita di una caldaia, i quali sono direttamente collegati al processo di combustione.

CARATTERISTICHE DEI FLUSSI

Come facilmente si evince dalla classificazione, le diverse tipologie di flussi rappresentano delle categorie molto ampie. All'interno di ciascuna categoria possono essere individuati delle caratteristiche che distinguono i diversi flussi presenti. Queste caratteristiche identificano le specifiche aggiuntive che sono necessarie a distinguere i flussi presenti nella stessa categoria. Risulta complicato evidenziare tutte le possibili caratteristiche proprie di ciascuna categoria, poiché esse sono molteplici, e possono identificare svariate specifiche. Nella tabella 1.1 si sono quindi riassunte le principali caratteristiche per ciascuna categoria.

Tabella 1.1: Caratteristiche principali che distinguono flussi appartenenti alla stessa categoria

| CATEGORIA | PRINCIPALI CARATTERISTICHE |
|-----------|--|
| E | Livello di tensione V , Tipologia della tensione (CC, CA, rampa, onda quadra, sinusoidale), Frequenza (se alternata), Sfasamento tra tensione e corrente ϕ |
| F | Stato di aggregazione della materia (liquido, solido, gassoso), Composizione Chimica, Poter Calorifico, Densità, Punto di infiammabilità, Emissioni di CO_2 per kg |
| Q | Stato di aggregazione della materia (liquido, solido, gassoso), Livello di temperatura T , Titolo x , Calore c_p specifico, Calore Latente r |
| R | Stato di aggregazione della materia (liquido, solido, gassoso), Pressione, Temperatura, Quota Geodetica, Entalpia |
| M | Stato di aggregazione della materia (liquido, solido, gassoso), Dimensioni, Peso, Forma, Densità |
| W | Stato di aggregazione della materia (liquido, solido, gassoso), Dimensioni, Peso, Forma, Densità |

Come si può vedere dalla tabella molto spesso le diverse caratteristiche sono associabili alle caratteristiche che possiede la portata di massa a cui è associabile il trasporto di energia. La gran parte delle caratteristiche che saranno assunte in questo lavoro di tesi prendono in considerazione lo stato di aggregazione della materia e le sue proprietà intensive (pressione, temperatura, entalpia).

1.3 Interazioni dei sistemi di conversione con l'ambiente esterno: Utenze e Sorgenti

Un sistema di conversione è un sistema aperto [15], esso quindi può prevedere lo scambio di portata e di potenza sia in ingresso che in uscita. Questi scambi possono avvenire esclusivamente con ciò che è all'esterno dei confini del sistema, cioè l'ambiente esterno. Nel

paragrafo 1.2 si è visto come questi scambi, indicati con il nome di interazioni, siano descritti in termini di flussi di massa e di energia.

Dire che il sistema e l'ambiente scambiano un flusso di energia o che il sistema preleva o cede un flusso di energia equivale a dire che il sistema scambia, preleva, cede potenza dal/all'ambiente; per i flussi di massa si può fare lo stesso discorso in termini di portata.

Ovviamente un flusso di massa o di energia rappresenta un ingresso per il sistema se il sistema lo preleva dall'ambiente, mentre un flusso di massa o di energia rappresenta un'uscita per il sistema se il sistema lo cede all'ambiente. Il prelievo dall'ambiente è legato a ciò che l'ambiente mette a disposizione, la fase di cessione è invece legata allo scopo per cui un sistema è stato progettato. L'obiettivo di un sistema di conversione è quello di soddisfare la richiesta di determinati flussi di massa e di energia che presentino specifiche caratteristiche. Queste richieste vengono effettuate da un qualcosa che è esterno al sistema e che quindi si può considerare facente parte dell'ambiente.

Le interazioni tra ambiente e sistema possono quindi essere distinte in due sezioni. Da una parte si ha la sezione in cui l'ambiente mette a disposizione determinati flussi, i quali, una volta prelevati, rappresentano gli input del sistema. Dall'altra si ha la sezione in cui l'ambiente richiede determinati flussi, i quali devono essere prodotti dal sistema e ceduti all'ambiente, e rappresentano quindi gli output del sistema. Questi due sezioni prendono rispettivamente il nome di Sorgenti e Utenza. In pratica l'ambiente può essere considerato a tutti gli effetti come un serbatoio di accumulo per i flussi, meglio ancora se si considerano due serbatoi. Un serbatoio, che rappresenta le sorgenti, può solo fornire flussi al sistema, mentre l'altro serbatoio, che rappresenta le utenze, può solo ricevere flussi dal sistema. Che cosa avvenga ai flussi una volta giunti al serbatoio delle utenze o come i flussi siano portati al serbatoio delle Sorgenti non è importante ai fini dell'analisi del sistema. Il fattore invece fondamentale è conoscere la categoria, e le caratteristiche dei flussi (vedi paragrafo 1.2) che l'ambiente mette a disposizione e richiede, e il valore (in funzione del tempo) di tale flussi. Conoscere il valore dei flussi significa conoscere l'andamento temporale che presentano; cioè, in pratica, sapere per ogni istante temporale quanta potenza e portata il sistema può prelevare dall'ambiente e quanta potenza e portate il sistema deve cedere all'ambiente.

Non tutte le differenti categorie di flussi potranno essere presenti su entrambi le sezioni, alcune ad esempio saranno presenti esclusivamente nelle Sorgenti ed alcune nelle Utenze. In questo paragrafo si analizzerà per entrambi le sezioni quali siano le possibili categorie presenti. In questa fase si stanno trattando sistema e ambiente in modo generale, analizzando tutti i possibili aspetti e tutte le possibili interazioni tra i due. Risulta facile pensare come poi nella pratica ogni sistema e conseguentemente ogni ambiente che lo circonda saranno caratterizzati solo da alcuni degli aspetti visti o solo da alcuni collegamenti.

1.3.1 Utenze

Si è visto poc'anzi come il termine utenza identifichi la sezione dell'ambiente che richiede e quindi riceve i flussi in uscita dal sistema. Ai fini dell'analisi è utile distinguere all'interno di questa sezione le diverse categorie di flussi richiesti. Nel seguito quindi non si farà più riferimento alla generica utenza, e quindi all'intera sezione dell'ambiente che riceve i flussi dal sistema, ma ad una o più specifiche utenze che ricevono solo una particolare categoria di flussi. Detta B una generica categoria di flussi:

Un'utenza di flussi B richiede al sistema esclusivamente flussi appartenenti alla categoria

B.

Questo fatto implica che un flusso B in uscita dal sistema possa essere collegato esclusivamente con un'utenza di flussi B . L'utenza rappresenta lo scopo per cui un sistema viene posto in essere. Possibili utenze sono ad esempio la richiesta di riscaldamento di un'abitazione, la richiesta di fornitura di energia elettrica di una città o ancora la richiesta di petrolio raffinato di una nazione. Per definire correttamente un'utenza bisogna essenzialmente trovare una risposta a queste tre domande: " Che cosa richiede? ", " Che caratteristiche deve avere? ", " In che quantità? ". Ogni utenza in pratica è caratterizzata da tre fattori:

- La categoria di flussi richiesti
- Le caratteristiche che tali flussi devono possedere
- L'andamento temporale dei flussi

Conoscere l'andamento temporale dei flussi, e quindi l'andamento della potenza o della portata in funzione del tempo che ogni utenza richiede, può non essere un'operazione semplice. Molte richieste, infatti, dipendono da aspetti non noti al momento dell'analisi, ad esempio per una richiesta di riscaldamento la dipendenza dalla temperatura esterna dei giorni seguenti, o per una richiesta elettrica la dipendenza dal comportamento degli utenti. In questa trattazione l'analisi su come un'utenza venga determinata è trascurata in quanto non in linea con lo scopo di questa tesi. Si farà quindi l'ipotesi che l'andamento temporale di potenza e portata sia un dato noto per ogni utenza. Le richieste possono essere costanti o variabili in funzione del tempo, si veda figura 1.3 in cui in rosso è indicato l'andamento di un'ipotetica utenza variabile mentre in nero quello di un'utenza costante.

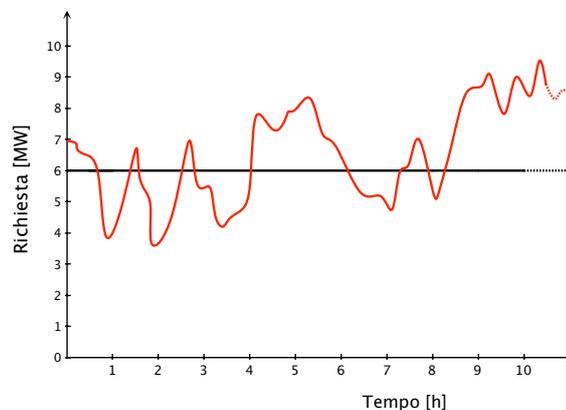


Figura 1.3: Andamento temporale dei flussi richiesti da un ipotetica utenza (andamento variabile in rosso, andamento costante in nero)

Nello studio dei sistemi energetici in cui si considerano intervalli temporali molto ampi può risultare conveniente discretizzare l'andamento della richieste [16]. In questa operazione si suddivide l'intero intervallo temporale in step temporali di ampiezza costante e per ogni intervallo si considera una particolare funzione che approssimi l'andamento reale della richiesta. Minore sarà l'ampiezza dell'intervallo e più la funzione di approssimazione si avvicinerà all'andamento reale maggiore sarà la precisione dell'analisi, ma allo stesso tempo maggiori saranno gli sforzi computazionali richiesti. Solitamente una soluzione, che trova numerosi riscontri in letteratura [5], [9], [13], [22], [10] è rappresentata dalla scelta di

10 Identificazione di tutte le traiettorie di conversione di fonti energetiche in prodotti utili.

step temporali pari ad un ora in cui considerare come funzione di approssimazione una costante. In questo caso quindi l'andamento del flusso richiesto dall'utenza potrà essere descritto come una serie di n intervalli, in ognuno dei quali la potenza è ritenuta costante. La categoria di flussi richiesti è il principale fattore che distingue un'utenza dall'altra. Nel seguito, infatti, le utenze saranno classificate in relazione alla categoria di flussi richiesti, e per ciascuna di esse saranno fornite le principali caratteristiche.

- Utenza di flussi di energia Elettrica (E): la richiesta di energia elettrica è ampiamente diffusa nel panorama energetico mondiale. Nella maggior parte dei casi l'utenza presenta un andamento fortemente variabile nel corso della giornata. La caratteristica principale del flusso richiesto è il livello di tensione a cui tale potenza è erogata. Un caso particolare è la rete elettrica. Nello studio dei sistemi energetici molto spesso ci si confronta con il collegamento alla rete elettrica. Si può parlare di vera e propria utenza solo quando il sistema è soggetto a specifici vincoli contrattuali, i quali impongono al sistema l'immissione in rete di determinate quantità di potenza elettrica (per esempio gli impianti che fanno partecipare al mercato elettrico).
- Utenza di flussi di energia Termica (Q): la richiesta di energia termica può essere distinta in due grandi categorie, quella di cessione di calore all'utenza e quella di asporto di calore dall'utenza. In entrambi i casi viene richiesto un flusso Q . Nel primo caso sarà necessario un flusso Qt , nel secondo un flusso Qc , distinzione fatta nel paragrafo 1.2. Le specifiche solitamente sono di fornire all'utenza in ogni istante di tempo una determinata portata di fluido contraddistinta da caratteristiche di temperatura e titolo ben definite, la quale dopo aver scambiato calore con l'utenza torna al sistema.
- Utenza di flussi di energia cumulabile (F): questa tipologia di utenza comprende in modo particolare la richiesta di energia chimica associata ai combustibili. La richiesta qui viene solitamente posta sia in termini di poter calorifero, viscosità, densità, numero di ottani, ecc
- Utenza di flussi di massa di prodotti non energetici (W): la richiesta qui è riferibile ai prodotti finiti non energetici, per i quali quindi non interessa il contenuto di energia in essi presente. Nell'analisi energetica si è introdotta tale tipologia di utenza in quanto, molto spesso, le unità di trasformazione di materie prime in prodotti finiti generano come sottoprodotti energia elettrica e termica.

Nella definizione di utenza non sono compresi tutti i flussi di massa ed energia in uscita dal sistema; vengono esclusi gli output che il sistema cede all'ambiente senza che esso li richieda esplicitamente. In molte situazioni, infatti, nei sistemi di conversione dell'energia può essere conveniente (dal punto di vista economico o termodinamico) produrre altri flussi oltre a quelli richiesti dalle utenze. Un caso tipico può essere un sistema che ha l'obiettivo di soddisfare un'utenza termica. Tra le varie combinazioni possibili per il soddisfacimento di tale utenza c'è anche quella di utilizzare un sistema cogenerativo opportunamente dimensionato. In questo caso oltre al flusso di energia termica Q si ha la produzione di un flusso di energia elettrica E . Questo flusso deve essere o utilizzato internamente al sistema o rilasciato all'ambiente. Il rilascio all'ambiente avviene mediante la connessione alla rete elettrica (e questo solitamente presenta un beneficio economico dato dalla vendita di tale flusso). L'ambiente però non richiede esplicitamente un flusso E , e quindi la quantità e

gli istanti in cui cedere tale flusso dipendono esclusivamente dalle scelte fatte nella fase di gestione del sistema (a meno di eventuali restrizioni). In questo caso la rete è vista come un accumulo di capacità infinita che può ricevere tutto ciò che il sistema gli fornisce. In precedenza si è visto come anche le utenze possano essere viste come dei serbatoi di accumulo per i flussi. Questa analogia fa intendere come la differenza tra utenza e le restanti uscite sia rappresentata esclusivamente dai diversi vincoli a cui sono soggetti i flussi in uscita. In un caso, infatti, il valore del flusso dovrà essere uguale ad un ben specifico valore, nell'altro il valore del flusso dovrà solo essere maggiore o uguale a zero.

1.3.2 Sorgenti

Il termine Sorgenti identifica la sezione dell'ambiente che mette a disposizione i flussi di massa e di energia, che il sistema può sfruttare. Ai fini dell'analisi è utile distinguere all'interno di questa sezione le diverse categorie di flussi disponibili (vedi paragrafo 1.2). Nel seguito quindi non si farà riferimento più alla generica sorgente, e quindi all'intera sezione dell'ambiente che fornisce i flussi al sistema, ma ad una o più specifiche sorgenti che rendono fruibile solo una particolare categoria di flussi.

Detta A una generica categoria di flussi:

Una sorgente di flussi A rende fruibile al sistema esclusivamente flussi appartenenti alla categoria A .

Una delle principali differenze con le utenze è proprio rappresentata dalla non obbligatorietà di dover sfruttare i flussi che l'ambiente mette a disposizione. Un flusso presente lato sorgenti può essere o non essere sfruttato a seconda delle scelte fatte in fase di progettazione e gestione del sistema. Le possibili sorgenti sono ad esempio la radiazione solare che colpisce una superficie, la portata di gas metano che circola nella rete di distribuzione, la corrente elettrica che può essere prelevata da una cabina in MT, o ancora il sacchetto di pellet che si compra al supermercato. Anche le sorgenti sono molto importanti per il progetto e il funzionamento del sistema, poiché individuano i flussi che il sistema ha la possibilità di sfruttare. È ovvio che le sorgenti siano fortemente influenzate dalla configurazione dell'ambiente che circonda il sistema, in particolar modo dalla posizione geografica del sistema. Uno stesso sistema (stesse unità e stessi collegamenti interni) posizionato in regioni diverse, e quindi circondando da ambienti con diverse caratteristiche, può non aver la possibilità di sfruttare le stesse sorgenti. Come per le utenze anche per definire le sorgenti è utile trovare la risposta alle tre domande poste in precedenza.

Ogni sorgente quindi è caratterizzata da tre fattori:

- La categoria di flussi richiesti
- Le caratteristiche che tali flussi devono possedere (paragrafo 1.2)
- L'andamento temporale dei flussi prelevabili

In precedenza si è visto come le sorgenti possano essere rappresentate da un serbatoio da cui il sistema possa attingere prelevando i flussi. Si ricorda che i flussi rappresentano potenze e portate, l'accumulo quindi identifica uno stoccaggio di energia e massa rispettivamente. Il prelievo dall'accumulo di una determinata quantità di energia o massa nell'unità di tempo identifica il flusso che va dall'ambiente al sistema. All'interno del serbatoio non è

12 Identificazione di tutte le traiettorie di conversione di fonti energetiche in prodotti utili.

detto che l'energia o la massa siano contenuti in quantità infinita, ed inoltre la loro quantità può variare nel tempo in relazione a fattori che non dipendono dal sistema e dal suo funzionamento. Questi aspetti influiscono fortemente sulle quantità di potenza e portata estraibili dal sistema. È importante quindi sapere per ogni istante temporale il valore dei flussi (cioè le potenze e le portate) che sono prelevabili dall'ambiente. Come per le utenze in molti casi individuare l'andamento dei flussi messi a disposizione dalle sorgenti non è un'operazione semplice, soprattutto quando si considerano istanti temporali futuri. Si pensi alla sorgente di un flusso di energia meccanica R rappresentato da una corrente ventosa. Conoscere l'andamento di tale flusso significa individuare per ogni istante di tempo il valore della velocità del vento, e di conseguenza la potenza ad essa associata. È chiaro che quando si fa riferimento a istanti futuri è necessario effettuare una previsione, che potrà essere corretta o meno. Non essendo però lo scopo di questa tesi questi effetti verranno trascurati e si considererà quindi sempre noto l'andamento temporale dei flussi resi fruibili dalle sorgenti.

Al pari delle utenze le sorgenti possono presentare un andamento costante o variabile in funzione del tempo. Anche in questo caso può risultare opportuno svolgere una discretizzazione dell'andamento temporale, soprattutto se l'analisi considera ampi intervalli di tempo.

La categoria di flussi richiesti è il principale fattore che distingue una sorgente dall'altra. Nel seguito, infatti, le sorgenti saranno classificate in relazione alla categoria di flussi messi a disposizione, e per ciascuna di esse saranno fornite le principali caratteristiche.

- Sorgenti di flussi di energia Elettrica (E): l'elettricità non è presente in natura in una forma sfruttabile dall'uomo. Può essere considerata come una sorgente qualora si prenda in considerazione la rete di distribuzione elettrica. La rete è vista a tutti gli effetti come un accumulo di energia elettrica di capacità molto estese. Essa può inviare al sistema un flusso E in relazione ai limiti imposti dalla regolazione.
- Sorgenti di flussi di energia Termica (Q): in natura sono presenti sia flussi caldi (Qt) sia flussi freddi (Qc). Un tipico esempio di flusso caldo è rappresentato dalle sorgenti geotermiche, dove si ha la presenza di un fluido che trasporta il calore endogeno alla Terra in zone prossime alla superficie. I flussi Qc sono rappresentati ad esempio dall'acqua di raffreddamento di una centrale termoelettrica, oppure dall'aria che giunge al condensatore di un gruppo a compressione di vapore. In molti casi però sia ha la presenza di flussi Q , derivanti da processi di scarto di operazioni industriali o energetiche. Si pensi ad esempio ai fumi di scarico di un gruppo turbogas.
- Sorgenti di flussi di energia cumulabile (F): come detto nella definizione, tale categoria di flusso comprende al suo interno un gran vastità di energie di forma diversa. La più classica a cui si fa riferimento è l'energia chimica associata ai combustibili.
- Sorgenti di flussi di energia non cumulabile (R): i flussi a cui più spesso si fa riferimento nel lato Sorgenti sono quelli, già visti in precedenza, associati alla corrente ventosa e alla radiazione solare. Un altro possibile caso è la portata d'acqua fluente di un fiume o di un ruscello. Essa, infatti, può essere sfruttata in impianti idroelettrici particolari che non prevedono la presenza di accumulo (impianti ad acqua fluente).
- Sorgenti di flussi di materie prime (M): sono associati ai flussi di materiali utilizzati soprattutto nell'industria di processo. Ad essi non è associato un corrispettivo contenuto energetico ma solo il contenuto massivo.

Prima di passare all'analisi dei componenti del sistema si vuol valutare i collegamenti diretti che le sorgenti possono avere con l'utenza. Il più tipico di questi è rappresentato dal caso in cui una richiesta di energia elettrica sia soddisfatta da un flusso diretto proveniente dalla rete. Tali connessioni possono essere escluse dai confini del sistema in quanto il flusso non subisce alcun processo di trasformazione. Nelle analisi, tuttavia, può essere conveniente considerare tali flussi all'interno del sistema poiché essi possono influire sul funzionamento dello stesso. Soprattutto, qualora si voglia svolgere un'analisi di tipo economico, determinare l'influenza del collegamento diretto rete-utenza può essere vantaggioso o necessario. Si pensi al caso di un'utenza di elettricità domestica soddisfatta mediante un impianto fotovoltaico. In assenza di sistemi di accumulo, il collegamento elettrico tra l'utenza e la sorgente di flusso E , rappresentata dalla rete, è necessario per far fronte alle richieste nei periodi in cui la radiazione solare non è presente. Tale flusso non subisce alcuna trasformazione all'interno del sistema, ma influisce sul bilancio di energia (concetto che sarà esaminato più avanti nell'analisi).

Caso particolare: Nell'analisi si possono presentare alcuni casi particolari, in cui la distinzione Utenza - Sorgenti può risultare complicata. I casi in cui sia richiesto di incrementare la temperatura di un fluido sotto la temperatura ambiente o raffreddare un fluido sopra la temperatura ambiente possono essere risolti in due modi. Il primo di questi è di non far niente; cioè lasciare che il gradiente termico tra il fluido e l'ambiente sia gradualmente diminuito dagli inevitabili scambi di calore tra questi due. Il secondo è quello di adoperare un sistema di conversione. Riferendoci alla richiesta di raffreddare dei fluidi sopra la temperatura (per il secondo caso possono essere svolte delle considerazioni analoghe) questa può essere soddisfatta mediante l'utilizzo di un ciclo termodinamico. Esemplicando si pensi ad un impianto industriale che produca in uno dei suoi processi dei vapori ad alta temperatura e che tali vapori debbano essere raffreddati per poter essere riutilizzati in altri processi. Una possibile opzione è utilizzare uno scambiatore per cedere il calore all'ambiente e portarli alla temperatura desiderata. Un'alternativa è quella di sfruttare i vapori in un ciclo di potenza (ad esempio un ORC), e quindi sfruttare il raffreddamento degli stessi per produrre energia elettrica. In questo secondo caso si può capire come il confine tra utenza e sorgente sia molto labile. La richiesta di raffreddamento, e quindi la richiesta di un flusso Q_c in uscita dal sistema, può essere vista come una sorgente di un flusso Q_t , in ingresso al sistema. Ai fini della modellazione questa ambiguità può essere risolta considerando i vapori ad alta temperatura come una sorgente soggetta al vincolo di dover esser utilizzata. In pratica in questo caso la richiesta di un flusso Q_c è sostituita da una sorgente di un flusso Q_t soggetto al vincolo di dover esser completamente sfruttato.

1.4 Unità di trasformazione di un sistema di conversione

Nel paragrafo 1.3 si sono introdotte le diverse categorie di flussi e si è visto come queste possano essere associate alle Utenze o alle Sorgenti. In questo paragrafo si prenderanno in considerazione le unità di trasformazione.

Le unità di trasformazione svolgono la funzione di trasformare uno o più flussi in ingresso in uno o più flussi appartenenti ad una diversa categoria o aventi caratteristiche diverse.

Con questa definizione si raggruppano sia i componenti atti a trasformare una forma di energia in un'altra, sia i componenti che, pur mantenendo la stessa forma di energia, ne variano le caratteristiche (paragrafo 1.2). Un generico sistema di conversione dell'energia,

quindi, può essere identificato da una o più unità di trasformazione. Nell'analisi di Macro-Sistemi, e di conseguenza in questa trattazione, si è soliti far coincidere i confini dell'unità di trasformazione con i confini degli impianti "tradizionali". Un'unità di trasformazione potrà rappresentare ad esempio un motore a combustione interna, un gruppo turbogas o un impianto a vapore. Questa scelta è stata assunta in relazione allo scopo di questa tesi, ma il carattere generale che si vuol dare a questa esposizione fornisce considerazioni valide anche per analisi svolte con gradi di dettaglio inferiore, in cui ad esempio l'unità possa rappresentare un insieme di impianti interconnessi tra loro.

Le unità possono essere viste e studiate come delle black-box, in cui funzioni matematiche legano i flussi in uscita ai flussi in ingresso (capitolo2). In questo modo le unità definiscono il massimo grado di dettaglio che è necessario per rappresentare adeguatamente il comportamento del sistema. Le relazioni che legano gli input agli output saranno analizzate nel capitolo seguente.

CRITERIO DI IDENTIFICAZIONE DEI FLUSSI E DELLE UNITÀ

Come è stato detto nella definizione, gli ingressi e le uscite per le unità di trasformazione potranno essere molteplici. Nel seguito si andranno ad analizzare le diverse possibili unità di trasformazione e le loro interazione con l'utenza e con le sorgenti. Questo è fondamentale per adempiere ad uno degli scopi di questa tesi, cioè quello di identificare e quantificare le possibili interazioni tra sistema e ambiente. Le interazioni tra sistema di conversione e ambiente infatti coincidono con le interazione che le unità, che costituiscono il sistema, presentano con l'ambiente.

Nella classificazione si è ritenuto opportuno dividere le varie tipologie di unità in relazione al numero di flussi scambiati con l'utenza. Questo poiché, come già detto nel paragrafo precedente, l'utenza fornisce dei vincoli più stringenti rispetto alle sorgenti sul progetto e sul funzionamento del sistema.

In questa trattazione le unità di trasformazioni saranno identificate dal simbolo P_{ab} (dall'inglese *Plant*, impianto) dove i pedici a e b in minuscolo identificano le CATEGORIE (vedi par. 1.2) di appartenenza dei flussi in uscita. Esemplicando, un impianto cogenerativo che produce energia elettrica e calore è rappresentato da un'unità che in uscita presenta un flusso di energia elettrica E e un flusso di energia termica Q , che sarà indicata con il P_{eq} . Nel caso in cui all'interno dello stesso sistema siano presenti più unità dello stesso tipo (che presentano cioè lo stesso numero e la stessa tipologia di output) si utilizzerà un pedice numerico per distinguerle.

Per ciò che concerne i flussi: i flussi prelevati dalla sorgenti saranno identificati con il simbolo $A_{s,out}$ dove A identifica la CATEGORIA dei flussi prelevati, mentre i pedici s e out definiscono che quel flusso è in uscita dalla sorgente. Parimenti per identificare i flussi inviati alle utenze si utilizzerà il simbolo $B_{u,in}$ in cui B identifica la CATEGORIA di flussi inviati, e i pedici u e in definiscono che quel flusso è in ingresso all'utenza. I flussi che interagiscono con le unità di trasformazione o con altre unità assumono una simbologia analoga. Un flusso appartenente alla generica CATEGORIA A che interagisce con un'unità P_{ab} è identificato dal simbolo $A_{P_{ab}}$ seguito da un pedice in o out a seconda che tale flusso rappresenti rispettivamente un flusso in ingresso e un flusso in uscita per detta unità. Nel caso in cui più flussi appartenenti alla stessa categoria, ma aventi caratteristiche diverse, dovessero interagire con una stessa unità o con una stessa sorgente o utenza si utilizzerà un pedice numerico per distinguerli. Utilizzando il sistema, analizzato nell'esempio precedente,

identificato dall'impianto cogenerativo e assumendo che esso per il suo funzionamento prelevi un flusso di combustibile F dalla sorgente di flussi F e ceda i flussi prodotti ad un'utenza elettrica E e un utenza termica Q si può osservare in figura 1.4 come vengano nominati i diversi flussi.

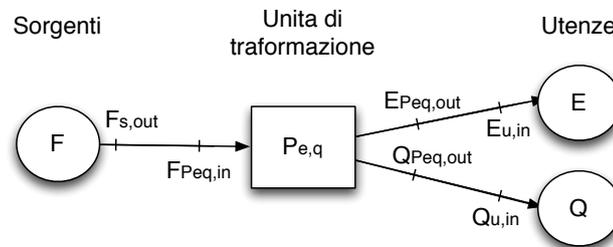


Figura 1.4: Schema di un'unità $P_{e,q}$ con l'indicazione dei simboli utilizzati per identificare i diversi flussi

1.4.1 Unità di trasformazione con 1 output

Queste unità di trasformazione hanno il compito di soddisfare la richiesta di un solo flusso da parte dell'utenza. Per far questo possono sfruttare in ingresso uno o più flussi della stessa tipologia o di tipologie differenti messi a disposizione dall'ambiente. Nei casi che seguiranno, si è fatta l'ipotesi di trascurare le perdite. L'assunzione di quest'ipotesi verrà trattata in maniera più esaustiva nel capitolo di modellazione.

I possibili flussi in uscita saranno ovviamente i possibili flussi richiesti dall'utenza, motivo per cui le unità di trasformazione a singola uscita potranno essere distinte in 4 categorie. Unità adibite alla produzione di flussi E, Q, F, W .

FLUSSI E

L'unità più classica, o quella a cui più spesso si fa riferimento per la produzione di energia elettrica, sono gli impianti che sfruttano un combustibile fossile. Se si pensa al panorama elettrico nazionale, si può osservare come gran parte dell'energia elettrica (60,2%) [18] venga prodotta grazie all'utilizzo di combustibile fossile. Per cui anche nell'analisi, la prima unità di trasformazione che si prenderà in considerazione è rappresentata da un impianto a combustibile fossile. Si prenda ad esempio un motore JMS 612 GS -N.L che produce un flusso pari a 4.401 kW di potenza elettrica sfruttando un flusso F di 9444 kW. A tale flusso F si può associare il relativo flusso di massa m_f . Sapendo che il motore è alimentato a gas naturale, che possiede un potere calorifico di 50MJ/kg e assumendo che la composizione di tale gas rimanga costante, e con essa il potere calorifico, la portata m_f sarà pari a 0.188 kg/s. In questo esempio si è fatto riferimento alle condizioni nominali di funzionamento.

È noto come però che le utenze difficilmente richiedano un flusso di energia costante e pari alle condizioni nominali dell'unità. Si ha, molto più frequentemente, la richiesta di flussi variabili nel tempo. L'andamento del flusso richiesto nel tempo sarà funzione di vari fattori: tipologia di utenza (domestica, industriale, ecc), giorno dell'anno, temperatura esterna ecc. Per fronteggiare tale variazione anche l'unità di trasformazione deve essere in grado di modificare il valore dei flussi generati. Tale operazione viene definita variazione del carico. Nel caso l'utenza sia alimentata da una singola unità, il flusso richiesto dovrà essere in

ogni istante uguale al flusso prodotto. Per cui anche il motore a combustione interna dovrà variare il carico in relazione alla richiesta dell'utenza, sempre tenendo in considerazione il range di funzionamento di tale impianto.

Nella definizione di unità di trasformazione si è detto che tali componenti possiedono anche la capacità di trasformare un flusso di energia in un flusso della stessa tipologia ma con caratteristiche differenti. Ed un esempio tipico è il trasformatore. Esso infatti ha il compito di trasformare un flusso di energia elettrica caratterizzato da un determinato livello di tensione in un flusso a livello di tensione differente. La relazione tra i flussi in ingresso e in uscita è rappresentato dal rendimento di trasformazione. I flussi potranno essere calcolati come $E_{in} = V_{in} \cdot I_{in}$ e $E_{out} = V_{out} \cdot I_{out}$.

La generazione di potenza elettrica da fonti rinnovabili, soprattutto negli ultimi anni, è penetrata fortemente nel mercato elettrico. Tipici impianti rinnovabili sono gli impianti fotovoltaici e le turbine eoliche. Tali impianti possono essere schematizzati come delle unità di trasformazione che generano flussi E sfruttando flussi R . Sia la radiazione solare sia la corrente ventosa rappresentano egregiamente due flussi R poiché l'energia a esse associata non può essere accumulata, a meno che, ovviamente, non vengano trasformata in una differente forma di energia.

Un'ulteriore possibilità per la generazione di energia elettrica si ottiene sfruttando flussi Qt . Impianti rientranti in questa tipologia, sono gli impianti geotermici. In questo caso i flussi Qt rappresentano i fluidi (acqua o vapore) che trasportano il calore geotermico dalle profondità della crosta alla superficie terrestre. Tali flussi in relazione alle loro caratteristiche possono essere sfruttati in impianti convenzionali o a ciclo binario.

Nella pratica i flussi Qt , come detto in precedenza, possono provenire anche da flussi di scarto di processi industriali. In questo caso la conversione in energia elettrica può venire tramite impianti ORC. Oltre ai processi industriali anche alcuni processi energetici mettono a disposizione flussi di calore di scarto. È il caso degli impianti turbogas i cui gas di scarico sono a temperature tali da poter essere utilizzati per un'ulteriore produzione elettrica. Ciò avviene ad esempio nei cicli combinati in cui i gas di scarico del turbogas sono inviati alla caldaia a recupero per la generazione di vapore da inviare ad un classico ciclo a vapore. Se si considera come unità di trasformazione solamente l'impianto a vapore a valle del turbogas, si può osservare come esso sia alimentato da un flusso Q e produca un flusso E . Finora si sono considerati esclusivamente unità aventi un ingresso e un'uscita. È però possibile che un'unità presenti in ingresso molteplici input. Si possono avere ingressi di flussi differenti come ad esempio un impianto che combini il solare termodinamico ad un gruppo turbogas; ma anche ingressi di flussi di una stessa categoria ma con caratteristiche differenti. Il caso tipico sono gli impianti bifuel, in cui si produce elettricità sfruttando la combinazione di combustibili differenti.

Riassumendo si è visto come la produzione del flusso E richiesto dall'utenza avvenga mediante l'utilizzo di unità di trasformazione P_e . Ciò comporta che tale unità abbia un collegamento diretto con l'utenza E . Per quanto concerne gli ingressi si è potuto osservare e ricordare come essa possa essere alimentata dai flussi E, R, F, Q o da più flussi $R + F, F1 + F2, R + Q$, ecc. per cui l'unità P_e potrà essere collegata a tutti i flussi presenti nel lato sorgenti, eccezion fatta per i flussi M .

FLUSSI Q

Come per l'utenza anche qui si sfrutta la distinzione in Qt e Qc . L'utenza può richiedere che le venga fornito calore, e dunque un flusso Qt , o che le venga asportato calore, flusso Qc . Per ora non si considereranno i casi particolari di riscaldamento sotto la temperatura

ambiente o raffreddamento sopra la temperatura ambiente. Le unità P_q , adibite a fornire un flusso termico all'utenza possono, come per il caso P_e , essere alimentate da uno o più flussi. Nella pratica, eccezion fatta per i flussi M , la produzione di flussi Q può avvenire sfruttando tutte le tipologie di flussi presenti nell'ambiente. Il caso di un'unità P_q alimentata da un flusso E , è ben rappresentata da un boiler elettrico. In esso, mediante il calore fornito per effetto Joule da una resistenza elettrica, si incrementa la temperatura di un fluido, solitamente acqua. Tale fluido può essere inviato direttamente all'utenza oppure ad uno scambiatore di calore. In quest'ultimo caso all'utenza verrà inviato un fluido secondario. L'elettricità può essere utilizzata anche per asportare una quantità di calore dall'utenza. In questo caso l'unità P_q rappresenta un gruppo frigorifero a compressione di vapore 1.5.

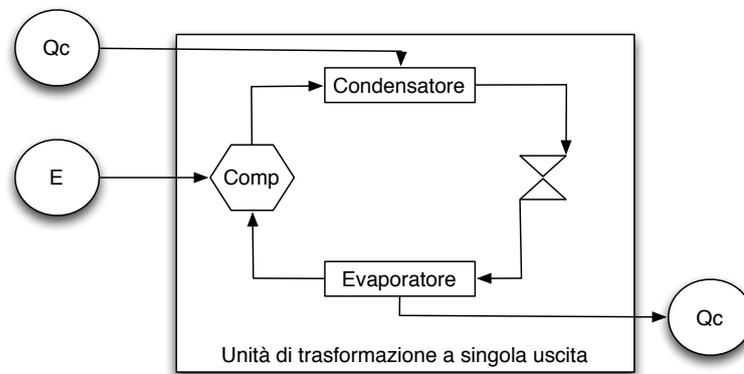


Figura 1.5: Schema di un gruppo frigorifero a compressione di vapore

Per chiarezza si è rappresentata oltre all'unità di trasformazione anche tutti i suoi componenti interni. Il flusso di energia elettrica in ingresso all'unità serve ad azionare il compressore. Come si evince dalla figura, l'altro ingresso è rappresentato da un flusso Q_c necessario ad asportare il calore durante la fase di condensazione. I due flussi Q_c ovviamente sono flussi con caratteristiche (vedi paragrafo 1.2) differenti. Se il flusso Q_c che alimenta il condensatore è rappresentato dall'aria a temperatura ambiente, opzione utilizzata ad esempio nei frigoriferi domestici, tale flusso può essere trascurato. La produzione di flussi Q , in particolare Q_t può avvenire mediante l'utilizzo di flussi F . Il caso più tipico è quello della caldaia alimentata da combustibile fossile (metano o gasolio). Un caso significativo potrebbe essere rappresentato dal primo sistema energetico inventato nella storia: il fuoco. Il focolare rappresentava una primordiale unità di trasformazione che utilizzava un combustibile solido, come la legna, per la produzione di calore. In questo caso il flusso Q_t era associato alla portata di fumi, e in parte alla componente non trascurabile dell'irraggiamento.

Come per il caso elettrico, anche nella produzione di calore da risorse rinnovabile ha avuto, negli ultimi anni, un ruolo chiave. Un buon contributo, dovuto alla fattibilità e ai costi relativamente bassi, lo forniscono i pannelli solari termici. In molte abitazioni, infatti, l'installazione del solare termico ha permesso di soddisfare completamente o in parte la richiesta di acqua calda sanitaria.

L'ultima possibilità per la produzione di flussi Q , utilizzando un singolo input, è quella di sfruttare altri flussi Q disponibili in ambiente. Un'opzione fattibile in alcune località è quella di sfruttare il calore endogeno. Ad esempio nella città Reykjavic il calore geotermico

è utilizzato, grazie ad una rete di teleriscaldamento, per far fronte alla richiesta termica della cittadina [19].

Il calore Qt in ingresso può essere utilizzato, insieme ad un flusso E per la produzione di un flusso termico Q_c da inviare all'utenza. Queste unità prendono il nome di gruppi ad assorbimento. Il gruppo frigorifero ad assorbimento è un sistema termodinamico il cui funzionamento si basa su un ciclo che si esplica nelle diverse fasi senza l'ausilio di compressori elettrici. Il funzionamento dell'assorbitore si realizza, infatti, mediante un fluido refrigerante (acqua o ammoniaca) ed un fluido assorbente (acqua + bromuro di litio o semplice acqua) le cui trasformazioni di stato si susseguono ciclicamente per effetto di fenomeni fisici, derivanti dalle particolari condizioni di temperature e pressioni a cui le sostanze stesse vengono sottoposte. Rispetto ad un ciclo frigorifero a compressione di vapore, il ciclo ad assorbimento prevede al posto di un compressore un assorbitore, un concentratore ed una pompa. Il vapore refrigerante formatosi dapprima nel generatore di alta temperatura e poi in quello a bassa temperatura (doppio effetto) viene condensato nel condensatore e il fluido refrigerante viene poi inviato all'evaporatore. L'alto calore latente di vaporizzazione dell'acqua (539 kcal/kg) consente il raffreddamento del fluido nell'evaporatore e il gas refrigerante viene poi assorbito da una soluzione assorbente con tensione di vapore inferiore. Durante la fase di evaporazione il fluido refrigerante assorbe calore da un fluido secondario, andando a diminuirne la temperatura. Tale fluido secondario rappresenta il flusso Q_c che sarà inviato all'utenza.

Come per il caso elettrico, anche se con una frequenza minore, la produzione o l'asporto di calore può avvenire con ingressi multipli.

Riassumendo si è visto che la produzione del flusso Q richiesto dall'utenza avvenga mediante l'utilizzo di unità di trasformazione P_q . Ciò comporta che tale unità abbia un collegamento diretto con l'utenza Q_u . Per quanto concerne gli ingressi essa può essere alimentate dai flussi E, R, F, Q sia presi singolarmente che in combinazione tra di loro, per cui l'unità P_e potrà essere collegata a tutti i flussi presenti sul lato sorgenti, eccezion fatta per i flussi M .

FLUSSI F

Come detto in precedenza per l'utenza, la richiesta di flussi F è rappresentata in primo luogo dalla richiesta di combustibili. In quest'ottica è difficile trovare, nella pratica, unità di trasformazione che utilizzano esclusivamente un flusso in ingresso. Nella maggior parte dei casi la produzione di un combustibile avviene sfruttando un combustibile primario che mediante l'utilizzo di calore o di energia elettrica viene trasformato in un combustibile con caratteristiche differenti. Si pensi ad esempio alla produzione dell'idrogeno mediante l'idrolisi dell'acqua. In questo caso in input si avrà una portata d'acqua (flusso F poiché si considera l'energia chimica in essa contenuta) ed un flusso di energia elettrica, mentre all'uscita del componente P_f si avrà un flusso F rappresentante la portata di idrogeno e un flusso di perdita che rappresenta la portata di ossigeno. Un altro esempio è la distillazione frazionata del petrolio, il processo di cracking [20]. Il petrolio, epurato dall'acqua e dalle altre impurità mediante la trasformazione primaria, viene inviato al processo di raffinazione. In questo processo viene fornito calore per vaporizzare i diversi idrocarburi contenuti nel petrolio. Ogni idrocarburo evaporerà ad una differente temperatura in relazione al proprio punto di ebollizione, e quindi in funzione del proprio peso molecolare. Le sostanze più leggere e quindi più volatili evaporeranno per prime. È il caso della gasolina, come viene chiamata la benzina, prima di ulteriori trattamenti additivi. Visto che in questa sezione si vuole prendere in considerazione il singolo output si ragionerà ad esempio su una

richiesta di un singolo combustibile come la benzina. In questo caso nell'unità P_f entreranno un flusso F che rappresenta il petrolio greggio con potere calorifico pari a circa 40 MJ/kg e il flusso di calore necessario per portare il miscuglio di idrocarburi alla temperatura di evaporazione della gasolina. Nella pratica molte trasformazioni di combustibili richiedono molteplici ingressi (E, Q) oltre ovviamente al combustibile primario. Un esempio potrebbe essere la filiera per la produzione del biogas. L'unità P_f presenta l'ingresso di due flussi F , che rappresentano il substrato e il co-substrato, i quali devono subire il processo di digestione da parte di batteri presenti nel digestore. Il digestore a sua volta necessita di un flusso Qt per mantenere la temperatura costante e superiore alla temperatura atmosferica. Questo è attuato per velocizzare il processo di digestione. E' richiesto, inoltre, un flusso di energia elettrica per azionare gli ausiliari atti alla miscelazione del substrato. Riassumendo si è visto come le unità P_f richiedano in ingresso combustibili primari e quindi flussi F ed altre forme di energia, in particolare calore e energia elettrica. Tale unità ovviamente sono collegato all'uscita unicamente con l'utenza F .

FLUSSI W

I flussi W non riguardano aspetti energetici, per cui in questo lavoro di tesi non vengono presi in considerazione in modo approfondito. L'interesse maggiore, lo suscitano le unità che oltre alla produzione di flussi W producono anche altri prodotti dalle caratteristiche di maggior rilevanza dal punto di vista energetico. Unità che verranno descritte nel proseguo della trattazione. Per la produzione di un prodotto finito è necessario che l'unità P_w sia alimentata da un flusso di materie prime M in combinazione con un'altra forma di energia come calore o energia elettrica.

1.4.2 Unità di trasformazione con 2 output

In questo paragrafo si analizzeranno le unità di trasformazione che presentano due output. Come per le unità analizzate nel capitolo precedente, si ha la possibilità di avere singoli o molteplici input. I possibili flussi in uscita corrispondono alle diverse tipologie di richieste da parte dell'utenze. Per classificare le diverse unità si segue lo schema visto nella sezione precedente, distinguendole in relazione alla tipologia di output. Ovviamente avendo quattro flussi differenti e dovendo valutare tutte le possibili coppie si ricavano 24 combinazioni. Considerando però che, ad esempio, la combinazione $E-Q$ è analoga alla combinazione $Q-E$ esse si riconducono a 6 possibili casi diversi: $E-Q, E-F, E-W, Q-F, Q-W, F-Q$. Ogni unità, analogamente al caso precedente, presenterà un collegamento diretto con le relative utenze. Così, per citare un esempio, l'unità P_{qf} sarà collegata all'utenza di flussi Q e all'utenza di flussi F . Il numero delle possibili combinazioni salirebbe a 10 qualora si considerassero le unità che producono flussi della stessa categoria, ma con caratteristiche differenti. Nella trattazione ci si concentrerà sui componenti che producono flussi appartenenti a diverse categorie e si citeranno solo alcuni casi con due flussi della stessa. In questa sezione non si porteranno degli esempi per spiegare tutte le possibili connessioni tra ambiente e sistema, ma ci si limiterà ad esporre gli esempi più significativi.

I casi più tipici ed esemplificativi di unità a doppia uscita sono certamente gli impianti cogenerativi. Nella maggior parte dei casi tali unità trasformano un flusso F in un flusso di energia elettrica e in un flusso di energia termica. Nella pratica ingegneristica le possibili unità cogenerative sono di diverso tipo: cicli a vapore a derivazione e condensazione, turbogas, motori a combustione interna, ORC, stirling, microturbine a gas. Ogni diversa tipologia ha la propria caratteristica di funzionamento, ma tutte possono venir schematiz-

zate come un'unità P_{eq} che trasforma un flusso F (o Q nel caso ad esempio degli ORC) in un flusso E ed un flusso Q . Si pensi ad esempio ad una microturbina a gas CapstoneC200 che produce in condizioni nominali 200kW di potenza elettrica e 280 kW di potenza termica sfruttando un flusso F di 606 kW a cui corrisponde un flusso di massa di $0.017 \text{ m}^3/\text{s}$ di gas naturale (potere calorifico del gas naturale LHV gas = $36 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$). La produzione del flusso Q_t è associata ad un portata d'acqua a 70°C gradi con temperatura di ritorno di 10°C .

Nella gran parte delle situazioni i sistemi CHP (combined heat and power) presentano un singolo ingresso F o Q , in riferimento a tutti i tipi di impianti citati sopra. Negli impianti di potenza si ha, tuttavia, la possibilità di alimentare le unità con molteplici ingressi. Si pensi ad esempio agli impianti che sfruttano più combustibili differenti, sistemi bifuel o con sistemi che sfruttano in modo combinato combustibile e calore o una risorsa rinnovabile.

Nell'unità adibite alla produzione di flussi F e di flussi W , in molte situazioni, si rendono disponibili altri flussi di scarto. Questi flussi sono rappresentati da flussi Q e flussi E . Ad esempio si consideri un impianto per la produzione del bioetanolo. Sul lato sorgenti si ha lo scambio di tre flussi: il combustibile primario (barbabietola o sorgo zuccherino), l'energia elettrica necessaria nei processi di estrazione e distillazione e il calore necessario al processo di fermentazione. Tale unità oltre a rendere disponibile il flusso F di bioetanolo produce un flusso E derivato dalla combustione delle bagasse (sottoprodotto del processo di estrazione del succo). Il flusso E richiesto dall'utenza rappresenta totalmente o in parte l'energia richiesta dall'unità per il suo funzionamento. I casi riguardanti le restanti combinazioni sono del tutto analoghe a quanto visto fin ora.

Nelle unità di produzione di doppi flussi sono comprese anche quelle che producono due flussi della stessa tipologia. Un possibile caso è ad esempio un'utenza che richieda due flussi Q a temperatura differenti. Per soddisfare tale richiesta una soluzione è quella di produrre un singolo flusso Q a temperatura maggiore e poi disperdere il calore in eccesso mediante uno scambio con l'ambiente; questo comporta però una perdita exergetica. Un'altra possibilità, più conveniente dal punto di vista energetico, è quella di produrre contestualmente i due flussi di calore a temperatura differente, ad esempio sfruttando degli spillamenti da un ciclo a vapore a due livelli di pressione diversi.

1.4.3 Unità di trasformazione con 3 output

In questa sezione si prendono in considerazione le unità di trasformazione che generano tre diverse tipologie di flussi in uscita. Come per le categorie precedenti i possibili flussi in uscita, e di conseguenza i possibili collegamenti, sono le tipologie di flussi richiesti dall'utenza. Risulteranno dunque 3^4 possibili combinazioni. Epurando tale numero dalle combinazioni doppie si ricavano 4 possibili combinazioni: $E - Q - F / E - Q - W / E - F - W / Q - F - W$. Le combinazioni elencate solo in alcuni rari casi verranno rappresentate da singoli impianti di trasformazione. Per valutare unità di trasformazione multi-prodotto solitamente si assume un grado di dettaglio inferiore rispetto ai casi visti in precedenza. Ci si concentrerà su sistemi più grandi e complessi formati da un insieme di impianti di dimensioni minori. Ciò è possibile in quanto, come visto in precedenza, le dimensioni (i confini) dell'unità di trasformazione vengono assunti in relazione al grado di dettaglio scelto. Gli esempi seguenti rappresentano quasi sempre unità di trasformazione complesse, formati dall'insieme delle unità di trasformazione viste nei paragrafi precedenti.

Come per il caso di 2 output, nelle possibili combinazioni non si sono considerate le unità

che producono flussi della stessa categoria. Se tuttavia si volesse considerare anche le possibili combinazioni di questi flussi si dovrebbe valutare un numero elevato di combinazioni. Una volta osservato il collegamento tra una categoria di flusso e l'utenza, i casi in cui flussi della stessa categoria, ma con caratteristiche differenti, sono collegati all'utenza saranno compresi in esso.

Una delle combinazioni più frequenti è quella rappresentata dalla produzione di un combustibile, energia elettrica e calore. Molto impianti per la produzione di combustibili, infatti, rendono disponibili come sotto prodotti del calore e dei combustibili di scarto che possono essere utilizzati a loro volta per la produzione di energia elettrica. In molti casi i flussi richiesti dall'utenza sono i flussi necessari anche al funzionamento dell'impianto. Vi è una sorta di collegamento tra utenza e sorgenti, giacché l'energia richiesta dall'utenza coincide con parte dell'energia che l'ambiente deve fornire al sistema per il suo funzionamento. Un esempio potrebbe essere la filiera del biodiesel 1.6.

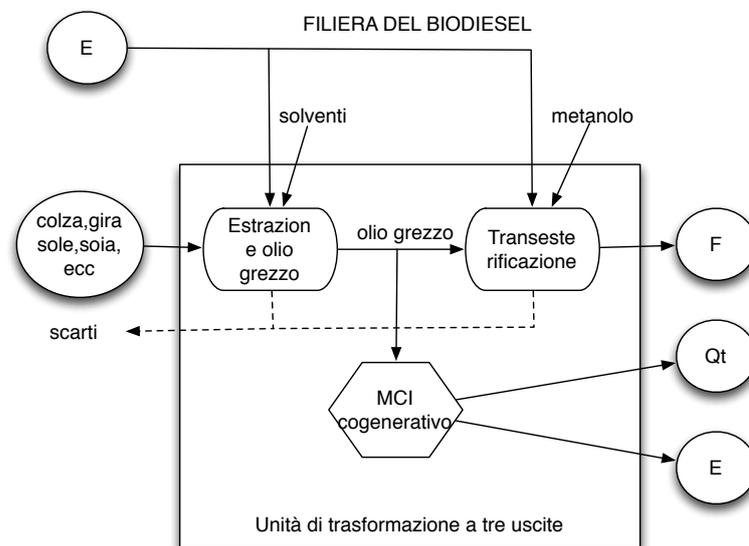


Figura 1.6: Schema di un impianto per la produzione del biodiesel

In ingresso l'unità presenta un flusso di energia F (a cui è associata una portata di massa di colza, girasole, soia, a seconda della coltivazione di riferimento) e un flusso di energia elettrica. Il flusso di F subisce un primo trattamento in cui si ha l'estrazione dell'olio. L'estrazione avviene in due fasi consecutive: la prima in cui si ha una spremitura meccanica (utilizzo di flussi E) e la seconda in cui si utilizza l'esano per estrarre l'olio grezzo rimasto (flussi F). L'olio grezzo viene in parte indirizzato ad un motore a combustione interna cogenerativo, che sfrutta un ciclo diesel, e in parte inviato al processo di transesterificazione. Il motore diesel produce l'energia elettrica necessaria all'unità e il calore adibito all'utenza termica. Nel processo di transesterificazione viene sfruttato un flusso E ed un flusso F (mentanolo) per la trasformazione dell'olio grezzo in biodiesel. Dalla figura si riesce a comprendere meglio come il grado di dettaglio influisca sulla scelta dei confini delle unità di trasformazione. L'unità a tre uscite può essere vista come un sistema composto di tre unità di trasformazione distinte ma collegate tra di loro: un'unità P_{f1} (che identifica il processo di conversione della colza in olio grezzo), un'unità P_{f2} (che identifica il processo di conversione del olio grezzo in biodiesel), e un'unità P_{qe} (conversione dell'olio

22 Identificazione di tutte le traiettorie di conversione di fonti energetiche in prodotti utili.

grezzo in calore ed elettricità).

Le altre possibili combinazioni sono meno diffuse in ambito energetico, ma sono maggiormente presenti nel campo industriale. Le industrie rappresentano delle ottime unità di trasformazione in cui oltre al flusso principale (lo scopo per cui l'industria è in funzione) si hanno diversi flussi che vengono trasformati e resi disponibili per eventuali utenze. Tali casi vengono tralasciati dall'analisi poiché lontani dei fini prettamente energetici.

Molto più interessanti in campo energetico sono invece i casi in cui siano richiesti tre flussi, di cui due della stessa tipologia ma con caratteristiche differenti. Un caso tipico è presentato dalla trigenerazione in cui sono presenti: un'utenza elettrica, un'utenza termica e un'utenza frigorifera ($E - Qt - Qc$).

Nello schema 1.7 si può vedere come tale unità presenti in ingresso un singolo flusso F

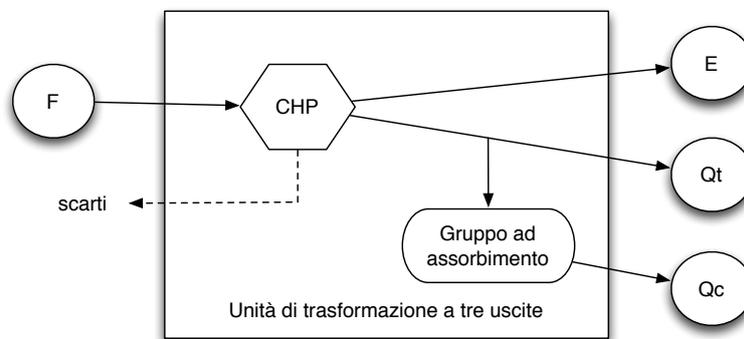


Figura 1.7: Schema di impianto di trigenerazione

che alimenta l'unità cogenerativa. In essa avviene la conversione in flussi di energia elettrica e termica, caso visto nel paragrafo precedente. Il flusso E è collegato direttamente all'utenza, il flusso Qt in parte è collegato all'utenza e in parte è visto in ingresso ad un gruppo ad assorbimento. Il gruppo ad assorbimento ha la funzione di convertire il flusso termico Qt in un flusso Qc , solitamente acqua refrigerata.

Vale, analogamente alla filiera del biodiesel, il riferimento ai confini dell'unità di trasformazione. Come per i confini del sistema anche i confini dell'unità di trasformazione dipendono dall'analisi che si vuole svolgere. Se si dovesse studiare il singolo impianto di trasformazione sarebbe più opportuno eseguire un'analisi ad un grado di dettaglio maggiore e quindi considerare l'unità CHP e il gruppo ad assorbimento come due unità distinte. Se invece l'impianto di trigenerazione entra a far parte di uno studio che comprende altri impianti risulta conveniente adoperare un grado di dettaglio minore e quindi considerare l'impianto come una singola unità di trasformazione. Queste assunzioni vengono fatte trascurando per ora i concetti di modellazione. Si vedrà nel capitolo successivo come il passaggio da un grado di dettaglio maggiore ad uno minore sia possibile solamente quando le relazioni tra i flussi prodotti siano note o possano essere ricavate mediante simulazioni (mappe caratteristiche).

Un ulteriore esempio di triplice utenze può essere rappresentate dalla richiesta di un flusso E e di due flussi Qt a caratteristiche differenti (diversi livelli di temperatura). Per soddisfare tale utenze può essere utilizzato un impianto a vapore a derivazione e condensazione [21]. In tali impianti si ha la possibilità di spillare e inviare all'utenza il vapore. Per soddisfare l'utenza termica si utilizzeranno due spillamenti a due diversi livelli di pressione, i quali cederanno il calore necessario alle due utenze direttamente o tramite un fluido inter-

medio. La potenza elettrica richiesta dall'utenza verrà generata dall'espansione in turbina del restante vapore.

Per ciò che riguarda gli ingressi sono possibili tutti le interazioni con le sorgenti. Negli esempi visti in precedenza si sono potuti osservare casi in cui l'input fosse singolo, come ad esempio il caso della trigenerazione, o doppi, come il caso del biodiesel. In generale quindi si potranno prevedere tutti i possibili collegamenti tra unità e sorgenti, nella gran parte dei casi si tratterà di ingressi multipli.

1.4.4 Unità di trasformazione con 4 output

In questo paragrafo si prenderanno in considerazione le unità che presentano 4 possibili uscite. Se si considera il collegamento diretto con l'utenza e si valutano solamente le diverse tipologie di flussi si presenta, ovviamente, una unica combinazione possibile $E-Q-F-W$. Nel caso in cui si volesse osservare i collegamenti tra unità e utenze relative a flussi della stessa tipologia ma con caratteristiche differenti il numero delle possibili combinazione crescerebbe di molto.

Unità di questo genere non sono molto diffuse soprattutto se si mantengono i confini dell'unità a livello di singolo impianto di produzione.

Un caso particolare è l'unità che presenta in uscita i collegamenti con tutte le utenze e in

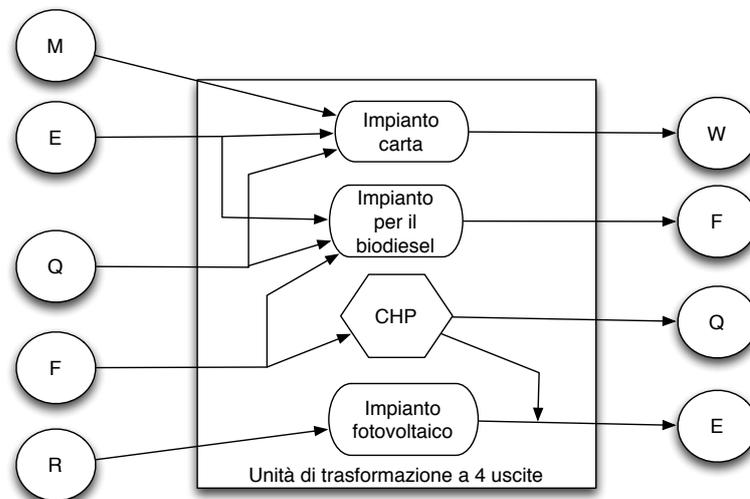


Figura 1.8: Schema di un'unità di trasformazione a 4 uscite

ingresso i collegamenti con tutte le sorgenti. Essa rappresenta un'unità che produce tutto ciò che può essere richiesto dall'ambiente sfruttando tutti possibili flussi che l'ambiente mette a disposizione. Nella pratica è difficile imbattersi in impianti di tale genere. Se però, facendo un discorso analogo al caso con tre uscite, si espando i confini dell'unità facendoli coincidere con aree più vaste (zone industriali, comuni, province, regioni, stati) tale unità può assumere un significato reale. Assumiamo ad esempio il caso in cui l'unità di trasformazione rappresenti una specifica zona industriale all'interno di un sistema più ampio che consideri un insieme di comuni. Si ipotizzi che tale complesso industriale sia composto da una serie di impianti quali: un sistema cogenerativo, un impianto per la

Tabella 1.2: Tabella riassuntiva di tutte le possibili unità di trasformazione

| Numero di uscite | Categoria dei flussi in uscita | | | | | |
|------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-----|-----|
| 1 output | E | Q | F | W | | |
| 2 output | E,Q | E,F | E,W | F,Q | F,W | Q,W |
| 3 output | E,Q,F | E,Q,W | E,F,W | Q,F,W | | |
| 4 output | E,Q,F,W | | | | | |

produzione di biodiesel, un impianto fotovoltaico e un impianto per la produzione di carta. Alcune di queste unità sono già state presentate negli esempi precedenti. Come ben si evince dalla 1.8 l'unità sfrutta tutte le possibili tipologie di flussi sul lato sorgenti per soddisfare tutte quattro le possibili utenze.

1.5 Superstruttura che include tutte le possibili traiettorie di conversione

Nei paragrafi precedenti si sono analizzate le possibili interazioni tra un generico sistema di conversione e l'ambiente esterno (vedi par. 1.3). Inoltre si è osservato come sia possibile distinguere le diverse unità di trasformazione in relazione al numero e alla categoria (vedi par. 1.4) di appartenenza dei flussi in uscita. Avendo quindi definito e descritto questi tre aspetti si può passare ad analizzare le diverse traiettorie di conversione di fonti fossili e risorse rinnovabili in prodotti utili. Una traiettoria individuano un percorso che collega una sorgente di flussi ad un una specifica utenza attraverso una o più unità di trasformazione. Ovviamente è bene ricordare che le unità di trasformazione che in uscita presentano un flusso di una generica categoria A potranno essere collegate esclusivamente con utenze di flussi A o con altre unità che prevedono come possibile input il flusso A.

In questo paragrafo verrà proposta una schematizzazione, definita superstruttura, che preveda tutte le possibili interazioni tra ambiente e sistema, e tutti le possibili unità di trasformazione. In particolar modo la superstruttura permette di individuare le interazioni che l'ambiente possiede, sia in ingresso sia in uscita, con ciascun tipo di unità di trasformazione. In pratica la superstruttura identifica tutte le possibili traiettorie di conversione di massa ed energia in prodotti utili richiesti dalle utenze. Di seguito viene riportata la tabella 1.2 che riassume tutte le possibili unità di trasformazione, individuate dal numero e dalla categoria di appartenenza dei flussi in uscita.

Dalla tabella 1.2 si evince come i possibili tipi di unità di trasformazione siano in totale 15. Volendo quantifica i possibili collegamenti tra il sistema e l'ambiente è utile considerare prima i collegamenti tra unità di trasformazione ed utenza, e, in secondo luogo i collegamenti tra sorgenti ed unità di trasformazione.

Enumerare tutti i possibili collegamenti tra unità di trasformazione e utenze risulta un'operazione relativamente semplice, grazie a come sono state distinte le diverse unità. Essendo state distinte le unità in relazione al un numero di uscite il numero totale di tutti i possibili collegamenti sarà dato dalla somma di tutti gli output delle 15 unità di trasformazione. Si ottengono quindi 32 possibili collegamenti: 4 unità a singola uscita, 6 unità a doppia uscita, 4 unità con tre output e un unità a 4 uscite.

Tabella 1.3: Numero di tutte le possibili interazioni tra sistema e ambiente

| Numero di possibili interazioni tra sorgenti e unità | Numero di possibili unità | Numero di possibili interazioni tra unità e utenze | Numero totale di possibili interazioni tra sistema e ambiente |
|--|---------------------------|--|---|
| 75 | 15 | 32 | 107 |

$$32 = (4 \times 1 + 6 \times 2 + 4 \times 3 + 1 \times 4)$$

Per ciò che riguarda i possibili collegamenti tra le sorgenti e le unità di trasformazione si può fare un discorso analogo. Enumerare questi collegamenti però, può risultare un pò più complicato, poichè non è possibile individuare il numero e la categoria del o dei flussi in ingresso dalla tipo di unità, contrariamente a ciò che accadeva per le uscite. Ad esempio di un'unità P_{eq} si sa che prevede due uscite e quindi due collegamenti con le utenze, ma non si è in grado di determinare nè il numero nè la tipologia di flussi in ingresso. Tale unità potrebbe essere alimentata da un flusso F di combustibile o da un flusso R o da entrambi. Questo deriva dal fatto che si è deciso di distinguere le diverse unità di trasformazione in relazione agli output. Comunque per calcolare il numero di possibili collegamenti tra sorgente e unità si è fatto l'ipotesi che ogni unità abbia la possibilità di essere alimentata da ogni diversa sorgente. Così avendo a disposizione quindi 15 differenti tipi di unità e 5 possibili flussi in ingresso le combinazioni diventano 75. Di queste, ovviamente, alcune saranno poco probabili e difficilmente realizzabili, ma nell'obiettivo di voler mantenere un carattere generale saranno tutte tenute in considerazione.

$$75 = (4 \times 5 + 6 \times 5 + 4 \times 5 + 1 \times 5)$$

In tabella 1.3 sono riportati il numero di tutte le possibili interazione che il sistema ha con l'ambiente. Lo schema della superstruttura generale riportato in figura 1.9 evidenzia tutte le possibili traiettorie di conversione di massa ed energia in prodotti utili. Sono identificate tutte le 15 possibili unità di trasformazione, le 75 possibili interazione tra sorgenti e unità e infine le 32 possibili interazioni tra unità ed utenze.

Come si può notare dalla figura 1.9, pur cercando di sintetizzare il più possibile, lo schema presenta un numero di collegamenti elevato. Per ridurre ulteriormente tale numero senza però perdere delle informazioni utili, si può riprendere una considerazione fatta nel paragrafo 1.4. In tale paragrafo si era introdotta l' "Unità base". Essa aveva la particolarità di prevedere in ingresso tutti gli eventuali collegamenti con le sorgenti e in uscita tutti i possibili collegamenti con l'utenza. Questa unità, quindi può essere utilizzata per descrivere tutte le possibili traiettorie di conversione della materia e dell'energia in prodotti utili, come si vede dalla figura 1.10. In questo caso i possibili collegamenti sono 9: 5 tra sorgenti e unità e 4 tra unità ed utenze. Di seguito viene presentata una superstruttura che possiede le tipologie di unità che più frequentemente trovano posto nell'analisi dei sistemi energetici. Questo schema 1.11, che sarà anche il più utilizzato nel proseguo della trattazione, non presenta il grado di sintesi massimo, permette, tuttavia, di mostrare con maggior dettaglio situazioni comuni nella pratica ingegneristica. La schematizzazione risulta più immediata ed efficace in quanto permette di associare ad una determinata unità l'impianto a cui si

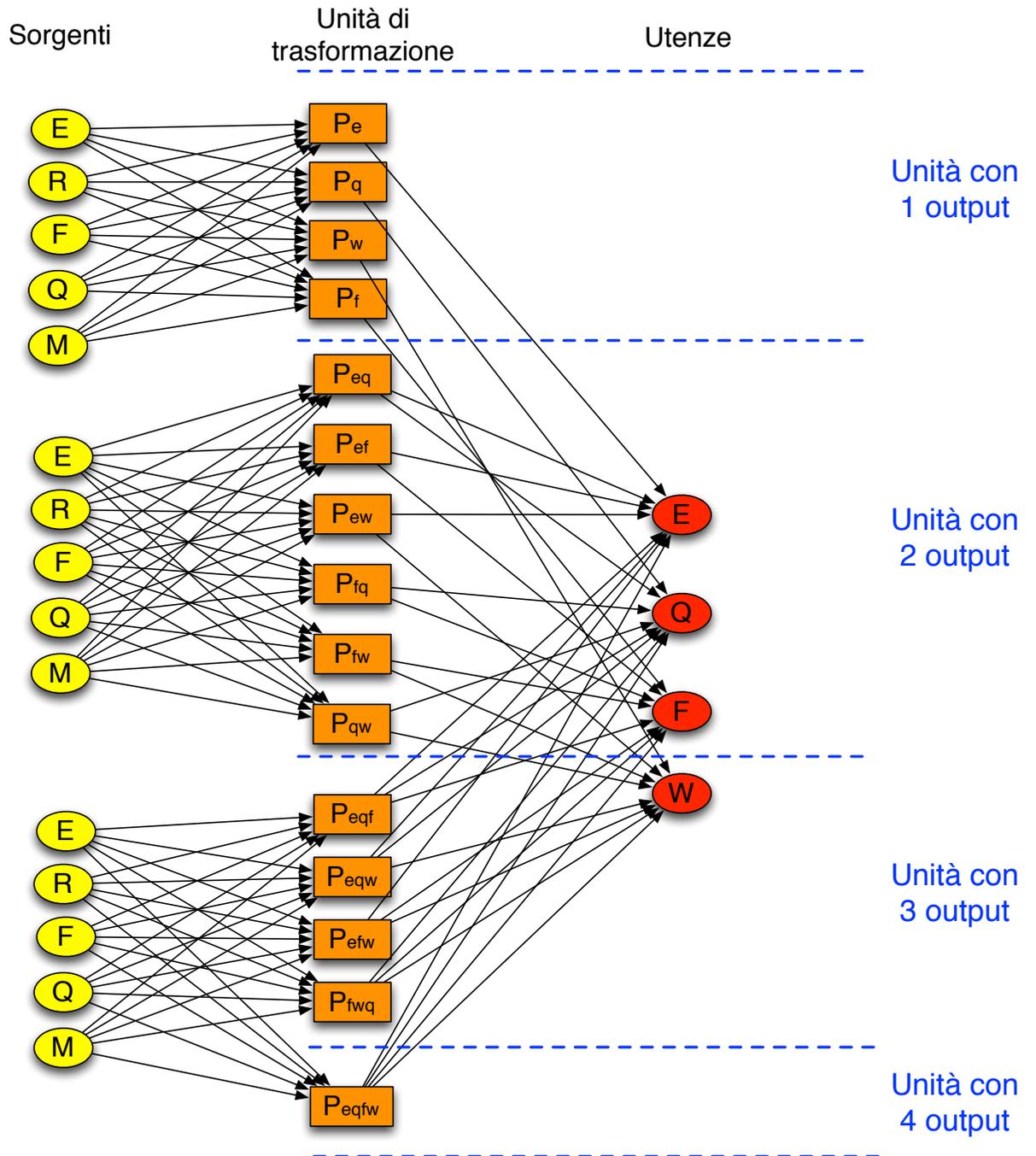


Figura 1.9: Schema della superstruttura

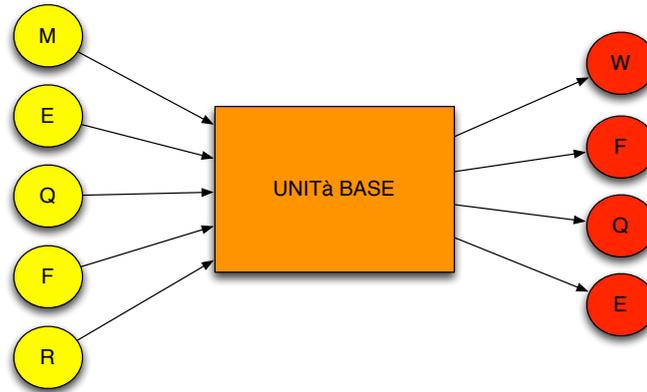


Figura 1.10: Schema della superstruttura con unità base

riferisce. Nel seguito verranno presentati due esempi e si mostrerà come effettivamente

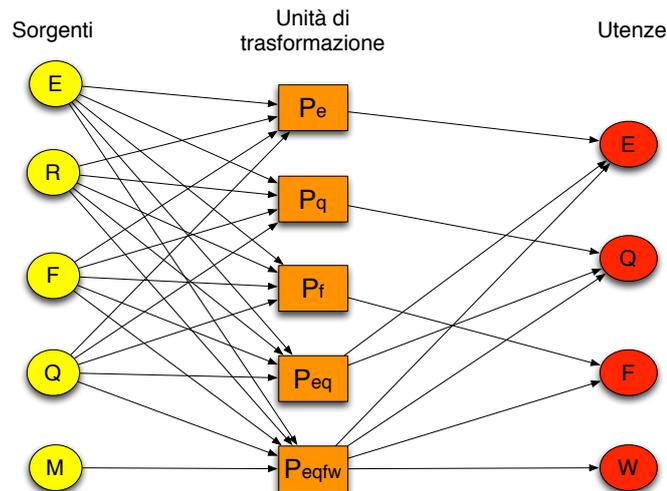
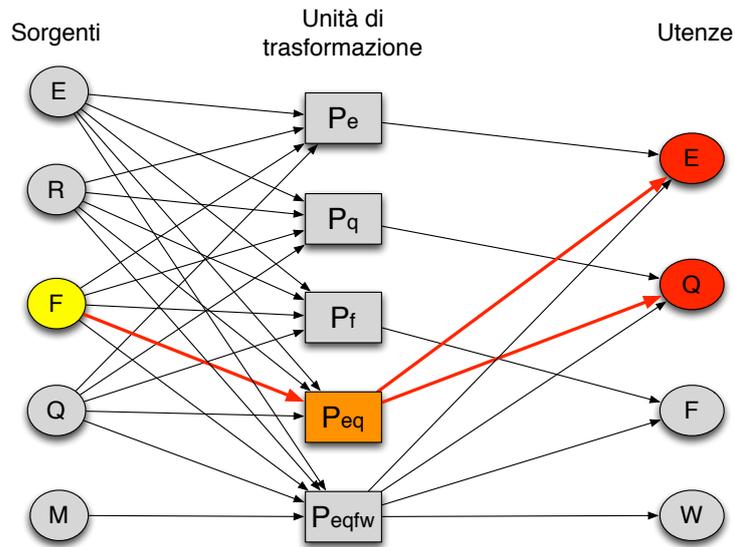


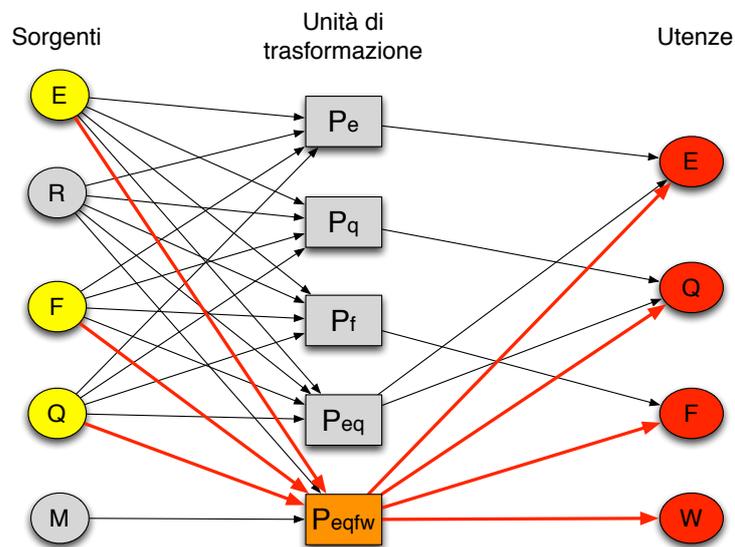
Figura 1.11: Schema della superstruttura semplificata

i collegamenti presenti siano riassunti nella superstruttura. Il primo semplice esempio è rappresentato da un motore a combustione interna cogenerativo J616 GS prodotto dall'azienda Jenbacher. In condizioni nominali tale componente produce una potenza elettrica (flusso E) pari a 2679 kW e una potenza termica (flusso Q) di 2510 kW sfruttando 5967 kW associati alla portata di gas naturale (flusso F). Tale unità identificata con P_{eq} prevede in uscita un collegamento con un'utenza termica ed un'utenza elettrica e in ingresso un collegamento con una sorgente di flussi F . Nella 1.12a si è evidenziata la situazione.

Un esempio più complicato può essere l'impianto per la produzione combinata di zucchero ed etanolo integrato di un sistema CHP. Prescinde dallo scopo di questa tesi analizzare nel dettaglio il funzionamento dell'impianto, per maggior approfondimenti si rimanda a [23]. In parte tale impianto riprende la struttura del caso, analizzato in precedenza, della produzione del bioetanolo. Nell'esempio in questione la canna da zucchero subisce un pri-



(a) Trasformazione di un flusso F in flussi E e Q mediante un impianto cogenerativo



(b) Impianto per la produzione di zucchero ed etanolo nella superstruttura

Figura 1.12: Esempi di traiettorie nella superstruttura

mo trattamento in cui tramite un processo di estrazione si divide il succo zuccherino dalle bagasse. Le bagasse vengono inviate all'impianto CHP, mentre il succo zuccherino in parte verrà destinato alla produzione di zucchero ed in parte alla produzione di etanolo. Sia la parte di succo relativa alla produzione di zucchero sia quella relativa alla produzione di etanolo dovranno prima di tutto subire un processo di purificazione da eventuali composti organici non voluti. Per la produzione di zucchero il succo purificato deve essere prima concentrato mediante un evaporatore multi-effetto e successivamente cristallizzato. Il succo successivamente, per essere trasformato in etanolo, deve subire un iniziale processo di fermentazione a cui seguirà la distillazione. Tali processi sono fortemente energivori basti pensare che per la trasformazione di una portata di 140 kg/s di canna da zucchero in 9,20 kg/s di zucchero e in 4,2 kg/s di etanolo anidro sono necessari 7165 kW di potenza elettrica. Ciò comporta che il sistema debba prevedere in ingresso un flusso di energia elettrica. In parte però tale particolare richiesta dell'unità può venir generata internamente mediante un impianto CHP. Tale impianto è in grado di sfruttare il flusso di bagasse che è presente come scarto della fase di estrazione del succo. La portata di bagasse è circa il 50% della portata di canna da zucchero, e per valorizzarla si possono presentare due strade. La prima utilizza le bagasse opportunamente trattate per alimentare un generatore di vapore che aziona una turbina a vapore a derivazione. La seconda coinvolge un processo più complesso, in cui le bagasse vengono prima gassificate e successivamente utilizzate come combustibile per alimentare un ciclo combinato. Si può quindi ricavare che l'unità in questione P_{efw} presenti in uscita un flusso F , rappresentato dall'etanolo, un flusso W , rappresentato dallo zucchero, un flusso di energia elettrica E e un flusso di calore Q . Va stimato che all'ingresso oltre al flusso F rappresentato dalla canna da zucchero si ha anche un flusso di elettricità E e calore Q . Nella figura 1.12b si è evidenziato il caso in esame.

1.6 Conclusioni

In questo capitolo si è descritta una schematizzazione generale (Superstruttura) che consente di individuare tutte le possibili traiettorie di conversione di massa ed energia in prodotti utili. Questa superstruttura può essere quindi utilizzata efficacemente per descrivere i diversi sistemi di conversione e in particolar modo le interazioni che questi sistemi presentano con l'ambiente esterno. Un sistema di conversione di massa e energia in prodotti utili è composto da una o più unità che possono interagire tra loro, e con ciò che c'è al di fuori dei confini del sistema. Le interazioni sono rappresentate dalle quantità di massa e di energia che vengono scambiate tra un'unità e l'altra, o tra un'unità e l'ambiente. Tali interazioni possono essere descritte in termini di flussi di massa e di energia e quindi come la quantità di massa ed energia che viene scambiata in un secondo tra un componente e l'altro. I flussi sono stati classificati in categorie (vedi par.1.2) in relazione alle caratteristiche comuni che presentano le diverse forme di massa e energia.

Le interazioni del sistema con l'ambiente sono state distinti in funzione di ciò che l'ambiente mette a disposizione al sistema (Sorgenti) e ciò che l'ambiente richiede dal sistema (Utenza). Le diverse sorgenti e utenze sono state distinte in relazione alla categoria di flussi che richiedono o mettono a disposizione. Il sistema di conversione ha il compito di trasformare i flussi di massa e di energia che preleva dall'ambiente in quelli che l'ambiente richiede. Per adempiere a tale compito il sistema si avvale di particolari unità (unità di trasformazione) che hanno la funzione di trasformare una o più forme di energia o massa in energie o masse differenti. Queste unità sono state classificate in relazione al numero e

30 Identificazione di tutte le traiettorie di conversione di fonti energetiche in prodotti utili.

alla categoria di flussi in uscita.

Aver descritto e classificato sia le possibili interazioni tra sistema ed ambiente, sia le possibili unità di trasformazione ha permesso di individuare la superstruttura che include tutte le possibili traiettorie di conversione. Queste traiettorie individuano il percorso che l'energia o la materia devono compiere per passare dalle sorgenti alle utenze mediante il processo di trasformazione, svolto nelle unità di trasformazione. Si è visto in definitiva come le possibili unità di trasformazione possano essere distinte in 15 diversi tipi, come le interazioni possibili tra sorgenti e sistema siano 75 e come le possibili interazioni tra sistema ed utenze siano 32.

La schematizzazione individuata e le considerazioni fatte in questo capitolo saranno molto utili nella fase di modellazione del sistema. Individuare il modello del sistema significa individuare le relazioni matematiche che meglio descrivono la topologia e il funzionamento dello stesso. Come si vedrà nel capitolo 2 conoscere il tipo di interazioni tra sistema e ambiente, e conoscere il tipo di unità che costituiscono il sistema permette di determinare la tipologia di relazioni che descrivono il sistema.

Capitolo 2

Modellazione di Macro-Sistemi

In questo capitolo verrà presentato un approccio semplice per la costruzione di modelli dei Macro-Sistemi. Si analizzeranno le tipologie di relazione necessarie a descrivere il sistema e le sue interazioni con l'ambiente esterno. Si porrà l'attenzione principalmente su modelli zero-dimensionali, essendo tale grado di approssimazione sufficiente per trattare la maggior parte dei problemi legati alla modellazione di sistemi energetici. Verranno approfondite soprattutto le relazioni che descrivono il processo di trasformazione da una forma di energia ad un'altra. Lo scopo di questo capitolo è di individuare il minimo numero e la tipologia di appartenenza delle equazioni necessarie alla costruzione del modello, e per far questo si utilizzerà la schematizzazione dei sistemi introdotta nel capitolo 1.

2.1 Introduzione

Nel capitolo precedente si è descritta la superstruttura che identifica tutte le possibili traiettorie di conversione di fonti energetiche in prodotti utili. Queste traiettorie individuano il percorso che porta la materia e l'energia dalle sorgenti alle utenze passando per le unità di trasformazione. La superstruttura permette in definitiva di individuare interazioni tra ambiente esterno e sistema, e tutte le possibili unità di trasformazione.

Per poter analizzare e ottimizzare un sistema reale è necessario individuare uno strumento che permetta di descriverne le caratteristiche in termini implementabili negli strumenti di analisi e di ottimizzazione. La metodologia più adatta è quindi la costruzione di un modello matematico che rappresenti il sistema in esame. Per la corretta e completa definizione del modello di un sistema è necessario individuare tutte le relazioni matematiche che descrivono i componenti, il loro funzionamento e i collegamenti (reciproci e con l'ambiente esterno). Questa fase rappresenta un punto focale dell'intero processo di analisi, poiché avere un modello non corretto pregiudica l'ottenimento di un risultato esatto. La modellazione dei sistemi energetici è spesso considerata un'arte, e richiede buona pratica e profonda conoscenza dei processi termodinamici, caratteristiche tecnologiche dei sistemi e topologie esistenti. I principi generali della modellazione di sistemi energetici in letteratura sono presentati in [1], [3], [24], [25], [26].

L'obiettivo di questo capitolo è quello di definire, mediante la schematizzazione (superstruttura) introdotta nel capitolo precedente, la tipologia e il numero di relazioni matematiche necessarie e sufficienti alla costruzione del modello di un qualsiasi sistema di conversione di energia. Come si vedrà meglio nel seguito ogni unità e ogni collegamento

è caratterizzato da uno specifico set di equazioni, e quindi una volta noto il layout del sistema è possibile definire con correttezza il numero e il tipo di relazioni matematiche. La scelta della tipologia di modello da adottare (lineare, non lineare, dinamico, ecc) influisce sulle caratteristiche che le relazioni possono o non possono avere (dipendenza dal tempo, moltiplicazioni tra variabili, ecc).

La struttura del capitolo seguirà il filo logico del capitolo precedente. Nei seguenti due paragrafi verranno forniti i concetti e gli strumenti di base per la fase di modellazione. Nel paragrafo 2.3 si analizzeranno le equazioni che descrivono le interazioni con l'ambiente. Esse sono rappresentate da equazioni di congruenza tra i flussi che escono dal sistema e quelli che richiede l'utenza e, analogamente, tra i flussi che entrano nel sistema e quelli che sono prelevati dalle sorgenti. Il comportamento del sistema è fortemente influenzato dalla tipologia di componenti in esso presenti. Nel paragrafo 2.4 si concentrerà l'attenzione sulle unità di trasformazione, e sulle relazioni necessarie per descriverle. Esse, oltre a dover verificare il principio di conservazione della massa e il bilancio di energia, necessitano di equazioni per descrivere le relazioni tra flussi in ingresso e in uscita. Tali relazioni sono espresse dalle curve caratteristiche. La definizione delle curve caratteristiche è un processo molto complicato, poiché in generale esse non vengono rilasciate dai costruttori delle unità, e quindi devono essere ricavate sperimentalmente o tramite delle simulazioni. Nell'ultima sottosezione verrà analizzato un macrosistema di poligenerazione per dimostrare come il numero e le tipologie di appartenenza delle equazioni siano realmente quelle necessarie alla definizione completa del modello del sistema.

2.2 Il modello di un sistema

Il modello di un sistema è il set di relazioni matematiche (ed eventualmente tabulari o grafiche) che definiscono tutte le interdipendenze tra le quantità, necessarie a riprodurre, con il desiderato grado di approssimazione, il comportamento del sistema reale, e che vincolano queste quantità ad assumere valori accettabili [26].

Per la modellazione del sistema i passi fondamentali sono sostanzialmente due: individuare la tipologia e il numero di relazioni matematiche necessarie alla sua definizione e scegliere le variabili indipendenti. Le equazioni che caratterizzano un sistema, come si vedrà meglio nel seguito, sono rappresentate da quattro diverse categorie:

- Bilanci di massa: rappresentano l'espressione matematica del principio di conservazione della massa.
- Bilanci di energia: definiscono in forma matematica il primo principio della termodinamica.
- Curve caratteristiche: (chiamate in seguito "mappe caratteristiche" in analogia con le mappe utilizzate per definire i punti di lavoro delle turbomacchine, in quanto sono analoghe le informazioni in esse contenute), cioè le funzioni di trasferimento che relazione i flussi in ingresso con i flussi in uscita da un componente.
- Equazioni ausiliarie: rappresentano un set d'informazioni e relazioni di diverso genere. Possono essere utilizzate per esprimere aspetti che non sono descrivibili mediante le tipologie di equazioni precedenti (ad esempio aspetti economici o ambientali), per

delineare particolari vincoli e/o operazioni (rampe di carico, conteggi delle accensioni), per semplificare il problema (tecniche di Glover), per esprimere relazioni tra parametri di stato (nel caso in cui il grado di dettaglio richiesto lo esiga).

Ogni unità e collegamento può essere caratterizzato da una o più relazioni appartenenti ad una o più delle categorie sopracitate. Come si vedrà meglio nel paragrafo 2.1.2 esistono molti tipi di modelli, ed ognuna di esse definisce le caratteristiche che possono o non possono avere le equazioni. Ad esempio, se si è deciso di costruire un modello non stazionario, utile nel caso in cui si voglia studiare il comportamento durante i transitori del sistema, si avranno delle equazioni differenziali nella variabile tempo, mentre se il modello è stazionario includerà invece esclusivamente equazioni algebriche. Il tipo di modello non influisce però sulla tipologia di appartenenza delle singole relazioni: se la presenza di una particolare unità richiede che sia definito un bilancio di energia, nel modello dovrà comparire quello specifico bilancio di energia; a seconda poi del tipo di modello, quel bilancio potrà essere espresso da relazioni con diverse caratteristiche: lineari, non lineari, in funzione del tempo, o in funzione di parametri di stato ecc. Il modello di un sistema energetico può essere descritto nella seguente forma:

$$F'(y) = 0 \quad (2.1)$$

dove F' è il vettore di tutte le m equazioni del modello e y è il vettore di tutte le quantità del modello. Alcune delle quantità y del modello nella (2.1) sono opportunamente fissate a parametro, le rimanenti possono variare e sono generalmente chiamate variabili. Indicando con x il vettore delle variabili, la forma generale del modello (2.1) diventa:

$$F(x) = 0 \quad (2.2)$$

Tipicamente le variabili x che compaiono nei modelli di sistemi energetici possono essere reali, intere e/o complesse. Le variabili costituenti il vettore x del modello (2.2) possono essere suddivise in variabili indipendenti e variabili dipendenti in relazione alla loro funzione nella risoluzione del modello. Se il numero di equazioni che compongono il modello del sistema è m e il numero totale di variabili è n (con $n > m$), il numero di variabili indipendenti è $n - m$. Quando le variabili indipendenti sono fissate ad un valore specifico, è possibile risolvere il modello e calcolare tutte le variabili dipendenti.

Fissare un set di valori a tutte le variabili indipendenti corrisponde a eseguire una simulazione del modello. Assegnare set multipli di valori a tutte le variabili indipendenti, nei quali il valore di una o più variabili è variato con intervalli discreti all'interno di un dato range, corrisponde a eseguire un'analisi di sensitività in accordo con queste variabili. Ricercare il set di valori delle variabili che massimizza o minimizza una o più specifiche quantità (definite funzione obiettivo o multi-obiettivo) corrisponde ad un'esecuzione di un'ottimizzazione. Il numero delle variabili indipendenti è fissato ($n - m$), resta quindi da definire quali tra le n variabili totali possano essere considerate indipendenti e di conseguenza quali dipendenti. La scelta è influenzata da vari fattori [24] quali: influenza di una particolare variabile sul sistema, grado di dettaglio, ma soprattutto in relazione alla tipologia di analisi da effettuare. Per i sistemi energetici analisi tipiche sono:

- Analisi di Design: dove solitamente si vuol valutare il valore delle variabili che definiscono le dimensioni del sistema.
- Analisi di Off-Design: dove solitamente si vuol valutare il valore delle variabili che definiscono il funzionamento del sistema.

2.2.1 Concetti preliminari e assunzione utilizzate nella fase di modellazione

Prima di focalizzare l'attenzione su come s'identifica la struttura del modello di un sistema energetico è opportuno analizzare le scelte fatte in fase preliminare. Tali scelte, infatti, influenzano la decisione sulla tipologia di modello più adatta a descrivere il sistema in esame. Nei sistemi energetici di solito viene applicato l'approccio dinamico modulare che porta a considerare l'intero sistema come il risultato di interconnessioni tra diversi componenti. Il modello matematico può quindi essere effettuato identificando i relativi componenti e sottosistemi e collegandoli correttamente per mezzo di segnali che nel caso dei sistemi di conversione rappresentano i flussi di energia o i flusso di massa. Il modello è quindi una struttura modulare, e l'approccio utilizzato permette di realizzare un modello "basato sui componenti", dove ogni componente principale del sistema è matematicamente modellato e integrato con l'altro per simulare il comportamento del sistema. Un componente può essere rappresentato come nella 2.1 dove $I(t)$ rappresento il vettore delle variabili in input, O il vettore delle variabili in uscita D un vettore di informazioni e X il vettore delle variabili di stato [27].

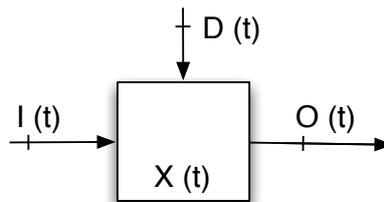


Figura 2.1: Rappresentazione generale di un componente in modello "basato sui componenti"

In letteratura non esiste una classificazione dei modelli univoca per i sistemi energetici. Viene qui riproposta la schematizzazione utilizzata in [27]. La distinzione dei diversi modelli è effettuata considerando le caratteristiche principali degli stessi:

- Esistenza di parametri di stato: la presenza di variabili di stato solitamente è caratterizzata dall'esistenza di un set di equazioni differenziali (espresse in termini di derivate rispetto al tempo delle variabili di stato X). L'esistenza delle derivate delle variabili di stato in funzione del tempo permette di determinare il valore delle variabili di output come una funzione delle variabili di input e del valore delle variabili di stato all'istante iniziale. Se non si ha la presenza delle variabili di stato il vettore di output al tempo t $O(t)$ dipende esclusivamente dal valore delle variabili di input $I(t)$ allo stesso istante.
- Dipendenza dal tempo: distingue i modelli stazionari dai modelli dinamici. Detta Ω una generica proprietà, nei sistemi dinamici $\partial\Omega/\partial t \neq 0$ mentre nei sistemi stazionari $\partial\Omega/\partial t = 0$. Ciò comporta che in un sistema stazionario ogni configurazione del sistema in un determinato istante temporale non sia influenzata da quello che è successo negli istanti precedenti. Viceversa nei modelli dinamici ciò che avviene in uno specifico istante temporale è influenzato dagli istanti precedenti ed influenza gli istanti successivi.

- Dipendenza dalla geometria: quando ci si riferisce allo stato fisico del sistema e in particolare alle variabili di stato si possono avere variazioni delle proprietà in relazione alle tre dimensioni. Si possono distinguere sistemi 3D, 2D, 1D, 0D a seconda del numero di dimensioni in cui le proprietà variano. Nei sistemi 0D non si ha dipendenza geometrica.
- Tipo di correlazione matematiche adottate: distinzioni in white box e black box. Quando si utilizza un approccio a white box vengono adoperate correlazioni tra le variabili derivanti da una descrizione completa e rigorosa dei fenomeni fisici che si presentano. Nell'approccio a black box la descrizione del fenomeno fisico è limitata, si esprimono le relazioni tra ingressi ed uscite senza analizzare nel dettaglio il fenomeno che porta alla definizione delle stesse. In molti casi il rapporto tra I e O è ricavato da relazioni empiriche o dai risultati di altri modelli.

Si ricorda, come detto nel capitolo precedente, che nella trattazione si è scelto di far coincidere i componenti (le unità di trasformazione) del sistema con gli impianti di produzione. Nell'analisi si effettuano le seguenti considerazioni per determinare la tipologia di modello:

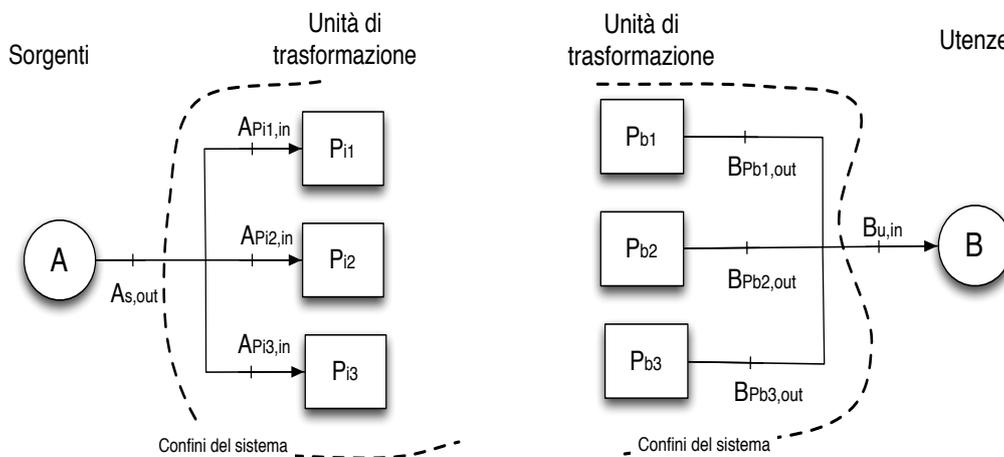
- Assenza di parametri di stato: il grado di dettaglio che solitamente si assume è tale da permettere di trascurare l'analisi termodinamica delle proprietà della materia. Ciò comporta una notevole semplificazione del modello in quanto consente di esprimere gli output in relazione al valore degli input nello stesso istante. Verranno comunque citati alcuni esempi in cui l'utilizzo delle variabili di stato è fondamentale per il corretto studio del sistema.
- Nei sistemi energetici i fenomeni che danno dinamicità sono sostanzialmente due: l'inerzia dei componenti e la presenza di componenti di accumulo. L'inerzia è un fenomeno che porta il sistema a non rispondere in maniera istantanea ad una determinata sollecitazione ricevuta. L'accumulo per ora verrà trascurato in quanto si analizzerà nel dettaglio nel capitolo 4.
- La dipendenza geometrica solitamente è trascurata come diretta conseguenza dell'esclusione dei parametri di stato dall'analisi. Per il grado di dettaglio scelto i fenomeni geometrici assumono scarsa rilevanza, poiché non si ha la presenza di variabili influenzate da una specifica direzione geometrica. Si utilizzerà sempre i modelli 0D.
- Si utilizzerà il modello a black box poiché l'analisi accurata del funzionamento dei componenti del sistema è lasciata a studi che presentino un grado di dettaglio maggiore. In molti casi si utilizzeranno i dati ricavati da tali analisi per descrivere le relazioni tra variabili in ingresso e in uscita.

Le variabili di maggior interesse, a questo punto della trattazione, sono quelle che identificano i collegamenti tra sistema e ambiente e quelli interni al sistema. Tali variabili rappresentano i flussi di energia e materia tratti nel capitolo precedente. Le variabili saranno rispettivamente la potenza e la portata scambiata in un collegamento. Il vettore di variabili I potrà essere identificato come il set di flussi che un componente presenta in ingresso mentre il vettore O sarà il corrispettivo per i flussi in uscita.

2.3 Modellazione delle interazioni tra sistema di conversione e ambiente esterno

Come si è visto nel capitolo 1 l'ambiente e il sistema non sono due unità indipendenti tra di loro ma hanno la possibilità di interagire. Tali interazioni sono rappresentate dagli scambi di flussi di energie e/o di materia. Si è inoltre visto come tali interazioni possano essere distinte in due sezioni: da una parte i flussi che il sistema preleva dalle sorgenti e che quindi identificano un ingresso per il sistema, dall'altra i flussi che il sistema cede alle utenze e che quindi identificano un'uscita per il sistema.

Tipologia di relazioni matematiche



(a) Interazioni tra una generica sorgente A e il sistema di conversione

(b) Interazione tra il sistema di conversione e una generica utenza B

Figura 2.2: Generiche interazioni tra sistema ed ambiente esterno

La modellazione delle interazioni tra sistema e ambiente risulta particolarmente agevole. Le equazioni che descrivono tali interazioni sono rappresentate dai bilanci di energia o massa che coinvolgono i flussi. Nella figura 2.2 sono rappresentate due possibili interazioni tra sistema ed ambiente.

Interazioni Ambiente → Sistema

In figura 2.2a sono visibili le interazioni tra un sorgente di flussi A (con A che identifica una generica CATEGORIA, vedi par 1.2) e il sistema di conversione, e in particolare modo con tre unità di trasformazione. Queste interazioni sono descritte dal bilancio dei flussi:

$$A_{s,out}(t) = \sum_{j=1}^3 A_{P_{ij},in}(t) \quad (2.3)$$

L'equazione 2.3 identifica un bilancio di energia se il flusso A rappresenta un flusso di energia, mentre identifica un bilancio di massa nel caso in cui il flusso A rappresenti un flusso di massa. Il flusso prelevato dalla generica sorgente A alimenta le generiche unità P_{i1} , P_{i2} , P_{i3} . Il bilancio dei flussi esprime l'uguaglianza tra il flusso prelevato dalle sorgenti e la sommatoria dei flussi che collegano la generica utenza alle unità. Se ora si passa al caso generale l'equazione che descrive per ogni sorgente la sua interazione con il sistema è

espressa dalla:

$$A_{s,out}(t) = \sum_{j=1}^n A_{P_{ij},in}(t) \quad (2.4)$$

Dove A identifica la generica sorgente, $A_{s,out}$ il flusso prelevato dalla sorgente A , $A_{P_{ij},in}$ rappresenta il flusso A che è in ingresso alla j -esima unità di trasformazione e n identifica il numero totale delle unità che è collegata alla sorgente A

Interazioni Sistema \rightarrow Ambiente

In figura 2.2b sono visibili le interazioni tra il sistema di conversione, e in particolar tra tre unità di trasformazione e un'utenza di flussi B (con B che identifica una generica CATEGORIA, vedi par 1.2) . Queste interazioni sono descritte dal bilancio dei flussi:

$$\sum_{j=1}^3 B_{P_{bj},out}(t) = B_{u,in}(t) \quad (2.5)$$

L'equazioni 2.5, come detto in precedenza, identifica un bilancio di energia se il flusso B rappresenta un flusso di energia, mentre identifica un bilancio di massa nel caso in cui il flusso B rappresenti un flusso di massa. I flussi in uscita dalle generiche unità P_{i1}, P_{i2}, P_{i3} sono collegati all'utenza B . Il bilancio dei flussi esprime l'uguaglianza tra la sommatoria dei flussi in uscita dalle generiche unità di trasformazione e il flusso inviato all'utenza. Se ora si passa al caso generale l'equazione che descrive per ogni utenza la sua interazione con il sistema è espressa dalla:

$$\sum_{j=1}^m B_{P_{bj},out}(t) = B_{u,in}(t) \quad (2.6)$$

Dove B identifica la generica utenza, $B_{u,in}$ il flusso in ingresso all'utenza, $B_{P_{bj},out}$ rappresenta il flusso B che è in uscita dalla j -esima unità di trasformazione e m identifica il numero totale delle unità che è collegata alla utenza B

Numero di relazioni matematiche

Una volta individuata la tipologia di relazione che descrivono le interazioni tra ambiente e sistema è necessario individuare il numero di tali relazioni. Il numero dipende dal numero di interazioni che il sistema presenta con l'ambiente. Infatti per ogni sorgente che interagisce con il sistema sarà richiesta un'equazione del tipo 2.4, allo stesso modo per ogni utenza che è collegata al sistema sarà richiesta un'equazione del tipo 2.6.

Per modellare correttamente le interazioni tra l'ambiente e il sistema è necessario quindi:

- Individuare con precisione quante e quali interazione l'ambiente presenta con i componenti del sistema. In particolar modo determinare quali e quante sorgenti e utenze interagiscano con il sistema, e a quali unità di trasformazione siano collegate. Per svolgere questa fase si può sfruttare la superstruttura che permette di individuare i possibili collegamenti, figura 1.9. Nell'analisi n_s identificherà il numero di sorgenti che interagiscono con il sistema, mentre n_u il numero di utenze.
- Una volta noti i flussi e i collegamenti si esprime per ogni sorgente un'equazione di bilancio del tipo 2.4 e per ogni utenza un'equazione di bilancio de tipo 2.6. In cui

all'interno dei termini di sommatoria devono essere inseriti i flussi che identificano i collegamenti delle unità del sistema con quella specifica utenza o sorgente.

Se ad esempio si analizza l'unità base, figura 1.10, si può vedere come per descrivere le sue interazioni con l'ambiente siano richieste 5 equazioni 2.4 lato risorse e 4 equazioni 2.6 lato utenze. Questo poiché l'unità base prevede tutti i possibili collegamenti con le sorgenti e con le utenze.

Nel modellare le interazioni tra ambiente esterno e sistema solitamente non sono sufficienti i bilanci di massa ed energia. Si necessita infatti di ulteriori relazioni che esprimono il campo di esistenza per le variabili (i flussi). Queste relazioni, definiti vincoli, fanno parte delle equazioni ausiliari. I vincoli di esistenza, ovviamente, non caratterizzano solo i flussi che vengono scambiate tra il sistema e l'ambiente, ma in generale tutti i flussi presenti nel sistema. Per questo motivo le considerazioni che verranno fatte nel seguito sono da ritenersi valide per tutti i flussi.

Descrivere tutti i vincoli che i diversi flussi possono presentare richiederebbe una trattazione molto lunga. Poiché tali vincoli possono limitare sia la potenza che la portata di un flusso, l'energia o la massa scambiata in un determinato intervallo di tempo, ma anche possono riguardare le caratteristiche del flusso. Quindi si può facilmente capire come i possibili vincoli siano in numero elevato. I limiti possono derivare da aspetti tecnologici (le tubazioni di alimento del combustibile), normativi (i contratti con i gestori della rete elettrica), naturali (disponibilità istantanea di una certa fonte), ecc.

Come detto nel paragrafo 1.3.2 e 1.3.3 un fattore importante nello studio dei sistemi è conoscere l'andamento temporale e le caratteristiche dei flussi che l'ambiente rende fruibili o richiede al/dal sistema. I vincoli in questa fase vengono utilizzati proprio per descrivere le caratteristiche di quei flussi. Per quanto riguarda le sorgenti i vincoli solitamente stabiliscono la massima potenza e/o portata (cioè il massimo flusso di energia e/o di massa) che il sistema può prelevare dall'ambiente. In termini matematici questi vincoli sono rappresentati da:

$$A_{s,out}(t) \leq A_{max}(t) \quad (2.7)$$

Si può osservare come la massima potenza o portata sfruttabile non è detto sia costante in funzione del tempo. Un esempio chiarificatore potrebbe essere il confronto tra una portata di metano prelevata dalla rete di distribuzione (flusso F) e la radiazione solare incidente su di una superficie (flusso R). Le dimensioni della tubazioni di adduzione e la pressione interna ad essa vincolano la quantità massima di portata di combustibile prelevabile; e di conseguenza il flusso di energia a cui essa è associata. È presumibile che le dimensioni e la pressione rimangano costanti in fase d'esercizio, a meno di variazioni trascurabili, e ciò identifica quindi il valore A_{max} costante. Nel caso della radiazione solare la massima potenza estraibile dall'ambiente dipende dalle condizioni di insolazione della superficie e quindi: angolo di incidenza, condizione atmosferiche, indice di riflessione del terreno. Tutti questi aspetti variano fortemente in funzione del tempo e per questo anche il valore $A_{max}(t)$ sarà dipendente dal tempo. Altri vincoli che molto spesso si incontrano per ciò che concerne le sorgenti riguardano la massima quantità di energia sfruttabile in un arco di tempo ben definito. In questo caso i vincoli possono essere espressi da:

$$\int_{\Delta t} A_{s,out}(t) \cdot dt \leq U_{max}(t) \quad (2.8)$$

Dove $U(t)_{max}$ rappresenta l'energia massima estraibile nell'intervallo Δt . Ovviamente considerazioni analoghe possono essere fatte in termini di portata e massa. Un classico esempio potrebbe essere la raccolta annuale di biomassa. In un anno, infatti si ha una quantità definita di biomassa da poter sfruttare. Tale quantità dipende dal bacino di raccolta, dal tasso di crescita delle piante, dalle normative vigenti, ecc. Si possono avere anche vincoli sulle minime quantità di energia e potenza interscambiabili tra ambiente e sistema. A livello di modello cambierà esclusivamente il simbolo della disequaglianza. Per quanto riguarda le utenze, i vincoli espressi sono simili a quelli relativi alle sorgenti. In particolare si possono considerare le utenze che non richiedono un valore specifico per il flusso, ma ne limitino solo il valore minimo o massimo. In questo caso le relazioni matematiche saranno espresse dalla 2.7, in cui l'operatore di disuguaglianza sarà opportunamente posizionato. Anche per ciò che concerne le utenze è possibile incontrare dei vincoli del tipo 2.8 in cui si limitino le quantità massime o minime di energia da fornire all'utenza in uno specifico arco temporale.

Nel paragrafo 1.3.1 si è affermato che le uscite del sistema che non fanno parte delle richieste possono essere accumulate a delle utenze soggette a particolari vincoli. In fase di modellazione è possibile esprimere tali vincoli come $B_{u,in}(t) \geq 0$. In pratica si impone che il flusso in uscita debba essere in ogni istante di tempo maggiore o uguale a zero; il valore effettivo del flusso sarà determinato quindi esclusivamente dalle scelte fatte in fase di progettazione e gestione del sistema. In alcuni casi è anche possibile che tale limite sia combinato con un vincolo 2.7 che fissi il valore massimo del flusso. Un caso tipico è rappresentato dal collegamento alla rete di distribuzione elettrica. Spesso, infatti, la massima potenza di immissione in rete è limitata in relazione alla capacità dei nodi.

Per il grado di dettaglio scelto in questa trattazione non saranno quasi mai considerate le caratteristiche dei flussi. L'analisi si limiterà ad esaminare la loro categoria di appartenenza e il loro andamento temporale. Nei sistemi reali, comunque, molto spesso si incontrano vincoli sulle caratteristiche dei flussi. Tipici vincoli sono ad esempio il livello di temperatura che richiede una specifica utenza, o dall'altra parte il livello di temperatura che rende fruibile una specifica sorgenti; ma anche le caratteristiche che deve possedere un combustibile per soddisfare un utenza (potere calorifero, densità, viscosità, ecc.). Tutti questi vincoli possono essere modellati mediante una relazione del tipo 2.7:

$$\phi_{min}(t) \leq \phi_A(t) \leq \phi_{max}(t) \quad (2.9)$$

in cui ϕ_A rappresenta una generica caratteristica del flusso A (ad esempio temperatura, pressione, entalpia, densità), mentre ϕ_{max} e ϕ_{min} identificano i limiti.

Esempio

Le equazioni di congruenza che caratterizzano gli scambi tra sistema e ambiente possono essere ben osservate nell'esempio che segue. Tramite il software GAMS si è voluto studiare un sistema atto a soddisfare una particolare utenza elettrica ($n_u = 1$). L'obiettivo dell'analisi è stato quello di definire la topologia del sistema, definendo taglia e numero ottimali degli impianti per sopperire alla richiesta dell'utenza. Si è qui fatta un'analisi congiunta di design e off-design (concetto che verrà trattato nel capitolo 3) in cui si è ottimizzato oltre alla topologia del sistema anche il suo funzionamento.

L'utenza richiede un flusso di energia elettrica $E_{u,in}$, in che può essere descritto dalla curva di carico in 2.3a.

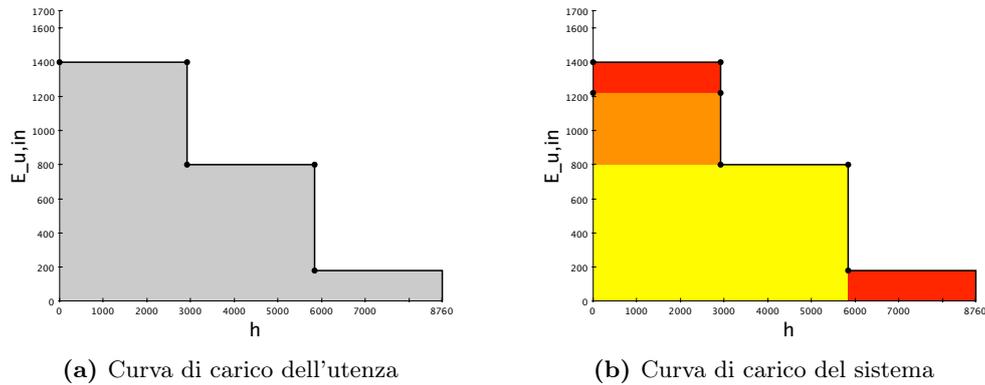


Figura 2.3: Curve di carico

Tabella 2.1: Parametri specifici per le diverse tipologie

| Tipologia | m_{Pe} | c_{Pe} | η_n | Range [kW] |
|-----------|----------|----------|----------|------------|
| 1 | 2,26 | 0,3 | 0,39 | 1000-400 |
| 2 | 2,48 | 0,313 | 0,35 | 250-125 |

Come si può facilmente vedere l'andamento di tale curva presenta 3 "gradoni"; e ciò fa intuire come la soluzione ottimale possa essere una configurazione modulare. Nell'implementazione per non considerare tutta la curva di durata, e di conseguenza 8760 valori di $E_{u,in}$, si è assunto un giorno tipo di 24h diviso in 3 intervalli temporali di 8h ciascuno. Ciò è stato possibile ipotizzando di trascurare i fenomeni di inerzia del sistema, in particolare modo le rampe di carico o i transitori in accensione e spegnimento per gli impianti. Sotto questa ipotesi si è potuto considerare il modello del sistema stazionario, in quanto non vi sono fattori o condizioni che legano gli avvenimenti di uno specifico istante temporale a quelli degli istanti precedenti o successivi. Questo permette di trascurare l'ordine cronologico delle richieste, e di poter semplificare l'analisi considerando solo il giorno tipo, moltiplicando successivamente i valori così ottenuti per 365 (giorni in un anno). La semplificazione non influenza il problema e dunque la soluzione ottimale sarà sempre la medesima.

Per sopporre all'utenza elettrica si è assunto di poter scegliere tra due differenti tipologie di motori a combustione interna alimentati a gas naturale. Le tipologie sono state distinte in relazione alla taglia. La tipologia 1 considera motori di taglia grande (400-1000 kW) mentre la categoria 2 considera motori di taglia media (250-125 kW). Si è fatta l'ipotesi che all'interno della stessa categoria il funzionamento dei motori sia simile: il valore del rendimento alla potenza nominale e la variazione di tale rendimento ai carichi parziali sia la stessa per tutte le differenti taglie presenti in una stessa categoria. Quest'ipotesi è abbastanza restrittiva in quanto nella pratica è sì vero che motori di taglie simili, e che presentano le stesse specifiche tecniche, possono avere un funzionamento simile; ma solitamente il range di taglie entro cui tale ipotesi è ritenuta valida risulta minore. In realtà lo scopo di questo esempio non è lo studio di un caso reale ma soltanto mostrare le interazioni tra ambiente e sistema. Le specifiche per le diverse tipologie sono descritti in tabella 2.1.

I parametri m_{pe} e c_{pe} sono relativi alla linearizzazione delle curve caratteristiche delle

unità, concetto che verrà introdotto nel paragrafo 2.4. Per ora ci si limita a dire che sono dei fattori che descrivono il comportamento delle unità ai carichi parziali.

Lo scopo di questa analisi è di definire la topologia, numero e taglia che permettano di

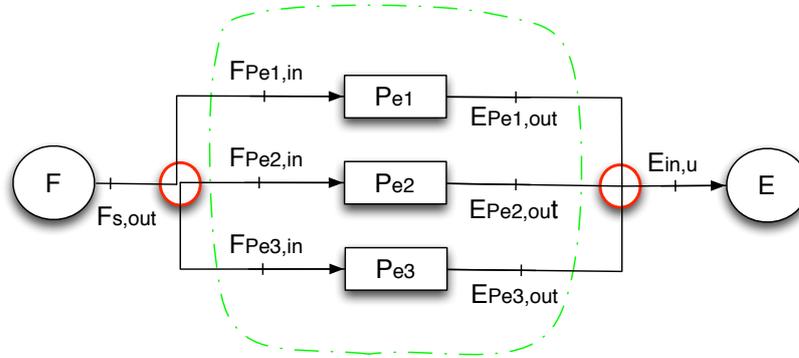


Figura 2.4: Schema del sistema ottimizzato

soddisfare in ogni istante l'utenza minimizzando il costo totale (costo di funzionamento sommato al costo di installazione delle unità). Per svolgere tale studio si sono dovuti introdurre dei parametri e delle funzioni che considerano i costi dell'impianto. Il costo del combustibile è stato preso pari a 0.4 €/kg. Mentre i costi d'installazione sono stati assunti pari ad $c_{s,Pe,i,1} = 950$ €/kW per la categoria 1 e $c_{s,Pe,i,2} = 1200$ €/kW per la categoria 2. Il costo di ammortamento annuo è stato calcolato in funzione di una vita utile di 20 anni ed considerando un tasso di sconto reale $I = 0,1$:

$$a_{Pe,i} = c_{s,Pe,i} \cdot \frac{I + (I + 1)^n}{(I + 1)^n - 1} \quad (2.10)$$

L'ottimizzazione della topologia è legata alla funzione obiettivo, concetto analizzato nel capitolo 3, in questo esempio la funzione obiettivo da ottimizzare rappresenta il costo totale ed è espresso dalla:

$$c = 365 \cdot 3600 \cdot c_{mf} \cdot \sum_t \sum_i m_{f(Pe,i)}(t) + \sum_i a_{Pe,i} \cdot taglia_{Pe,i} \quad (2.11)$$

I risultati di tale ottimizzazione hanno condotto, come si poteva facilmente intuire, alla scelta di tre motori :

- P_{e1} Motore tipologia 1 di potenza nominale pari a 800 kW colore giallo
- P_{e2} Motore tipologia 1 di potenza nominale pari a 420 kW colore arancione
- P_{e3} Motore tipologia 2 di potenza nominale pari a 180 kW colore rosso.

Nel diagramma 2.3a si può vedere le ore di funzionamento per i differenti tipi di motore in relazione alla curva di durata.

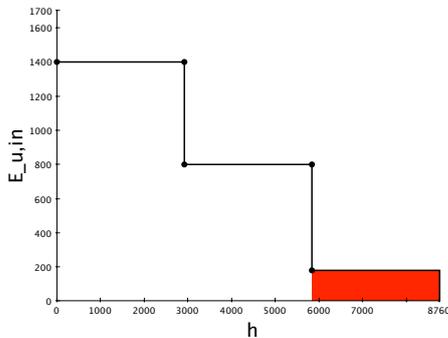
Nello schema 2.4 è rappresentato il sistema finale in cui si sono evidenziati i collegamenti tra ambiente e sistema. Sono presenti $n_s = 1$ sorgenti e $n_u = 1$ utenze. Per cui,

come precedentemente visto nella trattazione, per descrivere le interazioni sono richieste 1 bilancio del tipo 2.4 per la sorgente e 1 bilancio del tipo 2.6 per l'utenza.

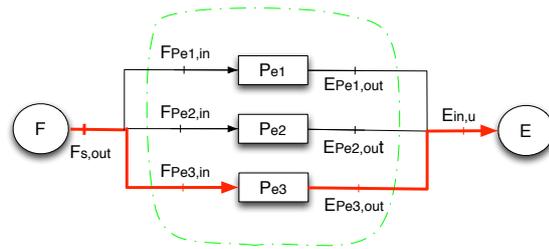
$$\text{Bilancio Sorgente-Sistema:} \quad F_{s,out}(t) = F_{Peq1,in}(t) + F_{Peq2,in}(t) + F_{Peq3,in}(t) \quad (2.12)$$

$$\text{Bilancio Sistema-Utenza:} \quad E_{Peq1,out}(t) + E_{Peq2,out}(t) + E_{Peq3,out}(t) = E_{u,in}(t) \quad (2.13)$$

Ovviamente tali relazioni hanno validità generale per ogni istante di tempo, ma temporalmente il valore dei flussi sarà diverso. Ad esempio qualora venisse richiesta la potenza minima sarà in funzione solo P_{e3} per cui le equazioni considereranno solo il flusso $F_{pe3,in}$ e $E_{pe3,out}$. Tale situazione può essere vista nello schema in 2.5a e 2.5b in cui si sono evidenziati i collegamenti attivi, cioè in cui il flusso è diverso da zero. Il caso in cui sia richiesto la potenza di 800 kW è del tutto analogo, eccezione fatta per l'impianto in questione che in questo caso sarà P_{e2} .



(a) Carico dell'unità P_{e3}



(b) Flussi attivi nel funzionamento dell'unità P_{e3}

2.4 Modellazione delle unità del sistema di conversione e delle interazioni tra unità

Una volta analizzate la tipologia d'interazioni tra sistema e ambiente si pone l'attenzione sui componenti del sistema. Nel capitolo 1 sono state introdotte le unità di trasformazione, ma esse non sono le uniche sottosezioni che un sistema presenta. All'interno dei confini del sistema, infatti, si possono trovare:

- Unità di trasformazione: componenti che hanno il compito di trasformare uno o più flussi in flussi aventi categoria o caratteristiche differenti (vedi par 1.2).
- Unità di accumulo: componenti che hanno la possibilità di accumulare flussi al proprio interno
- Collegamenti: esprimono le reciproche interazioni tra i vari componenti del sistema.

Le unità di accumulo per ora verranno trascurate, poiché saranno trattate nel dettaglio nel capitolo 4.

2.4.1 Collegamenti

I collegamenti rappresentano le interazioni reciproche tra le diverse unità all'interno del sistema. Tali interazioni, analogamente alle interazioni tra ambiente e sistema, identificano lo scambio di massa ed energia tra due o più componenti all'interno del sistema; esse possono essere descritte in termini di flussi di massa e di energia.

Numero e Tipologia di relazioni matematiche

Per quanto concerne la modellazione dei collegamenti si può fare un discorso analogo a quanto detto riguardo alle interconnessioni ambiente-sistema. Ogni interazione tra un'unità e l'altra sarà descritta da un bilancio di massa o di energia a seconda dei diversi flussi coinvolti. Per semplicità però i bilanci relativi alle connessioni in cui il flusso in uscita da un'unità interagisce esclusivamente con l'unità successiva, possono essere trascurati dall'analisi. Questo è permesso qualora venga assegnata la stessa variabile di flusso sia al flusso in uscita che a quello in ingresso, in modo tale che l'assegnazione verifichi il bilancio.

Quindi per la modellazione dei collegamenti è necessario esprimere esclusivamente i bilanci relativi ai "nodi". I nodi rappresentano dei punti, interni al sistema di conversione, in cui collimano e/o da cui si dipartono più flussi che presentano la stessa CATEGORIA di appartenenza e le stesse caratteristiche, figura 2.5. Per un generico nodo si possono distinguere n flussi in ingresso e m flussi in uscita. Ovviamente il caso particolare in cui $n=m=1$ rappresenta un collegamento diretto. Un ipotetico nodo è presentato in 2.5.

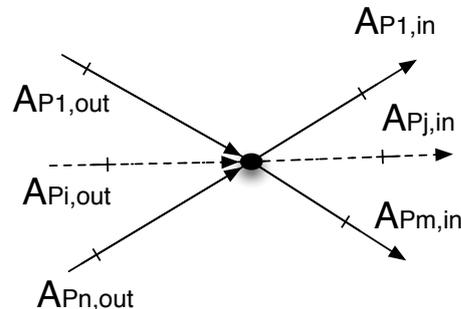


Figura 2.5: Schema di un generico nodo del sistema

Per un generico nodo che possiede n flussi in ingresso e m flussi in uscita l'espressione del bilancio sarà :

$$\sum_{i=1}^n A_{P_i,out}(t) = \sum_{j=1}^m A_{P_j,in}(t) \quad (2.14)$$

Dove $A_{P_i,out}$ rappresenta il generico flusso di massa o di energia in ingresso ad un nodo, proveniente dall'unità P_i . Mentre $A_{P_j,in}$ identifica il generico flusso di massa o di energia in uscita da un nodo, che è in ingresso all'unità P_j .

Per come è stata sviluppata questa analisi la somma di due flussi può avvenire all'esterno di unità di trasformazione, e quindi in un nodo, esclusivamente nel caso in cui quei flussi appartengano alla stessa categoria abbiano le stesse caratteristiche. Componenti quali mixer o miscelatori vengono considerati come unità di trasformazione, in quanto trasformano

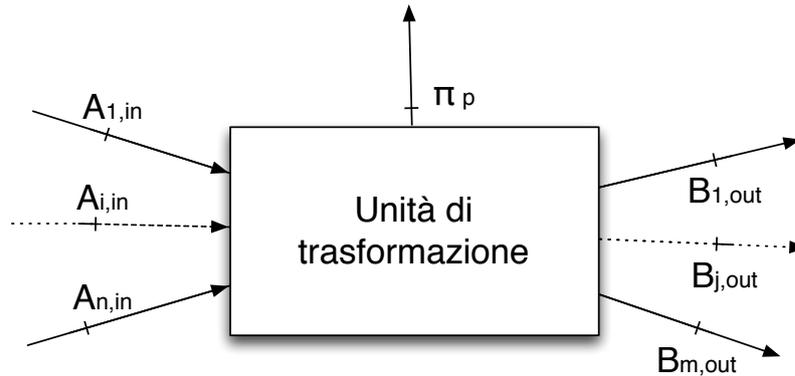


Figura 2.7: Generica unità di trasformazione con n flussi in ingresso e m flussi in uscita

CATEGORIA di flussi in uscita.

Il flusso identificato dal simbolo π_p individua il flusso di perdita per l'unità. Inoltre si identifica con Ma e U rispettivamente la massa e l'energia contenute all'interno dell'unità. In definitiva si può dire che l'unità interagisce con k flussi con $k = n + m$ e con un flusso di perdita.

Numero e Tipologia di relazioni matematiche

La modellazione di ogni unità di trasformazione comporta la definizione delle seguenti tipologie e numero di equazioni:

- *Un bilancio dei Flussi:* esso rappresenterà un bilancio di massa nei casi in cui i flussi identifichino dei flussi di massa, oppure un bilancio di energia se viceversa i flussi sono flussi di energia. Nel caso in cui l'unità interagisca sia con flussi di energia che con flussi di massa saranno richiesti entrambi i bilanci.
- *(k-1) Mappe caratteristiche:* che descrivono i rapporti tra i diversi flussi connessi all'unità, il motivo per cui sono necessarie (k-1) sarà discusso nel paragrafo 2.5.
- *Equazioni e disequazioni ausiliarie:* necessarie per esprimere vincoli, range di esistenza, o altri aspetti che caratterizzano l'unità di trasformazione e il suo funzionamento.

Nel seguito si analizzeranno come possono essere espressi le diverse tipologie di equazioni per la generica unità. Per far questo si introducono i simboli $\dot{m}_{ai,in}$ e $\dot{m}_{bj,out}$ che identificano rispettivamente l' i -esimo flusso di massa in ingresso all'unità e il j -esimo flusso in uscita dall'unità. Si suppone che i flussi di massa in ingresso, come per i flussi di energia, sono n , per cui $i = 1, \dots, n$ e i flussi in uscita m , cioè $j = 1, \dots, m$. Inoltre si introduce il flusso π_m che rappresente il generico flusso di perdita di massa.

Bilancio dei Flussi

Nella gran parte delle trattazioni, come visto nel capitolo 1, si utilizzeranno flussi di energia. Per questo motivo quasi tutti i Bilanci di Flussi identificheranno principalmente dei bilanci di energia. Per completezza si vuole comunque evidenziare e descrivere sia i bilanci di massa che i bilanci di energia.

Bilancio di massa:

$$\sum_i^n \dot{m}_{i,in}(t) - \sum_j^m \dot{m}_{j,out}(t) - \pi_m(t) = \frac{dMa(t)}{dt} \quad (2.16)$$

Tale bilancio dice che la variazione della massa contenuta all'interno del componente è pari alla sommatoria dei flussi di massa entranti sottratti dal termine relativo alla sommatoria dei flussi di massa uscenti e del termine relativo alle perdite. In realtà la gran parte delle unità di trasformazione non prevede la possibilità di accumulo di massa, motivo per cui il secondo termine della 2.16 è spesso considerato pari a zero. In definitiva il bilancio di massa dell'unità può essere espresso dalla:

$$\sum_i^n \dot{m}_{i,in}(t) - \sum_j^m \dot{m}_{j,out}(t) - \pi_m(t) = 0 \quad (2.17)$$

In definitiva quindi il bilancio prevede che la portata di massa totale che entra in unità del sistema sia pari alla portata di massa che esce sommata alla massa persa. I fenomeni di perdita di massa sono fenomeni molto rari negli impianti energetici, poiché le eventuali perdite vengono compensate tramite dei sistemi di reintegro. Si pensi ad esempio al degasatore di un impianto a vapore, in esso parte del vapore è perso in relazione alla fase di espulsione dei gas incondensabili. La portata persa però viene reimpressa grazie ad un sistema di reintegro in modo che all'interno dell'impianto circoli sempre la stessa portata. I bilanci di massa verranno considerati esclusivamente quando nel sistema ci sia la trasformazione di flussi di massa. Per le masse associate ai flussi di energia il bilancio massivo viene assunto verificato a priori.

Bilancio di energia:

$$\sum_i^n A_{i,in}(t) - \sum_j^m B_{j,out}(t) - \pi_p(t) = \frac{dU(t)}{dt} \quad (2.18)$$

L'espressione del bilancio uguaglia la variazione dell'energia interna di un componente alla differenza tra i flussi di energia entranti e quelli uscenti a cui viene sottratto il termine relativo alle potenze perse. Tale bilancio deriva direttamente dal primo principio della termodinamica.

La variazione dell'energia interna in un'unità di trasformazione è solitamente associata all'inerzia che tale componente può presentare. Tale fenomeno si presenta soprattutto nelle fasi di avvio, spegnimento dell'unità o in presenza di variazioni di carico. In questa analisi, comunque, la variazione di energia interna sarà omessa, poiché solitamente essa presenta un valore relativamente piccolo se confrontato con le altre potenze in gioco, ma soprattutto con l'ampiezza degli intervalli di tempo considerati. In definitiva il bilancio di energia per un componente si riduce a porre l'uguaglianza tra l'energia che entra nell'unità e quella che esce, distinta in energia utile e perdite.

$$\sum_i^n A_{i,in}(t) - \sum_j^m B_{j,out}(t) - \pi_p(t) = 0 \quad (2.19)$$

I bilanci di energia, ma lo stesso discorso vale per i bilanci di massa, assumono significato esclusivamente nel caso in cui si esprimano tutti i flussi che interagiscono con l'unità.

Nel caso in cui a seguito di semplificazioni o assunzione si possa trascurare dall'analisi alcuni flussi tali bilanci perdono di significato.

Mappe caratteristiche

Le mappe caratteristiche saranno analizzate più nel dettaglio nel paragrafo successivo. Per ora ci si limiterà a definirle e ad osservare la loro importanza all'interno della modellazione. Esse rappresentano le relazioni matematiche, in molti casi espresse in forma grafica o tabulare, che definiscono i reciproci legami tra diversi flussi. Le tipologie di mappe caratteristiche possono essere molto varie, poiché sono molteplici le possibili combinazioni tra flussi che interagiscono con un componente. Più frequentemente nella pratica ingegneristica s'incontrano mappe che mettono in relazione un input con un output, e che quindi definiscono il rendimento di conversione. Si possono avere anche mappe che relazionano un input con due output o il rapporto di due input con un output.

Una generica mappa caratteristica può essere espressa nella forma:

$$A_{i,in}(t) = f(B_{1,out}(t), \dots, B_{m,out}(t), c.c) \quad (2.20)$$

In cui i flussi sono quelli descritti in figura 2.7, mentre l'acronimo *c.c* rappresenta le condizioni al contorno e cioè tutti quelli aspetti che modificano l'andamento della mappa. Essa mette in relazione il generico flusso $A_{i,in}$ con i flussi in uscita.

Tali relazioni sono fondamentali nella fase di analisi e simulazione in quanto permettono di ricavare, una volta note le variabili dei flussi in ingresso, gli output o viceversa. Le mappe caratteristiche descrivono il funzionamento dell'unità ai diversi valori delle variabili di flusso.

Equazioni ausiliarie

Le equazioni ausiliarie comprendono un set di relazioni di diversa tipologia. La composizione e la gamma di equazione sono fortemente influenzate dal grado di dettaglio scelto e dal tipo di analisi a cui si vuol sottoporre il sistema; è perciò difficile quantificare il numero di equazione ausiliarie che ogni unità di trasformazione presenta. In questa categoria si possono far ricadere tutte le relazioni matematiche che sono utili a descrivere il comportamento dell'unità o alcuni aspetti a cui essa è collegata e che non ricadono nei tipi di equazioni viste in precedenza. Ad esempio si hanno equazioni che esprimono:

- Il campo di esistenza dei flussi. In questo caso si tratta in particolar modo di disequazioni che vincolano il flusso ad assumere degli specifici valori compresi tra un valore massimo e un valore minimo. Le relazioni saranno del tipo 2.7 espresse nel paragrafo 2.2
- Relazioni tra parametri di stato. Queste relazioni caratterizzano gradi di dettaglio superiori a quelli utilizzati in questa trattazione. In generale, comunque, tali relazioni possono descrivere vari aspetti che riguardano l'andamento dei parametri di stato. Ad esempio descrivere le correlazioni che esistono tra i parametri di stato nelle trasformazioni (legge dei gas ideali, processi sui gas ideali, equazione di Bernoulli), ma anche i vincoli a cui tali parametri possono essere soggetti (vincoli sulla temperatura o sulla pressione).
- Particolari aspetti o operazioni. Sono delle relazioni supplementari che servono a descrivere aspetti particolari dell'unità. Tipici esempi sono le equazioni per conteggiare le accensioni e gli spegnimenti della caldaia, le relazioni per descrivere particolari

vincoli sul funzionamento ad esempio rampe di carico, o il minimo tempo che deve intercorrere tra lo spegnimento e l'accensione dell'unità, ecc.

Nel seguito si analizzerà un particolare aspetto che verrà spesso incontrato nell'analisi.

Rampe di carico

La rampa di carico pone un vincolo sulla massima variazione che un flusso di energia può avere in uno specifico intervallo di tempo. In formula:

$$\frac{\partial A_{P_i}(t)}{\partial t} \leq \Delta A_{P_i,max} \quad (2.21)$$

Dove A_{P_i} è il generico flusso di energia che interagisce con la generica unità P_i , e $\Delta A_{P_i,max}$ è la massima variazione di carico permessa all'unità P_i . Questo vincolo deriva dal fatto che variazioni di carico dei Sistemi troppo rapide possono comportare rotture dovute agli eccessivi stress termici e quindi meccanici alle strutture che lo compongono. Queste massime variazioni di carico sono più ampie (cioè può variare il carico velocemente) per unità che identificano turbine a gas, motori a combustione interna, impianti idroelettrici, boiler mentre sono più modeste (cioè può variare il carico lentamente) per impianti a vapore. Questo concetto può essere facilmente chiarito con un semplice esempio facendo riferimento alla 2.8 (per semplicità la variabile tempo viene discretizzata in intervalli finiti Δt di un'ora).

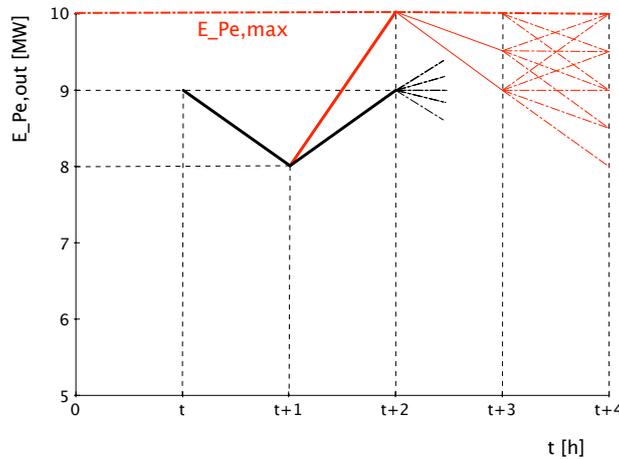


Figura 2.8: Soluzioni possibili e non possibili in funzione della massima rampa di variazione di carico

Si consideri un'unità P_e per la produzione di energia elettrica con potenza nominale $E_{Pe,max}$ di 10 [MW]. Si impone una massima rampa di variazione del carico in un intervallo di tempo Δt pari a $\Delta E_{Pe,max} = 1$ [MW/h]. All'istante corrente t l'unità produce un flusso di energia $E_{Pe,out}(t)$ pari a 9 [MW]. Nell'intervallo successivo si decide di diminuire $E_{Pe,out}(t)$ fino a un valore di 8 [MW] all'istante $t + 1$. Così, dal momento che la rampa di carico max è di $\Delta E_{Pe,max} = 1$ [MW/h], nell'istante $t + 2$ sarà impossibile che la $E_{Pe,out}(t)$ sia pari a 10 [MW], escludendo di conseguenza anche tutte le soluzioni che contemplano il raggiungimento della potenza di 10 [MW] all'istante $t + 2$ (andamenti in rosso in Fig. 2.8). I vincoli sulla massima variazione di carico del tipo legano ciascun istante di tempo al successivo e, quindi, la presenza di vincoli sulla massima rampa di variazione di carico rende dinamico il modello del sistema.

Prima di proseguire con la trattazione può essere utile esprimere un concetto. Nello studio dei sistemi di conversione, e in particolar modo nelle unità di trasformazione che lo compongono, può essere utile non considerare tutti i flussi che realmente sono presenti in un sistema. In molti casi, infatti, se un flusso non influisce sull'analisi o se la sua influenza può essere sostituita da particolari relazioni; tale flusso può essere rimosso dal modello del sistema. Questo permette di ridurre gli sforzi computazionali, in relazione alla riduzione del numero di variabili e del numero di relazioni necessarie a descrivere il funzionamento dell'unità. Tale operazione non inficia la validità del modello, in quanto l'eventuale influenza di una variazione di tali flussi sull'analisi viene comunque associata alla variazione delle mappe caratteristiche. Per esempio si consideri un gruppo turbogas; i flussi in ingresso sono un flusso $F1$ relativo alla portata di combustibile e un flusso $F2$ relativo alla portata d'aria. In uscita si avrà un flusso E e un flusso π_p . Nell'analisi il flusso $F2$ potrà essere trascurato. Questo avviene poiché tale flusso ha una disponibilità infinita nell'ambiente, non ha un costo e neppure particolari vincoli. È noto però, che una variazione nella temperatura o nella pressione dell'aria in ingresso al gruppo abbia un'influenza diretta sul funzionamento dello stesso. Influenza che viene persa, se il flusso d'aria è trascurato. Per ovviare a tale problema si considera l'influenza di tale flusso mediante una variazione nella mappa caratteristica in funzione dei diversi valori di pressione o temperatura dell'aria.

2.5 Definizione delle mappe caratteristiche

In questa sezione si porrà l'attenzione su una peculiarità fondamentale della modellazione dei componenti: le mappe caratteristiche. Come si è già potuto vedere nel paragrafo 2.3.2, esse rappresentano le relazioni esistenti tra i diversi flussi che interagiscono con il componente. Definiscono cioè le prestazioni dell'unità sia in condizioni nominali sia in condizioni di fuori progetto.

Esse possono porre in relazione:

- Flussi in ingresso con flussi in uscita: esprimono l'andamento del rendimento di trasformazione in diverse condizioni operative. (ad esempio l'andamento del rendimento elettrico di un motore a combustione interna al variare del carico)
- Flussi in uscita con flussi in uscita: riportano la relazione che lega due o più output. Un tipico esempio per gli impianti cogenerativi è il coefficiente c , cioè rapporto tra potenza elettrica e potenza termica prodotta da un CHP;
- Flussi in ingresso con flussi in ingresso: definiscono la relazione che esiste tra gli ingressi. Ad esempio il rapporto che c'è tra due combustibili che alimentano un impianto bifuel.

La conoscenza delle mappe caratteristiche è importante non solo nello studio del funzionamento di un'unità esistente, ma anche nella progettazione di un sistema nuovo. Nel primo caso, esse consentono di prevedere direttamente le prestazioni del componente durante la vita utile sia in termini termodinamici che economici, e di confrontarle con quelle di altri componenti esistenti o di nuova concezione. Nel secondo caso, il progettista si trova inizialmente di fronte al problema di dover selezionare un insieme di unità che costituirà il sistema finale in modo da ottenere il soddisfacimento di tutti i requisiti di progetto

(problema di sintesi). Una volta eseguita una prima selezione è necessario conoscere le prestazioni di questi dispositivi (Unità) anche al carico parziale, dal momento che il sistema si troverà ad operare in condizioni di carico più o meno diverse a seconda della variabilità delle specifiche di progetto. La scelta dei dispositivi (Unità) sarà quindi influenzata dal loro comportamento più o meno buono non solo nelle condizioni nominali ma anche nelle condizioni di fuori progetto, in quanto da questo deriverà la loro capacità di soddisfare completamente le specifiche di progetto e di produrre un utile economico più o meno elevato [13].

Nel seguito verranno riportati alcuni esempi di mappe caratteristiche per diverse unità di trasformazione. Si potrà facilmente osservare come la maggior parte rapportino i flussi in ingresso ai flussi in uscita. La mappa caratteristica come già detto in precedenza può essere espressa in forma matematica, grafica o tabulare. Essa può relazionare due o più flussi tra di loro direttamente o mediante altri parametri che ne descrivono il rapporto. È il caso ad esempio di un'unità generica P_b in cui si metta in relazione il flusso in uscita B con il rendimento di trasformazione (espressione del rapporto tra flusso in output e flusso in input). Ovviamente una volta noto l'output e il rendimento risulta definito anche il flusso in ingresso della relazione $\eta = B_{out}/A_{in}$ con $B - out$ il generico flusso di energia in uscita e A_{in} il generico flusso di energia in ingresso.

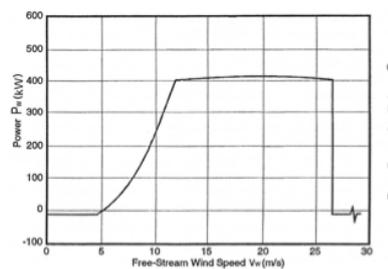
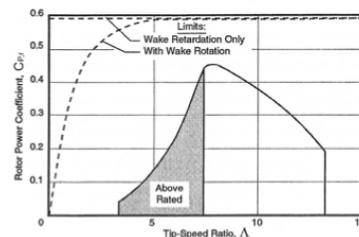
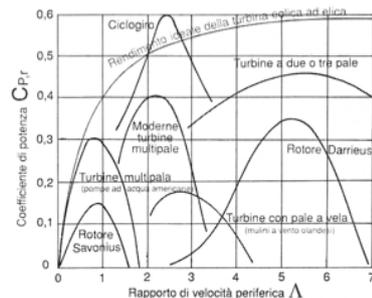
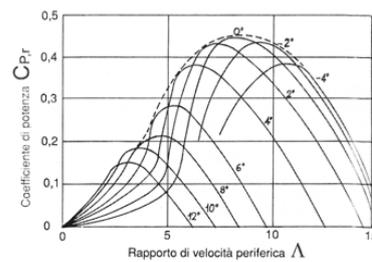
(a) Mappa caratteristica $P_w - v_w$ (b) Mappa caratteristica $C_{P,r} - \lambda$ (c) Mappa caratteristica $C_{P,r} - \lambda$ per diversi tipi di generatori eolici(d) Mappa caratteristica $C_{P,r} - \lambda$ al variare dell'angolo di calettamento

Figura 2.9: Mappe caratteristiche di un generatore eolico [13]

Come primo esempio si consideri un'unità P_e rappresentata da una turbina eolica. Il comportamento di un generatore eolico viene descritto dalla mappa caratteristica in Fig. 2.9a che esprime la potenza meccanica all'albero P_w prodotta dal rotore in funzione della velocità indisturbata v_w del vento [13]. Si può osservare come questa mappa sia delimitata a sinistra dalla velocità di cut-in, alla quale il generatore è in grado a produrre potenza P_w positiva e a destra dalla velocità del vento massima permessa, cioè velocità di cut-out.

Solitamente la mappa di Fig. 2.9a viene espressa in termini adimensionali (Fig. 2.9b) introducendo i seguenti due parametri:

- Rapporto di velocità periferica Λ : è il rapporto tra la velocità periferica all'estremità del rotore e la velocità indisturbata del vento:

$$\Lambda = \frac{\Omega \cdot R}{v_w} \quad (2.22)$$

dove Ω è la velocità di rotazione del rotore e R il suo raggio massimo;

- Coefficiente di potenza $C_{P,r}$: è definito come rapporto tra la potenza meccanica all'albero del rotore e la potenza eolica riferita alla velocità indisturbata v_w e all'area A del rotore:

$$C_{P,r} = \frac{P_w}{0,5 \cdot \rho \cdot v_w^3 \cdot A} \quad (2.23)$$

Il coefficiente di potenza $C_{P,r}$ è limitato dalla necessità del rotore di rallentare il vento per produrre potenza (limite di Betz) e dalla trasformazione di parte dell'energia cinetica del vento in energia cinetica rotazionale della scia.

La forma della mappa adimensionale $C_{P,r} - \Lambda$ è legata al tipo di generatore eolico, le mappe adimensionali per varie tipologie di generatori sono mostrate in Fig 2.9c. Inoltre, per tipologia fissata, la mappa adimensionale $C_{P,r} - \Lambda$ viene modificata al variare dell'angolo di calettamento delle pale del rotore, come mostrato in Fig. 2.9d.

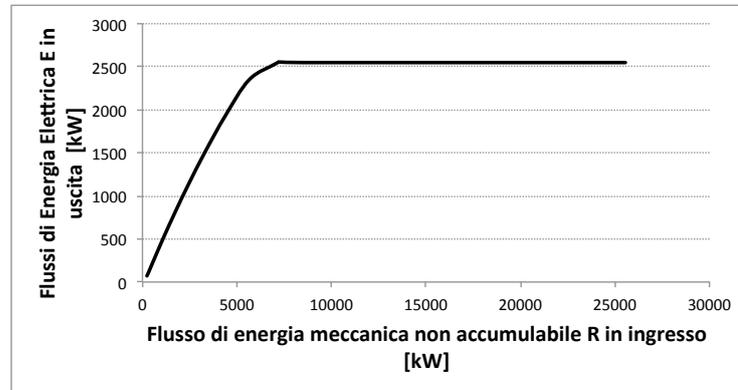


Figura 2.10: Mappa caratteristica E - R per un generatore eolico

In questa analisi verrà utilizzata in particolar modo la curva in Fig. 2.10, poiché essa esprime il rapporto tra il flusso E in output e il flusso R in input a differenti valori della velocità del vento. Essa deriva direttamente dalla mappa caratteristica espressa in figura 2.9a. Infatti per passare da una mappa 2.9a all'altra 2.10 si sono resi necessari i seguenti passaggi:

- Per ogni valore di velocità del vento si è calcolato il rispettivo flusso di energia associato. $R = 0,5 \cdot \rho \cdot v_w^3 \cdot A$
- Il corrispettivo valore di potenza meccanica P_w è stato moltiplicato per η_{el} , rendimento elettrico del generatore. Tale rendimento è stato assunto costante al variare delle differenti velocità.

In questo modo si è potuto ottenere una mappa caratteristica che in ascissa avesse il flusso R in ingresso e in uscita il flusso E . Se ora si passa ad analizzare un'unità P_{eq} rappresentata in fig. 2.11a, in cui non si è considerato alcun flusso di perdita. Le mappe di cui si necessita per descrivere completamente l'unità sono due. In figura 2.11b si possono vedere le due mappe richieste

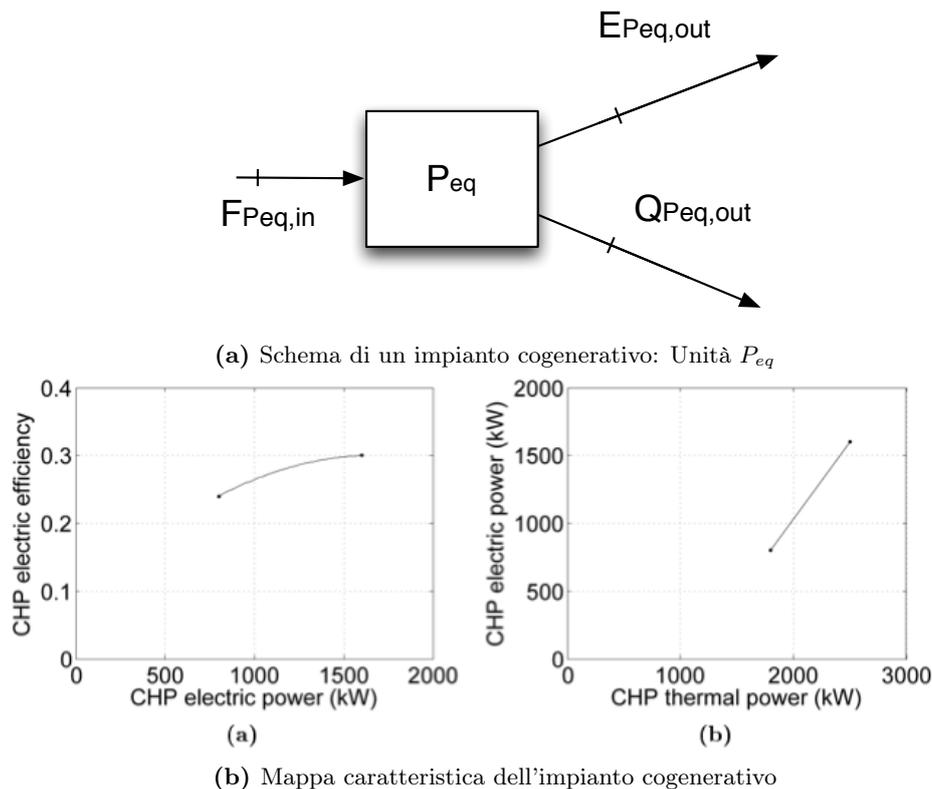


Figura 2.11: Schema dell'impianto cogenerativo e Mappe caratteristiche

La figura 2.11ba rappresenta una mappa che mette in relazione la potenza elettrica E_{chp} con il rendimento di trasformazione elettrico e quindi, per un discorso analogo al caso precedente, confronta un flusso in uscita con un flusso in ingresso. Nella figura 2.11bb si delinea una mappa relativa ai due prodotti del sistema cogenerativo. Essa definisce il rapporto $c = E/Q$.

Esprimere una mappa caratteristica in forma grafica sicuramente porta ad una descrizione del componente che può delinarsi più immediata e semplice. Nella modellazione, ma soprattutto nella fase d'implementazione, risulta però più conveniente disporre di mappe in forma di relazioni matematiche (equazioni o disequazioni) o in forma tabulare. Ciò deriva ovviamente dal fatto che i programmi per l'analisi dei sistemi riescano a gestire meglio funzioni matematiche e/o tabulazioni piuttosto che grafici. Qualora si disponesse della mappa in forma di diagramma, per passare alla rispettiva funzione matematica, si rende necessario un processo di approssimazione e regressione. Per il sistema CHP visto sopra, e rappresentato in figura 2.11a, le mappe caratteristiche sono espresse dalle due funzioni 2.24 e 2.25: la prima lega il rendimento di primo principio η_I di un sistema CHP alla potenza elettrica e termica generata ($E_{Peq,out}$ e $Q_{Peq,out}$), la seconda lega la potenza elettrica generata $E_{Peq,out}$ alla massima potenza termica $Q_{Peq,out}$ che può essere generata.

$$\eta_I = \frac{E_{Peq,out} + Q_{Peq,out}}{F_{Peq,in}} = f(E_{Peq,out}, Q_{Peq,out}, p_{amb}, t_{amb}, x_{amb}) \quad (2.24)$$

$$\max(Q_{Peq,out}) = f(E_{Peq,out}, p_{amb}, t_{amb}, x_{amb}) \quad (2.25)$$

Nel caso in cui il sistema cogenerativo si alimentato da un combustibile il flusso F sarà calcolato con l'equazione 1.3. Si noti che la 2.24 indica che il consumo di combustibile di un generico sistema CHP dipenda sia dalla potenza elettrica generata $E_{Peq,out}$ sia dalla potenza termica generata $Q_{Peq,out}$. Un esempio di sistema modellato da questa curva caratteristica è l'impianto a vapore cogenerativo. In questi impianti lo spillamento di vapore a differenti livelli di temperatura (pressione) riduce la produzione di potenza elettrica. La potenza sviluppata dalla turbina, a parità di altre condizioni, diminuisce all'aumentare dell'estrazione di vapore a scopo cogenerativo in relazione al fatto che diminuisce il vapore disponibile per l'espansione nella turbina stessa. Per cui, ad esempio, per mantenere costante la potenza elettrica a seguito di un aumento della richiesta termica l'unica possibilità è incrementare la produzione di vapore e conseguentemente aumentare il consumo di combustibile.

In altri sistemi CHP, come motori a turbine a gas e motori a combustione interna cogenerativi, il consumo di combustibile non dipende dalla potenza termica generata $Q_{Peq,out}$, essendo quest'ultima recuperata dal calore dei gas esausti e, nel caso del motore a combustione interna, dal calore di fluidi di raffreddamento (questo è strettamente vero se si trascura la contropressione allo scarico della motore imposta dalle perdite di pressione nello scambiatore a recupero). In questi casi la mappa caratteristica 2.24 può essere sostituita dall'efficienza termica 2.26:

$$\eta_T = \frac{Q_{Peq,out}}{F_{Peq,in}} = f(E_{Peq,out}, Q_{Peq,out}, p_{amb}, t_{amb}, x_{amb}) \quad (2.26)$$

Nelle funzioni fin qui analizzate si può osservare come le mappe caratteristiche dipendono oltre che dai flussi in ingresso e in uscita dall'unità anche da altri parametri. Nei due casi in questione essi sono rappresentati dalle condizioni di pressione, temperature e umidità ambientali. Questi parametri influenzano il funzionamento delle unità andato a modificare il ciclo termodinamico, di conseguenza tale modifica impone una variazione della curva caratteristica. Nel paragrafo successivo tale influenza verrà analizzata più nel dettaglio utilizzando degli esempi.

La determinazione delle mappe caratteristiche resta un punto focale per decretare la validità del modello. Avere mappe non precise, erroneamente calcolate o mal approssimate può portare a risultati che nella pratica non verranno poi rispettati. Per questo motivo la definizione delle mappe caratteristiche rappresenta una fase molto delicata. Nella prassi si possono seguire tre differenti strade per ricavarle:

1. Ricerca in letteratura: indagare sulla presenza di studi precedenti o di dati forniti dai costruttori che riportino le curve degli impianti. Solitamente tale strada è maggiormente utilizzata quando si ragiona in termini generali e non sul specifico impianto. È relativamente facile ricavare le mappe per i motori a combustione interna, risulta molto più difficile trovare la mappa per uno specifico motore avente una determinata taglia e determinate caratteristiche.

2. Dati sperimentali: effettuare prove sui sistemi esistenti per decretare l'andamento dei diversi flussi sottoposti a variazioni di carico. Tale metodo risulta molto oneroso in termini economici ma soprattutto in relazione al tempo impiegato.
3. Simulazioni: simulare ripetutamente in condizioni di progetto e fuori progetto un modello di funzionamento dettagliato del Sistema per ricavarne il comportamento al variare del carico. In pratica per ricavare la mappa caratteristica di un'unità si esegue un'analisi a grado di dettaglio maggiore sul componente stesso.

In questo lavoro di tesi si è seguito in particolar modo la strada 1, dove in molti casi nei testi e negli articoli presi in esame sono riportati i risultati di simulazioni (strada 3). Questa decisione è stata presa in relazione al carattere generale della trattazione. Infatti nel gran parte dei modelli presi in considerazione non ci si riferirà a sistemi specifici, insieme di macchine realmente in commercio, ma a sistemi generali, in cui ad esempio si analizza il funzionamento di un generico motore, di una turbina a gas o di impianto solare. Come si è visto per il caso della turbina eolica, un impianto che presenta due flussi uno in input e uno in output (nell'ipotesi di trascurare le perdite) richiede un'unica mappa caratteristica. Questo si può verificare sia vero per tutte le unità che presentino tale configurazione. Si pensi ad esempio a un'unità P_e identificata da un impianto fotovoltaico composto da moduli in silicio monocristallino. Tale unità è alimentata da un flusso di energia relativo alla radiazione solare che incide sulla superficie R_{in} e produce un flusso di energia elettrica E_{out} . In questo caso verrà definita una mappa espressa in figura 2.12, che mostra la variazione del rendimento per diversi valori dell'input. Anche in questo caso si ha la richiesta di una sola mappa per descrivere completamente il sistema [35].

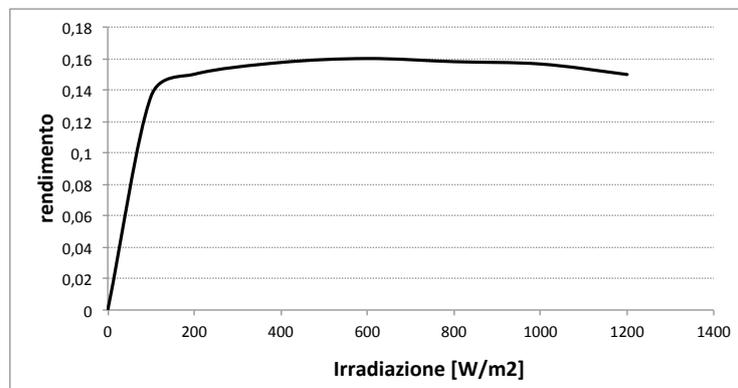
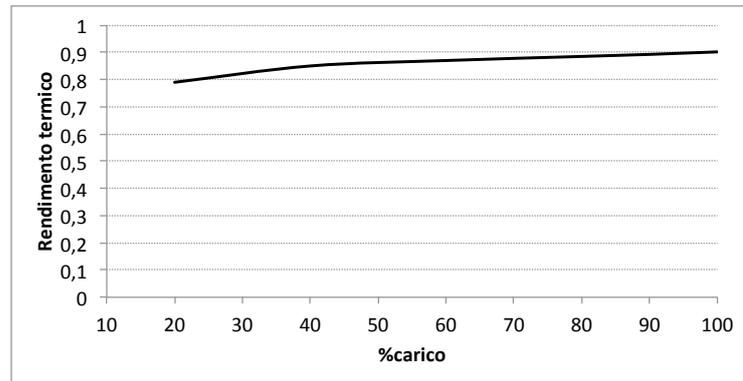


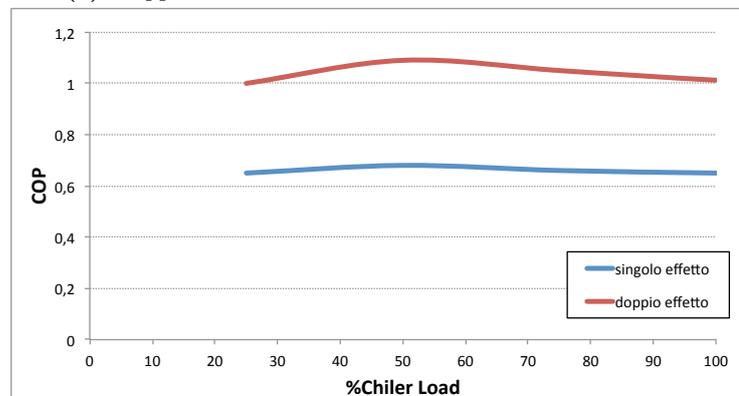
Figura 2.12: Mappa caratteristica rendimento-irradiazione per un impianto fotovoltaico

I sistemi che, sfruttando un singolo ingresso, presentano in uscita un flusso differente dalla potenza elettrica, come ad esempio la potenza termica o la potenza frigorifera, richiedono anch'essi un'unica mappa caratteristica. Nella figura 2.13 sono riportate le relazioni relative ad un boiler (fig. 2.13a) alimentato a combustibile per la produzione di energia termica [28] e due gruppi ad assorbimento per la produzione dell'energia frigorifera (fig. 2.13b). La distinzione nei gruppi ad assorbimento è relativa alla temperatura di alimento della sorgente calda. Nel caso di temperature di 75°C si parla di singolo effetto, se si è in presenza di temperature di 130°C si ha il doppio effetto.[29].

I sistemi cogenerativi, alimentati da un singolo ingresso, come si potuto osservare in figura 2.11b, richiedono la definizione di due curve caratteristiche.



(a) Mappa caratteristica rendimento-carico di una caldaia



(b) Mappa caratteristica COP-carico per impianti ad assorbimento a singolo e doppio effetto

Figura 2.13: Mappe caratteristiche di un unità P_{qt} e di unità P_{qc}

In tutti gli esempi visti e nei casi studiati, non riportati in trattazione perché troppo lunghi o ripetitivi, si è potuto osservare una costante. Infatti, detti k il numero totale di flussi (esclusi i flussi di perdita) che interagiscono con un'unità, somma degli n flussi in ingresso e gli m flussi in uscita, il numero minimo di mappe caratteristiche necessarie a descrivere completamente l'unità è $k-1$. Questo si può spiegare facendo il seguente ragionamento. Definire un'unità significa sapere determinare per ogni condizione operativa i possibili valori assunti dalle variabili connesse all'unità stessa. Le diverse condizioni operative, espresse dalle variazioni di carico, saranno indicate dalla variazione di una o più variabili di flusso. Di conseguenza sapendo il valore di x flussi si ha la necessità di ricavare i possibili valori dei restanti $k-x$ flussi. Per far questo si ha bisogno di $k-x$ relazioni che legano i diversi flussi tra di loro. In questa fase i flussi di perdita non sono considerati nei flussi in ingresso o nei flussi in uscita. Questo perché i flussi di perdita possono essere facilmente ricavati dal bilancio dei flussi una volta noti il valore dei restanti flussi. Le $k-x$ relazioni rappresentano le mappe caratteristiche che devono essere identificate per poter descrivere esattamente il funzionamento di un'unità. Gli x flussi noti identificano i gradi di libertà che l'unità presenta. Nella maggior parte delle analisi x assume il valore 1, per cui per definire completamente l'unità sarà necessario conoscere $k-1$ mappe caratteristiche. In alcuni casi però le mappe non forniscono una corrispondenza biunivoca tra due flussi ma bensì un set di possibili valori che uno dei due flussi può assumere. In questo caso solitamente la notazione matematica della mappa è rappresentata da disequazioni e non da

uguaglianze. Esemplicando, si pensi ad un motore a combustione interna cogenerativo che sfrutta i fumi prodotti nel processo di combustione per alimentare una caldaia a recupero con possibilità di bypass. La mappa relativa al rapporto tra gli output sarà:

$$Q_{Peq,out} \leq f(E_{Peq,out}, p_{amb}, t_{amb}, x_{amb}) \quad (2.27)$$

Il simbolo minore o uguale deriva dalla possibilità per i fumi, o per una parte di essi, di bypassare la caldaia e quindi non cedere calore al fluido termovettore. La mappa limita esclusivamente il valore massimo che un flusso (in questo caso Qt) può assumere, ma non ne fissa il valore. La mappa qui lascia comunque un grado di libertà per cui nell'analisi saranno necessarie due variabili di flusso indipendenti per risolvere lo studio dell'unità. Questi risultati sono stati ottenuti tenendo come ipotesi base il principio che all'interno dell'unità tutti i k flussi siano legati tra di loro. Questo nella pratica può non essere sempre vero, alcune unità possono avere due o più flussi che non sono collegati agli altri. In questo caso l'unità presenta due o più trasformazioni che sono indipendenti tra loro, di conseguenza il concetto delle $k-1$ relazioni necessarie a descrivere l'unità non è più verificato. La circostanza che nella stessa unità non tutti i flussi siano collegati tra loro deriva dal fatto che i confini del componente possono essere definiti a discrezione di chi esegue l'analisi. Si pensi ad un'unità che rappresenta un insieme di impianti: una caldaia ed un impianto fotovoltaico. In questo caso l'elemento sarà identificato da due ingressi (flussi R e F) e due uscite (E e Q). La produzione dei due flussi avviene però in maniera separata, per cui, tralasciando i flussi di perdita, le mappe richieste per descrivere il sistema sono 2: una relativa alla caldaia ed una relativa all'impianto fotovoltaico. Se si seguisse i precedenti dettami si sarebbe arrivati alla conclusione di necessitare di $k-1 = 3$ (essendo stato escluso il bilancio) relazioni. Essendo le produzioni separate si ha la presenza di un grado di libertà in più, in quanto, potenza elettrica e termica non sono in relazione tra loro, e possono variare liberamente senza influire l'una sull'altra; un discorso analogo può essere fatto relativamente ai flussi R e F .

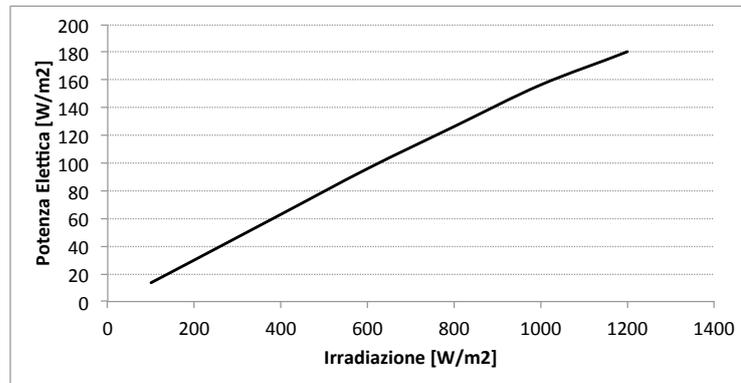
Il caso in cui i flussi presenti all'interno della stessa unità non siano legati tra loro non è molto diffuso nella pratica poiché la scelta dei confini dell'unità dovrebbe essere tale da comprendere solo i flussi che effettivamente influiscono sul processo di trasformazione. La presenza di più trasformazioni o processi non legati all'interno della stessa unità può essere ugualmente gestita considerando per ogni processo un componente a se stante. In questo specifico caso il fatto di considerare più trasformazioni all'interno di una stessa unità di trasformazione non comporta nessun beneficio all'analisi, poiché sia il numero di equazioni sia il numero di variabili rimane invariato.

2.5.1 Linearizzazione delle mappe caratteristiche

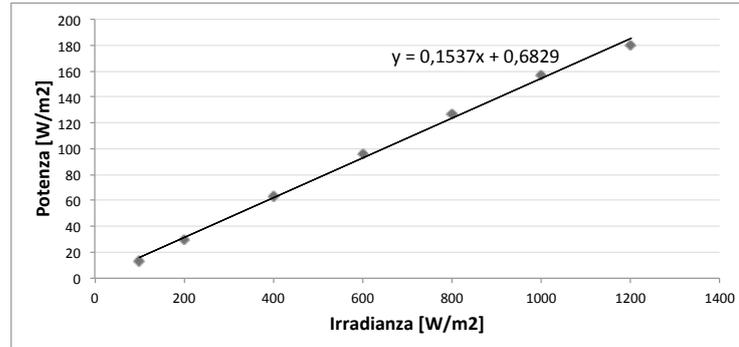
In questo paragrafo si vedrà una possibile semplificazione per le mappe caratteristiche. In molte situazioni e per campi di funzionamento non troppo estesi, infatti, le curve caratteristiche possono venir ben approssimate da funzioni lineari. Ciò comporta notevoli vantaggi non tanto alla fase di modellazione, bensì agli eventuali processi di ottimizzazione. Come si vedrà meglio nel capitolo 3, il fatto di poter considerare un modello lineare, composto cioè interamente da funzioni lineari, permette di ridurre notevolmente gli sforzi e i tempi computazionali[8]. Se si osservano tutte le curve caratteristiche esaminate nel capitolo precedente si può notare come la gran parte di esse presenti andamenti crescenti o decrescenti, facilmente approssimabili, su uno o più intervalli, da funzioni lineari. Il processo di linearizzazione può avvenire nei seguenti step:

- Individuazione degli intervalli in cui la curva presenta un andamento costante o uniformemente crescente o decrescente.
- Approssimazione della curva mediante la funzione lineare che maggiormente rispecchia il valore reale della stessa.
- Introduzione delle variabili binarie per tenere in considerazione l'accensione o spegnimento dell'impianto e l'intervallo di funzionamento.

Per un'analisi più dettagliata si rimanda a [16]. Di seguito verrà descritto l'approssimazione di una curva lineare per un impianto fotovoltaico la cui mappa caratteristica $\eta_{el} - R$ è stata già descritta in figura 2.12. Si riporta la mappa che relaziona il flusso in ingresso con il flusso in uscita, essa è stata ricavata semplicemente moltiplicando il valore del irraggiamento per i rispettivi valori di rendimento (fig. 2.14a). Si può facilmente



(a) Mappa caratteristica E - R di un impianto fotovoltaico: unità P_e



(b) Mappa caratteristica lineare E - R di un impianto fotovoltaico: unità P_e

Figura 2.14: Mappe caratteristiche di un impianto fotovoltaico

notare come la curva caratteristica abbia un andamento crescente abbastanza uniforme. L'espressione matematica che descrive tale mappa è rappresentata dalla:

$$E_{Peq,out} = f(R_{Pe,in}, c.c) \quad (2.28)$$

a cui si aggiunge l'equazione ausiliaria che identifica il campo di funzionamento:

$$R_{Peq,min} \leq R_{Pe,in} \leq R_{Peq,max} \quad (2.29)$$

Dove l'acronimo c.c sta per condizioni al contorno. Nel processo di linearizzazione tali espressioni vengono trasformate nelle:

$$E_{Peq,out} = m_{Peq}(c.c) \cdot R_{Pe,in} + q_{Peq}(c.c) \cdot \delta_{Peq} \quad (2.30)$$

$$R_{Peq,min} \cdot \delta_{Peq} \leq R_{Pe,in} \leq R_{Peq,max} \cdot \delta_{Peq} \quad (2.31)$$

Dove la variabile δ_{Pe} rappresenta la variabile binaria, m_{Pe} e q_{Pe} sono i parametri, in funzione delle condizioni al contorno, che descrivono la retta che approssima la funzione.

L'utilizzo di variabili binarie nasce dall'esigenza di poter considerare tre situazioni:

1. La presenza o meno di un unità all'interno del sistema, durante uno studio di design
2. L'accensione o spegnimento di un'unità, durante un'analisi di funzionamento del sistema.
3. Nel caso di mappe caratteristiche approssimate su più intervalli, l'individuazione dei diversi intervalli.

Le variabili binarie assumono il valore 1 nel caso in cui l'unità sia in funzione e il valore 0 nel caso in cui sia spenta/non presente. L'assenza della variabile binaria, infatti, non permetterebbe di considerare correttamente le situazioni di spegnimento di un impianto o di assenza dello stesso dal sistema. Si pensi al caso in cui l'impianto fotovoltaico non sia in funzione ($\delta_{Pe} = 0$), ad esempio, di notte in questo caso il flusso in ingresso R sarà pari a zero e di conseguenza anche il flusso in uscita E dovrà essere 0. Se però si trascurasse la variabile binaria ad un flusso in ingresso nullo corrisponderebbe comunque un valore del flusso E pari a q_{Pe} . La figura 2.14b rappresenta la curva linearizzata.

Il processo di linearizzazione può essere visto anche per le unità cogenerative. Nel paragrafo precedente si è visto come tali componenti necessito di due mappe caratteristiche. Si consideri ad esempio una turbina a gas con recupero del calore dai gas di scarico mediante uno scambiatore a recupero. La prima mappa, relativa al rapporto ingresso uscita, può essere descritta mediante la relazione matematica 2.26. La quale è generalmente ben approssimabile da una relazione lineare del tipo:

$$F_{Peq,in} = m_f \cdot LHV = m_{Peq}(p, T, x)_{amb} \cdot E_{Pe,out} + q_{Peq}(p, T, x)_{amb} \cdot \delta_{Peq} \quad (2.32)$$

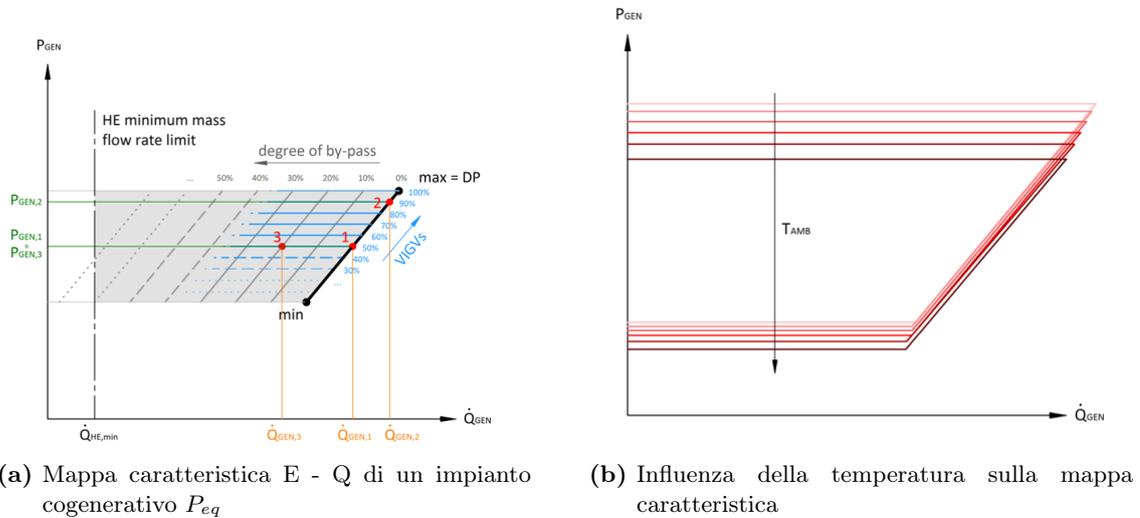
$$E_{Peq,min} \cdot \delta_{Peq} \leq E_{Pe,in} \leq E_{Peq,max} \cdot \delta_{Peq} \quad (2.33)$$

Quando la variabile δ è zero, l'intervallo di variazione della potenza E_{Peq} è nullo e dalla 2.32 il consumo di combustibile è anch'esso nullo. Viceversa, quando la variabile δ è uguale a 1, la potenza $E_{Peq,out}$ può variare tra un valore minimo ($E_{Peq,min}$) e un valore massimo ($E_{Peq,max}$) e il consumo di combustibile varia linearmente con $E_{Peq,out}$. L'utilizzo di questo tipo di mappe caratteristiche è ampiamente diffuso in letteratura, oltre a [8] già citato sopra, interessanti lavori sono [30], [7],[10]. I modelli nei quali vengono incluse curve caratteristiche lineari con l'utilizzo di variabili binarie richiedono, per essere risolti, un tipo di programmazione mista lineare intero (MILP, acronimo inglese di Mixed Integer Linear Programming). Questo tipo di modelli verrà ampiamente trattato nel paragrafo 3.4.2.

La seconda mappa caratteristica che si presenta 2.15a lega la potenza generata E_{Peq} (o Pgen) al massimo valore della potenza termica generabile Q_{Peq} (o Q gen).

Questa mappa può essere ben approssimata da una legge lineare corrispondente alla:

$$Q_{Peq,in} \leq m1_{Peq}(p, T, x)_{amb} \cdot E_{Pe,out} + q1_{Peq}(p, T, x)_{amb} \cdot \delta_{Peq} \quad (2.34)$$

(a) Mappa caratteristica E - Q di un impianto cogenerativo P_{eq}

(b) Influenza della temperatura sulla mappa caratteristica

Dove l'uguaglianza rappresenta la linea nera spessa in Fig. 2.15a, nella quale le "condizioni nominali" (DP) sono quelle corrispondenti al massimo carico e termico. Si analizza ora maggiormente nel dettaglio il funzionamento dell'unità cogenerativa. Partendo da un generico punto 1 (caratterizzato da una potenza elettrica $P_{GEN,1}$ e termica $Q_{GEN,1}$) di questa curva, un aumento della potenza elettrica verso il punto 2 (caratterizzato da una potenza elettrica $P_{GEN,2}$ e termica $Q_{GEN,2}$) è ottenuto incrementando la portata di massa che circola nel sistema. La portata di massa d'aria all'aspirazione del compressore viene incrementata utilizzando delle pale statoriche a calettamento variabile VIGV ([33], [32], [13]) (Variable Inlet Guide Vanes) al fine di mantenere il rapporto aria/combustibile, la temperatura all'ingresso della turbina, l'angolo di incidenza e le perdite all'ingresso delle schiere di pale rotanti approssimativamente costanti. Quindi le variazioni nel ciclo termodinamico sono limitate e l'efficienza dell'impianto viene mantenuta prossima al valore di progetto (η_{DP}). Per realizzare queste condizioni è sufficiente il solo controllo con le pale VIGV essendo le efficienze della camera di combustione e della turbina meno sensibili alle variazioni di carico. La portata di massa all'ingresso dello scambiatore a recupero varia linearmente con la portata d'aria (e quindi approssimativamente anche con la potenza generata), quindi anche la mappa caratteristica P - Q può essere ben approssimata da funzioni lineari

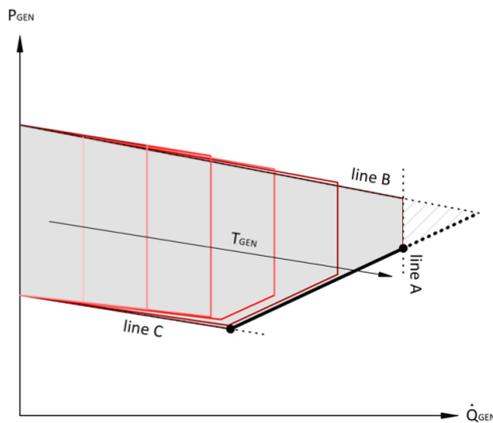
D'altra parte, se l'obiettivo è di diminuire la potenza termica generata Q_{GEN} a parità di potenza elettrica generata P_{GEN} partendo dal punto 1, una parte della portata di gas esausti deve by-passare lo scambiatore e essere mandata direttamente all'ambiente. Questa operazione corrisponde ad un movimento orizzontale dal punto 1 al punto 3 in Fig. 2.15a. Quindi, la linea nera spessa in Fig. 2.15a corrispondente alla mappa caratteristica P - Q a un grado di by-pass dei gas esausti nullo (simbolo di uguaglianza nella relazione 2.27) trasla verso sinistra quando il grado di by-pass aumenta (simbolo di minore). L'area grigia evidenziata in Fig. 2.15a rappresenta quindi tutti i punti di lavoro fattibili, ed è limitata a sinistra dalla minima portata di massa nel lato caldo dello scambiatore di calore a recupero.

Come detto in precedenza l'andamento delle mappe caratteristiche può essere influenzato da diversi fattori. In molti casi essi sono rappresentati dalle condizioni ambientali, la variazione delle quali condiziona il funzionamento del sistema e di conseguenza le mappe caratteristiche che lo rappresentano. Il fatto di dover considerare la variazione delle mappe

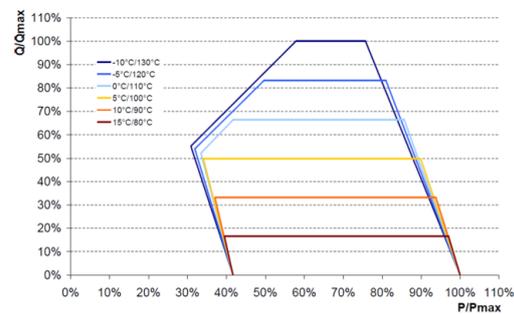
in relazione a diversi parametri deriva, in molti casi, dal aver trascurato nell'analisi alcuni flussi. In precedenza si è detto come alcune potenze o portate potessero essere trascurate dallo studio, a patto di esprimere la loro influenza sul funzionamento di un componente. La variazione della mappa caratteristica tiene in considerazione proprio questo fattore. Se i flussi non fossero stati trascurati il numero dei flussi totali si sarebbe incrementato e di conseguenza anche il numero di mappe caratteristiche necessaria a descrivere l'unità. Si sarebbero, infatti, introdotte le curve caratteristiche che esprimono l'influenza che gli ultimi flussi compresi hanno sull'elemento.

In figura 2.15b è raffigurata l'influenza dalla temperatura ambiente sulla mappa caratteristica del turbogas (ciò deriva dall'esclusione dall'analisi del flusso di aria ambiente in ingresso al compressore). La modifica della mappa caratteristica in funzione di uno specifico parametro è espressa, in fase di modellazione, tramite una relazione matematica (equazione, o tabulazione) che lega i parametri che descrivono la mappa (nel caso di mappa lineare m e q) alla variazione di quello specifico parametro.

Non solo i parametri ambientali condizionano l'andamento delle curve caratteristiche. Ad esempio nei cicli Rankine cogenerativi la temperatura a cui viene prodotto il calore da inviare all'utenza modifica le mappe.



(a) Influenza della temperatura di generazione sulla mappa caratteristica $E - Q$ di un impianto a vapore



(b) Influenza della temperatura di generazione sulla mappa caratteristica $Q/Q_{max} - E/E_{max}$ di un impianto a vapore

Figura 2.15: Mappe caratteristiche per un impianto a vapore

In figura 2.15a e 2.15b sono riportate le mappe caratteristiche $P-Q$ relativa a tale unità P_{eq} ricavate in [13], [34]]. Analizzando la figura 2.15a, come per la turbina a gas cogenerativa, la linea nera spessa a destra mostra un andamento lineare della potenza elettrica generata in funzione della massima potenza termica generabile, e ogni punto di questa curva trasla verso sinistra e verso l'alto al diminuire della portata di vapore estratta dalla turbina per una portata costante di combustibile nel generatore di vapore. Questo avviene perché i confini dell'area di fattibilità (linee B e C) hanno pendenza negativa dovuta al fatto che una maggiore produzione di potenza termica Q_{GEN} a consumo di combustibile costante comporta una diminuzione della potenza generata P_{GEN} . Quindi, tutti i punti fattibili sono inclusi nella superficie delimitata dalle linee A, B, C e dalla linea nera spessa. La linea A rappresenta il valore massimo della potenza termica generabile, che viene ottenuto alla massima portata e temperatura di estrazione in turbina. Questa linea

trasla verso sinistra se la temperatura di estrazione TGEN diminuisce a portata di massa di estrazione fissata e pari a quella massima. Tale fattore è visibile meglio nella mappa 2.15b in cui gli assi sono stati invertiti. In questo caso si può osservare come la temperatura a cui viene generato il calore influisca sul valore massimo di calore che può essere prodotto. Se la Tgen diminuisce a parità di portata estratta anche il flusso Q_t associata a tale portata diminuirà. Si ricorda infatti che $Q_t = m \cdot r(T_{sat}(T_{gen})) \cdot (x_{sat=1} - x_{sat=u}) + m \cdot c_p \cdot (T_{gen} - T_{sat}(T_{gen}))$, dove T_{sat} è influenzata dalla T_{gen} in quanto il processo di raffreddamento da vapore surriscaldato a vapore saturo secco solitamente è effettuato a pressione costante. Una particolarità di questo esempio è che per rendere in forma matematica la mappa caratteristica si necessita di 4 equazioni che rappresentano la linea nera spessa e le linee A, B, C.

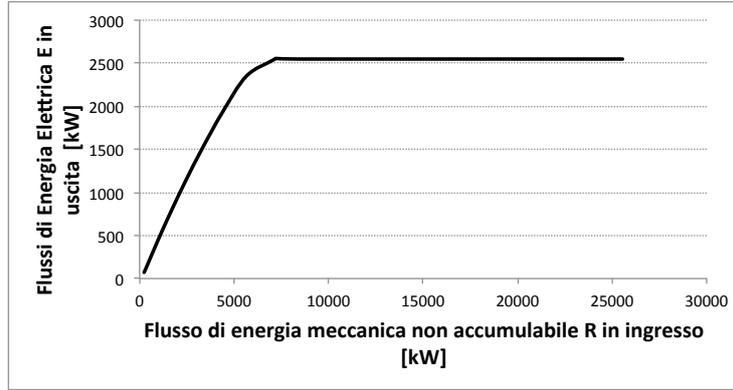
La dipendenza delle mappe caratteristiche da diversi parametri può essere considerata in fase di modellazione introducendo delle equazioni ausiliarie. Tali relazioni possono legare il parametro ai coefficienti che m e q che descrivono la curva linearizzata.

Nel processo di linearizzazione molto volte non risulta conveniente approssimare la curva caratteristica con una singola retta. Qualora, infatti, una mappa presenti un andamento variabile sul suo campo di funzionamento, l'approssimazione mediante una sola retta può generare errori in fase di analisi. Ciò è dovuto al fatto che una curva così linearizzata si discosta troppo dalle condizioni reali e non descrive quindi in maniera corretta il funzionamento dell'unità. Per ovviare a tale problema il processo di linearizzazione può essere svolto su più intervalli consecutivi. Come si può facilmente pensare maggiore sarà il numero d'intervalli, maggiore sarà la correttezza di approssimazione, ovviamente anche i tempi computazionali si incrementeranno proporzionalmente. Il procedimento su ogni intervallo è del tutto analogo a quanto visto per il caso fotovoltaico, l'unica distinzione sarà nell'introduzione di un vincolo che impone alle variabili di poter esistere contemporaneamente solo su un intervallo. Esemplicando si osservi la mappa caratteristica in figura 2.16a che identifica una turbina eolica. Si può facilmente osservare come tale curva abbia un andamento crescente (circa proporzionale al cubo della velocità del vento) fino ad una certa valore della velocità (solitamente la velocità nominale), e all'aumentare della velocità presenti un andamento costante. Tale trend è dovuto al taglio della potenza svolto dai sistemi di regolazione, che limitano la potenza scambiata tra corrente fluida e pala rotorica. Questa operazione è necessaria per proteggere la macchina, in particolare si diminuiscono i carichi statici e dinamici [36].

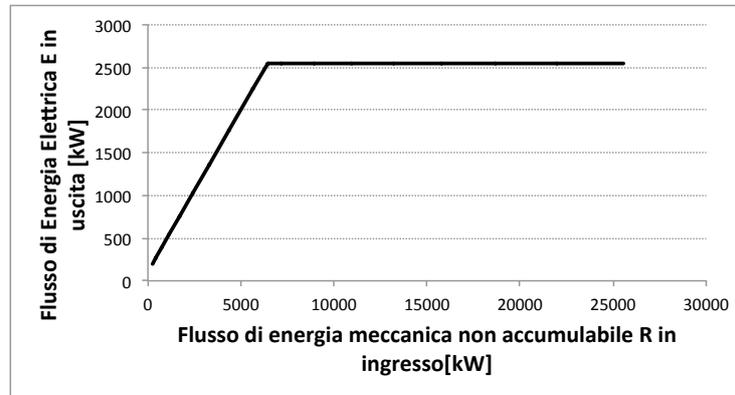
Si prenda, ad esempio, il caso di un turbogeneratore eolico ad asse orizzontale tripala, con diametro del rotore pari a 80m. Limitato da una velocità di cut-in pari a 4 m/s e di cut-out di 20,25 m/s, dimensionato alla velocità nominale di 12,75 m/s. Tale esempio è stato ricavato da uno studio svolto in [19], nel quale la curva caratteristica è stata ricavata in forma tabulare. Riportando tale curva in forma grafica si ottiene la mappa in figura 2.16a.

Come si può vedere la mappa descrivere il rapporto tra la potenza elettrica prodotta e la potenza primaria della corrente ventosa R . Fino al valore pari a $R_n = 6433$ kW la potenza cresce al crescere di R , mentre per valori di $R > R_n$ la potenza elettrica è fissa al valore di 2549 kW. Dunque per l'approssimazione lineare si utilizzeranno due intervalli, $R_{min} \leq R \leq R_n$ e $R_n < R \leq R_{max}$.

I risultati sono espressi in figura 2.16b riportano la curva linearizzata. La modellazione



(a) Mappa caratteristica E - R di un unità P_e rappresentante un impianto eolico



(b) Mappa caratteristica E - R linearizzata di un unità P_e rappresentante un impianto eolico

Figura 2.16: Mappe caratteristiche per un generatore eolico

matematica risulta pari a :

$$E1_{P_e,out} = m1_{P_e} \cdot R_{P_e,in} + q1_{P_e} \cdot \delta1_{P_e} \quad (2.35)$$

$$R_{P_e,min} \cdot \delta1_{P_e} \leq R_{P_e,in} \leq R_{P_e,n} \cdot \delta_{P_e} \quad (2.36)$$

per descrivere il primo segmento di retta e :

$$E2_{P_e,out} = m2_{P_e} \cdot R_{P_e,in} + q2_{P_e} \cdot \delta1_{P_e} \quad (2.37)$$

$$R_{P_e,n} \cdot \delta1_{P_e} \leq R_{P_e,in} \leq R_{P_e,max} \cdot \delta_{P_e} \quad (2.38)$$

per descrivere il secondo tratto. Nel caso in questione nell'intervallo rappresentate il tratto di curva costante il valore di $m2_{P_e}$ sarà pari a zero. La potenza elettrica fornita globalmente dall'impianto sarà data dalla somma $E1 + E2$, sotto la condizione che in uno stesso istante temporale solo una delle due potenze elettriche possa assumere un valore diverso da zero. Questo può essere descritto in termini matematici mediante la disequazione che impedisce di assumere un valore positivo contemporaneamente ad entrambe le variabili binarie.

$$\delta1_{P_e} + \delta2_{P_e} \leq 1 \quad (2.39)$$

Nella pratica, la divisione in più istanti temporali può a tutti gli effetti essere vista come la scomposizione in più macchine elementari, ognuna delle quali operante in quel determinato

intervallo. La condizione 2.39 obbliga, in uno specifico istante temporale, a dover scegliere esclusivamente una di queste.

La mappa caratteristica eolica, come detto in precedenza, presenta un andamento proporzionale al cubo della velocità del vento, di conseguenza l'approssimazione di una cubica con una funzione lineare presenta un errore abbastanza rilevante. Soprattutto nella zona limitrofa alla velocità di cut-in l'errore può assumere un valore anche del 50%. In queste condizioni quindi il comportamento della macchina reale non è bene descritto dalla mappa lineare, per cui è consigliato dividere ulteriormente il numero degli intervalli.

Il problema degli elevati sforzi computazionali legati all'alto numero di intervalli è legato all'introduzione per ognuno di essi di una variabile binaria. Come si vedrà meglio nel capitolo 3 il numero delle variabili binarie influisce direttamente i tempi computazionali. Da qui nasce l'esigenza di utilizzare all'interno del modello il minor numero di variabili binarie possibili.

L'approssimazione mediante più intervalli è effettuata oltre che su mappe caratteristiche rappresentanti il rendimento di trasformazione anche per curve che relazione tra di loro gli output. Esemplicando, si osservi l'impianto in figura 2.17a. che rappresenta una turbina a gas a semplice a recupero di calore, con l'introduzione di un ciclo STIG.

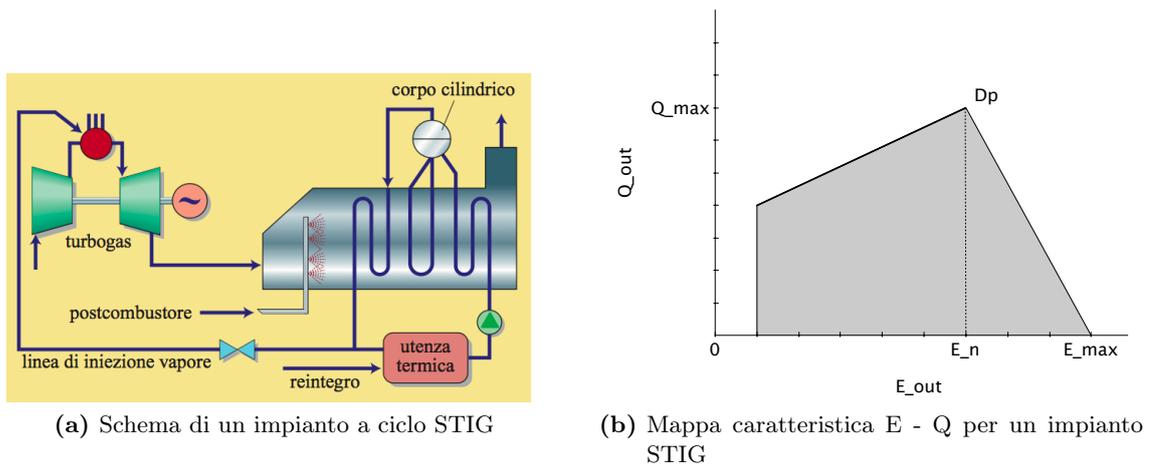
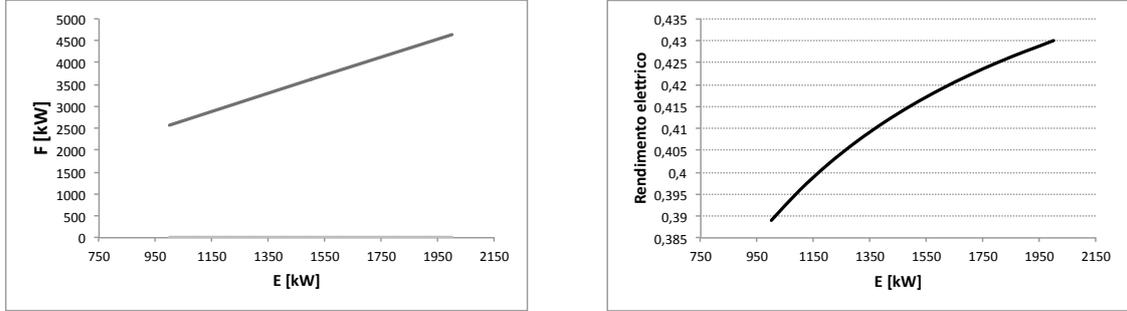


Figura 2.17: Impianto a ciclo STIG

Per il funzionamento dettagliato si rimanda a [21]. Il ciclo stig introduce un grado di libertà in più: parte del vapore (o tutto, se tecnicamente fattibile) prodotto nella caldaia a recupero, invece di essere inviata all'utenza termica, può essere iniettata in camera di combustione, a seconda che si voglia privilegiare la produzione di calore o quella di energia elettrica. Ciò consente una grande flessibilità di funzionamento. La mappa che descrive il rapporto tra i due effetti utili è rappresentata in fig 2.17b. La caratteristica a sinistra della linea tratteggiata che congiunge E_n con D_p è analoga a quella analizzata nel caso del turbogas con bypass. A destra di tale retta la linea di operatività normale si prolunga fino a E_{max} , che rappresenta il funzionamento della turbina a gas, mantenuta a massima potenza, al variare della portata di iniezione di vapore, da zero al massimo. Il punto E_{max} rappresenta il funzionamento nel caso di sola produzione di energia elettrica (tutto il vapore prodotto è iniettato nel combustore e non vi è pertanto produzione di calore), mentre nel punto D_p tutto il vapore è inviato all'utenza termica e la turbina a gas funziona in ciclo semplice; la linea che unisce i due punti rappresenta tutte le soluzioni intermedie. L'area

sottesa dalle varie rette non è più caratterizzata da una dissipazione termica, ma i suoi punti sono ottenibili con un'adeguata regolazione della macchina, sia in termini di portata di combustibile che di vapore iniettato.

La figura 2.17b mostra come la mappa caratteristica si adatta ad una linearizzazione mediante due intervalli compresi tra E_{min} - - - E_n - - - E_{max} .



(a) Mappa caratteristica lineare F - E per un motore a combustione interna

(b) Andamento del rendimento del motore ai carichi parziali

Figura 2.18: Mappa caratteristica e rendimento per un motore a combustione interna

In questo paragrafo si è notato come in molti casi sia possibile approssimare le mappe caratteristiche con funzioni lineari. Le curve che sono state prese in esame rappresentavano sempre rapporti tra i flussi, ingresso-uscita (come nel caso dell'impianto fotovoltaico), uscita-uscita (turbogas). Si vuol precisare che la linearizzazione di tali mappe non comporta un andamento lineare dei parametri di prestazione a cui si riferiscono. Avere una curva F-E lineare non implica che il rendimento elettrico vari linearmente con il carico, o ancora la mappa lineare del turbogas per i flussi E e Q non corrisponde ad un andamento lineare del parametro $c = E/Q$.

Questo è facilmente dimostrabile sfruttando due semplici passaggi matematici. Si prenda il caso di un motore a combustione interna per la produzione di energia elettrica alimentato a gas naturale. Trascurando le perdite, come abbiamo già visto, quest'unità può essere schematizzata mediante un P_e con un flusso F in ingresso e un flusso E in uscita. Per descriverla sono richieste $k-1=2-1=1$ mappe caratteristiche. Tale mappa può essere approssimata da una relazione lineare:

$$F_{P_e,in} = m_{P_e}(p, T, x)_{amb} \cdot E_{P_e,out} + q_{P_e}(p, T, x)_{amb} \cdot \delta_{P_e} \quad (2.40)$$

Trascurando l'influenza dei parametri ambientali si può ricavare il rendimento elettrico tramite la 2.41:

$$\eta_{el} = \frac{E_{P_e,out}}{F_{P_eq,in}} = \frac{F_{P_e,in} - q_{P_e}}{m_{P_e} \cdot F_{P_eq,in}} = \frac{1}{m_{P_e}} - \frac{q_{P_e}}{F_{P_e,in}} \quad (2.41)$$

Si può capire quindi come il rendimento non possa avere caratteristica lineare a causa del secondo termine che presenta al denominatore il flusso F . Nella figura 2.18a è riportata la caratteristica lineare per un motore avente taglia pari a 2000 kW. In questo caso i parametri m_{P_e} e q_{P_e} sono rispettivamente pari a 2,08 e 490,22. Nella figura 2.18b è riportato la curva del rendimento ricavata dall'equazione lineare. Si può facilmente vedere come essa non presenti un andamento lineare. L'andamento reale del rendimento presenta una caratteristica molto più simile a quella descritta in figura 2.18b piuttosto che un andamento lineare.

2.6 Definizione del modello del sistema di conversione

In questo paragrafo si riassumeranno e ordineranno i concetti visti nei paragrafi precedenti, e si presenterà un esempio per mostrare come effettivamente le tipologie e il numero di relazioni individuate possa definire il modello del sistema.

Prima però può risultare utile far una precisazione relativa ai flussi di massa: i risultati ottenuti sono stati ricavati ed esposti in riferimento alla classificazione descritta in 2.1, e in particolar modo relativamente ai flussi di materie prime (M) e di prodotti finiti (W). Tali risultati possono, però essere ritenuti validi per qualsiasi flusso di massa si voglia considerare nel sistema. In modo particolare nei casi in cui si ritenga opportuno considerare separatamente i flussi di massa dai relativi flussi di energia, essi saranno considerati al pari dei flussi M e dei flussi W . Per cui verranno considerati nei bilanci di massa dei componenti, nelle interazioni con l'ambiente, negli eventuali nodi, ecc. e quindi saranno applicabili tutte le considerazioni fatte in questo capitolo. L'unica distinzione è dovuta al fatto che devono essere introdotte nelle equazioni del modello le relazioni che legano questi flussi di massa ai corrispondenti flussi di energia. Ciò significa che ogni flusso di energia che si è deciso di esprimere anche in termini di flusso di massa comporterà un'equazione in più nel modello del tipo 1.1. Queste relazioni esprimono il rapporto tra i due flussi, che come già visto in precedenza, è determinato dall'energia specifica.

Per determinare il modello, e in particolar modo il numero e la tipologia di equazioni necessarie a descrivere un qualsiasi sistema di conversione è utile seguire questi passi:

1. Individuare il numero n_s di sorgenti (e la relativa categoria di appartenenza dei flussi) che interagiscono con il sistema. Inoltre è necessario individuare, per ciascuna sorgente, tutte le interazioni che essa presenta con le diverse unità. Per ogni sorgente dovrà essere inserita nel modello un'equazione del tipo 2.4, che descrive le interazioni tra la sorgente e le diverse unità a cui è collegata.
2. Individuare il numero n_u di utenze (e la relativa categoria di appartenenza dei flussi) che interagiscono con il sistema. Inoltre è necessario individuare, per ciascuna utenza, tutte le interazioni che essa presenta con le diverse unità del sistema, individuare cioè tutte le unità che alimentano la specifica utenza. Per ogni utenza poi, dovrà essere inserita nel modello un'equazione del tipo 2.6, che descrive le interazioni tra la sorgente e le diverse unità a cui è collegata.
3. Individuare tutte le unità di trasformazione che compongono il sistema di conversione. Per ciascuna unità è importante individuare: il numero n e la categoria di appartenenza dei flussi in ingresso, il numero m e la categoria di appartenenza dei flussi uscita e gli eventuali flussi di perdita. Successivamente per ogni unità di trasformazione dovranno essere inserite nel modello del sistema:
 - Un bilancio di Flussi: Bilancio di massa (equazione 2.17) o di Energia (equazione 2.19) a seconda dei flussi coinvolti, se sono presenti entrambi le tipologie di flussi sono richiesti entrambi.
 - $k - 1$ Mappa caratteristiche (relazione 2.20): con $k = n + m$, somma del numero dei flussi in ingresso e del numero dei flussi in uscita
 - Equazioni ausiliari: il numero e la tipologia dipende dallo specifico aspetto o analisi che si vuole evidenziare. Sicuramente saranno espressi i vincoli sui flussi relativi alle mappe caratteristiche.

- Individuare il numero di nodi n_{nodi} e il numero e la categoria dei flussi che interagiscono con ogni nodo. Nel modello dovrà essere inserita per ciascun nodo un'equazione del tipo 2.14.

2.6.1 Esempi di modellazione di sistemi di conversione

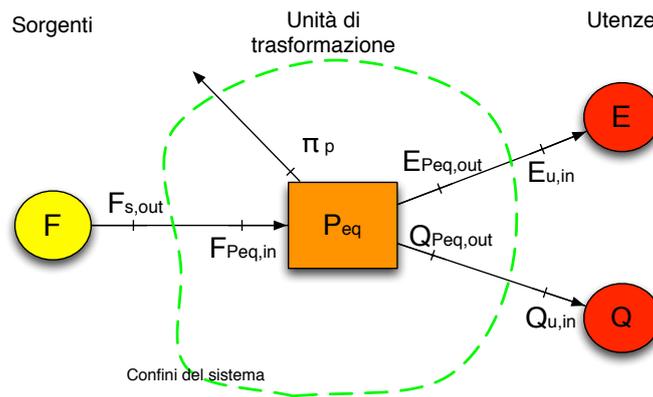


Figura 2.19: Schema di un sistema per il soddisfacimento di un'utenza termica e un'utenza elettrica mediante l'utilizzo di un motore a gas cogenerativo

Se ora si passa ad applicare questo procedimento all'esempio, descritto in figura 2.19, il sistema di conversione è composto esclusivamente da un'unità P_{eq} , che rappresenta un motore a gas cogenerativo. Questo motore preleva dalla rete di distribuzione (Sorgente di flussi F) una portata di metano identificata dal flusso $F_{P_{eq},in}$, per soddisfare due utenze: un'utenza di flussi E e un'utenza termica Q . Tutti i flussi descritti rappresentano dei flussi di energia. Per definire il modello di tale sistema è quindi necessario determinare le relazioni matematiche che descrivono il funzionamento dello stesso. Nella tabella 2.2 sono riassunte il numero e la tipologia di equazioni che devono essere presenti nel modello

Tabella 2.2: Tabella riassuntiva del numero e della tipologia di equazioni necessarie per il modello del sistema di conversione descritto in figura 2.19

| | Numero di interazioni o unità | Tipologia di Equazioni |
|---|-------------------------------|---|
| Interazioni Sorgenti-Unità | $n_s = 1$ | 1 × Bilanci di Energia |
| Interazioni Unità-Utenza | $n_u = 2$ | 2 × Bilanci di Energia |
| Unità di trasformazione 1 input-2 output | numero unità = 1 | 1 × Bilanci di Energia 2 × Mappe Caratteristiche Equazioni Ausiliarie |
| Nodi | $n_{nodi} = 0$ | 0 × Bilancio di Energia |

Interazioni ambiente-Sistema

Sono presenti $n_s = 1$ sorgenti e $n_u = 2$ utenze. Per cui saranno necessarie un'equazione del tipo 2.4 e due equazioni del tipo 2.6. Esse sono

$$\text{Bilancio di Energia Sorgenti-Unit\`a:} \quad F_{s,out}(t) = F_{Peq,in}(t) \quad (2.42)$$

$$\text{Bilancio di Energia Unit\`a-Utenze:} \quad E_{Peq,out}(t) = E_{u,in}(t) \quad (2.43)$$

$$Q_{Peq,out}(t) = Q_{u,in}(t) \quad (2.44)$$

Unit\`a di Trasformazione

Nel sistema \`e presente un sola unit\`a di trasformazione. Tale unit\`a presenta $n=1$ flusso in ingresso e $m=2$ flussi in uscita. Per descrivere tale unit\`a \`e dunque richiesto un bilancio di energia, e $k - 1 = 3 - 1 = 2$ mappe caratteristiche.

$$\text{Bilancio di Energia Unit\`a:} \quad F_{Peq,in}(t) = E_{Peq,out}(t) + Q_{Peq,out}(t) + \pi_{Peq} \quad (2.45)$$

$$\text{Mappe caratteristiche:} \quad \eta_I = \frac{E_{Peq,out} \cdot Q_{Peq,out}}{F_{Peq,in}} = f(E_{Peq,out}, Q_{Peq,out}, p_{amb}, t_{amb}, x_{amb}) \quad (2.46)$$

$$Q_{Peq,out} = f(E_{Peq,out}, p_{amb}, t_{amb}, x_{amb}) \quad (2.47)$$

$$\text{Vincoli:} \quad E_{Peq,min} \leq E_{Peq,out}(t) \leq E_{Peq,max} \quad (2.48)$$

Le mappe caratteristiche sono state descritte nella formula generale, nell'esempio seguente si descriveranno le mappe nella forma linearizzata. Nel sistema non erano previsti nodi per cui $n_{nodi} = 0$.

Si consideri ora lo schema di un sistema pi\`u complesso rappresentato in figura 2.20.

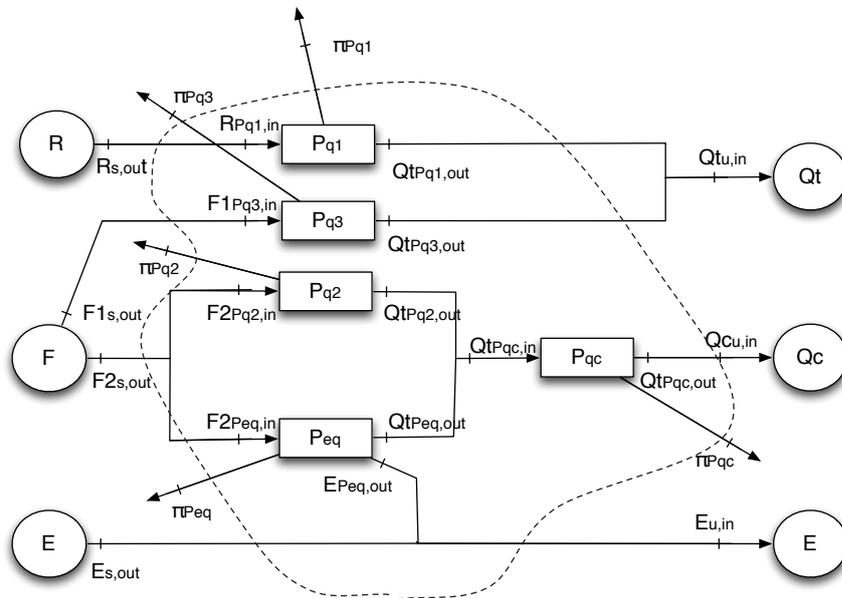


Figura 2.20: Schema di un sistema di conversione composto da diverse unit\`a di trasformazione adibito al soddisfacimento di tre utenze

Si pu\`o vedere come siano presenti tre utenze, quindi $n_u = 3$:

- una richiesta di flussi di energia elettrica E ;

- una richiesta di flussi di riscaldamento Qt ;
- una richiesta di raffrescamento Qc .

Per ciò che concerne le sorgenti si possono evidenziare tre diverse categorie di flussi, in però cui una sorgente fornisce flussi della stessa categoria ma con caratteristiche diverse (vedi par. 1.2). In definitiva $n_s = 4$:

- un flusso di energia non accumulabile R , rappresentata dalla radiazione solare;
- un flusso di energia elettrica E , rappresentata dalla rete di distribuzione;
- due flussi di energia chimica accumulabile $F1$ e $F2$, i due flussi rappresentano due diversi combustibili rispettivamente gasolio e gas naturale.

Il sistema è composta da cinque unità di trasformazione:

- Un impianto solare termico P_{q1} ;
- Una caldaia alimentata a gas naturale P_{q2} ;
- Una caldaia alimentata a gasolio P_{q3} ;
- Un motore a gas cogenerativo P_{eq} ;
- Un gruppo ad assorbimento P_{qc} .

Lo scopo del sistema di conversione è quello di soddisfare le tre utenze prelevando flussi dalle sorgenti e trasformandoli nei flussi richiesti. Se ora quindi si analizza come vengono soddisfatte le utenze si vede che:

- La richiesta di riscaldamento è soddisfatta in parte dal calore generato dall'impianto solare termico e in parte da una caldaia a gasolio. L'impianto solare termico è alimentato dalla radiazione solare e presenta quindi un funzionamento fortemente discontinuo. La caldaia a gasolio entra in funzione quando l'impianto solare non è sufficiente a soddisfare l'utenza.
- La richiesta di raffrescamento è soddisfatta dal gruppo ad assorbimento. Il calore necessario ad alimentare tale unità proviene in parte dal calore di recupero del motore a gas cogenerativo e in parte dalla caldaia a gas.
- La richiesta di energia elettrica è soddisfatta in parte dal motore a gas cogenerativo e in parte dal prelievo di potenza dalla rete di distribuzione.

Per definire il modello di tale sistema è quindi necessario determinare le relazioni matematiche che descrivono il funzionamento dello stesso. Nella tabella 2.3 sono riassunte il numero e la tipologia di equazioni che devono essere presenti nel modello

Si può notare come in questo esempio si siano considerati esclusivamente i flussi di energia. I flussi di massa, infatti, come già detto ampiamente in precedenza sono stati associati ai flussi di energia. Nel seguito verranno descritte nel dettaglio le relazioni che fanno parte del modello, saranno presentate nell'ordine con cui sono state enunciate nella trattazione. I flussi di energia si ipotizza abbiano un andamento variabile nel tempo.

Tabella 2.3: Tabella riassuntiva del numero e della tipologia di equazioni necessarie per il modello del sistema di conversione descritto in figura 2.20

| | Numero di interazioni o unità | Tipologia di Equazioni |
|---|-------------------------------|---|
| Interazioni Sorgenti-Unità | $n_s = 4$ | 4 × Bilanci di Energia |
| Interazioni Unità-Utenza | $n_u = 3$ | 3 × Bilanci di Energia |
| Unità di trasformazione 1 input-1 output | numero unità = 4 | 4 × Bilanci di Energia 4 × Mappe Caratteristiche Equazioni Ausiliarie |
| Unità di trasformazione 1 input-2 output | numero unità = 1 | 1 × Bilanci di Energia 2 × Mappe Caratteristiche Equazioni Ausiliarie |
| Nodi | $n_{nodi} = 1$ | 1 × Bilancio di Energia |

Interazioni ambiente-sistema.

Si può facilmente vedere come i flussi che rappresentano le interazione tra ambiente e sistema siano 3 sul lato delle utenze e 4 sul lato sorgenti e perciò sono richieste 3 equazioni di bilancio del tipo 2.6 e 4 equazioni del tipo 2.4.

$$\text{Bilanci di Energia Unità - Utenze} \quad Qt_{Pq3}(t) + Qt_{Pq1}(t) = Qt_{u,in}(t) \quad (2.49)$$

$$E_{s,out}(t) + E_{Peq,out}(t) = E_{u,in}(t) \quad (2.50)$$

$$Qc_{Pqc,out}(t) = Qc_{u,in}(t) \quad (2.51)$$

$$\text{Bilanci di Energia Sorgenti - Unità} \quad R_{s,out}(t) = R_{Pq1,in}(t) \quad (2.52)$$

$$F1_{s,out}(t) = F1_{Pq3,in}(t) \quad (2.53)$$

$$E_{s,out}(t) = E_{u,in}(t) - E_{Peq,out}(t) \quad (2.54)$$

$$F2_{s,out}(t) = F2_{Pq2,in}(t) + F2_{Peq,in}(t) \quad (2.55)$$

Si vede come l'equazione 2.50 e l'equazione 2.54 siano a tutti gli effetti la stessa equazione e quindi può essere considerata solo una delle due. I vincoli, come detto in precedenza, dipendono dai limiti a cui è soggetto il flusso, e quindi sono fortemente influenzati dal particolare sistema a cui si riferiscono. Vincoli tipici in questo sistema potrebbe essere:

- $F2_{s,out}(t) \leq F_{max}$ dove F_{max} rappresenta il massimo flusso di energia chimica prelevabile dalla rete di distribuzione del metano.
- $\int_{\Delta t} F1_{s,out} dt \leq U_{max}(t)$ con U_{max} identifica la massima energia che può essere prelevata dalla sorgenti nel tempo Δt .

Collegamenti

La modellazione dei collegamenti si è visto dipende dai nodi che sono presenti nel sistema, poiché i collegamenti diretti possono essere trascurati. Nel sistema si ha la presenza di un solo nodo $n_{nodi} = 1$. Il bilancio di energia per tale nodo è espresso dalla:

$$\text{Bilancio di Energia: } Qt_{Peq,out}(t) + Qt_{Pq2,out}(t) = Qt_{Pqc,in}(t) \quad (2.56)$$

Unità di trasformazione In questo esempio si ipotizza di poter approssimare tutte le mappe caratteristiche relative alle diverse unità con delle funzioni lineari. Questo procedimento permette di considerare il modello del sistema lineare.

Unità P_{q1}

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input (n=1), 1 Flusso in output (m=1), 1 Flusso di perdita

$$\text{Bilancio di energia: } R_{Pq1,in}(t) = Qt_{Pq1,out}(t) + \pi_{P,Pq}(t) \quad (2.57)$$

$$\text{Mappa caratteristica: } R_{Pq1,in}(t) = m_{Pq1} \cdot Qt_{Pq1,out}(t) + q_{Pq1} \cdot \delta_{Pq1}(t) \quad (2.58)$$

$$\text{Vincoli: } Qt_{Pq1,min} \cdot \delta_{Pq1}(t) \leq Qt_{Pq1,out}(t) \leq Qt_{Pq1,max} \cdot \delta_{Pq1}(t) \quad (2.59)$$

Unità P_{q2}

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input (n=1), 1 Flusso in output (m=1), 1 Flusso di perdita

$$\text{Bilancio di energia: } F2_{Pq2,in}(t) = Qt_{Pq2,out}(t) + \pi_{P,Pq2}(t) \quad (2.60)$$

$$\text{Mappa caratteristica: } F2_{Pq2,in}(t) = m_{Pq2} \cdot Qt_{Pq2,out}(t) + q_{Pq2} \cdot \delta_{Pq2}(t) \quad (2.61)$$

$$\text{Vincoli: } Qt_{Pq2,min} \cdot \delta_{Pq2}(t) \leq Qt_{Pq2,out}(t) \leq Qt_{Pq2,max} \cdot \delta_{Pq2}(t) \quad (2.62)$$

Unità P_{q3}

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input (n=1), 1 Flusso in output (m=1), 1 Flusso di perdita

$$\text{Bilancio di energia: } F1_{Pq3,in}(t) = Qt_{Pq3,out}(t) + \pi_{P,Pq3}(t) \quad (2.63)$$

$$\text{Mappa caratteristica: } F1_{Pq3,in}(t) = m_{Pq3} \cdot Qt_{Pq3,out}(t) + q_{Pq3} \cdot \delta_{Pq3}(t) \quad (2.64)$$

$$\text{Vincoli: } Qt_{Pq3,min} \cdot \delta_{Pq3}(t) \leq Qt_{Pq3,out}(t) \leq Qt_{Pq3,max} \cdot \delta_{Pq3}(t) \quad (2.65)$$

Unità P_{eq}

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input (n=1), 2 Flusso in output (m=2), 1 Flusso di perdita

$$\text{Bilancio di energia: } F2_{Peq,in}(t) = E_{Peq,out}(t) + Qt_{Peq,out}(t) + \pi_{P,Peq}(t) \quad (2.66)$$

$$\text{Mappa caratteristica: } F2_{Peq,in}(t) = m_{Peq} \cdot E_{Peq,out}(t) + q_{Peq} \cdot \delta_{Peq}(t) \quad (2.67)$$

$$E_{Peq,out}(t) = m1_{Peq} \cdot Qt_{Peq,out}(t) + q1_{Peq} \cdot \delta_{Peq}(t) \quad (2.68)$$

$$\text{Vincoli: } E_{Peq,min} \cdot \delta_{Peq}(t) \leq E_{Peq,out}(t) \leq E_{Peq,max} \cdot \delta_{Peq}(t) \quad (2.69)$$

$$\frac{\partial E_{Peq,out}(t)}{\partial t} \leq \Delta E_{Peq,max} \quad (2.70)$$

Unità P_{qc}

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input (n=1), 1 Flusso in output (m=1), 1

Flusso di perdita

$$\text{Bilancio di energia: } Qt_{P_{qc},in}(t) = Q_{cP_{qc},out}(t) + \pi_{P,P_{qc}}(t) \quad (2.71)$$

$$\text{Mappa caratteristica: } Qt_{P_{qc},in}(t) = m_{P_{qc}} \cdot Q_{cP_{qc},out}(t) + q_{P_{qc}} \cdot \delta_{P_{qc}}(t) \quad (2.72)$$

$$\text{Vincoli: } Q_{cP_{qc},min} \cdot \delta_{P_{qc}}(t) \leq Q_{cP_{qc},out}(t) \leq Q_{cP_{qc},max} \cdot \delta_{P_{qc}}(t) \quad (2.73)$$

Le mappe caratteristiche sono state espresse in forma matematica. Per l'unità P_{eq} si sono espressi i vincoli solamente per il flusso di energia elettrica. Questo è possibile poiché tra i due flussi in uscita da tale unità vi è una corrispondenza biunivoca, e quindi vincolare un flusso equivale a vincolare entrambi. Inoltre sempre per l'unità P_{eq} si è introdotto un vincolo del tipo 2.21 che vincola la massima variazione sul carico elettrico.

Nel modello del sistema sono quindi presenti in totale 18 equazioni:

- 6 equazioni relative gli scambi tra ambiente e sistema.
- 1 equazione relativa al nodo
- 5 bilanci di energia per le unità (1 bilancio ogni unità)
- 6 mappe caratteristiche

Si ipotizza di conoscere il valore delle utenze e che i parametri di prestazione delle diverse unità siano noti. Per cui $Qt_{u,in}(t)$, $Q_{c_{u,in}}(t)$, $E_{u,in}(t)$ sono assunti a parametro così come m_{P_i} , $m_{1_{P_i}}$, q_{P_i} , $q_{1_{P_i}}$. Le variabili del modello sono rappresentate dai restanti flussi e dalle variabili binarie:

- 20 variabili relative ai flussi
- 5 variabili binarie

Il modello in definitiva è formato da 18 equazione e 25 variabili, ciò significa che saranno necessarie 7 variabili indipendenti per descrivere completamente il sistema.

Capitolo 3

Ottimizzazione della configurazione e del funzionamento di un Macro-Sistema

L'ottimizzazione è il processo attraverso il quale si prende una decisione su come ottenere il miglior risultato in circostanze definite. Nel progetto, nella costruzione e durante il funzionamento dei sistemi ingegneristici, devono essere prese molte decisioni di tipo tecnologico o manageriale. Lo scopo ultimo di tutte queste decisioni è sia di minimizzare lo sforzo richiesto che di massimizzare il beneficio desiderato. Poiché lo sforzo richiesto o il beneficio desiderato possono essere espressi come funzioni (chiamate funzioni obiettivo) di certe variabili (chiamate variabili di decisione o libere), l'ottimizzazione può essere definita come il processo di ricerca delle condizioni che danno il minimo o il massimo valore di una o più funzioni matematiche. In questo capitolo si descriveranno i principali metodi di ottimizzazione, evidenziandone le caratteristiche fondamentali e i tipi di problemi ai quali possono essere applicati. Ovviamente ci si concentrerà maggiormente sui principi e sulle metodologie che più spesso si riscontrano nell'ottimizzazione dei sistemi di conversione di fonti energetiche in prodotti utili.

3.1 Introduzione

Nei capitoli precedenti si è visto come per poter studiare un sistema energetico ci si debba avvalere di uno strumento che ne rappresenti la composizione e che permetta di delinearne il funzionamento. Tale espediente è il modello del sistema, che consiste nell'insieme di relazioni matematiche atte a descrivere quest'ultimo. Si è inoltre osservato come il modello del sistema sia fortemente influenzato dalla topologia del sistema stesso, in particolar modo da quali componenti siano presenti, dal loro funzionamento, dalle connessioni reciproche (capitolo 2) e con l'ambiente esterno (capitolo 1).

Nella pratica possono esistere diverse topologie che assolvono alle stesse specifiche, oppure una topologia data può essere gestita in modo differente per soddisfare le medesime richieste. Le diverse soluzioni sono caratterizzate da differenti valori di alcune quantità del modello, che sono definite variabili indipendenti.

Il processo di ottimizzazione interviene proprio nel definire il valore delle variabili

indipendenti che porta ad avere una soluzione migliore rispetto alle altre. L'aspetto fondamentale per la determinazione della soluzione ottima è la scelta del criterio con cui giudicare tutte le differenti soluzioni. Esso è definito solitamente mediante una relazione matematica, definita funzione obiettivo (paragrafo 3.2.2); che nella pratica dei sistemi energetici può esprimere diversi aspetti sia di carattere energetico (ad esempio l'efficienza del sistema), sia di carattere economico (profitto o costo). Come si può facilmente notare i possibili criteri di scelta sono molteplici, e solitamente una soluzione che risulta ottima per uno specifico criterio non lo è altrettanto per gli altri.

Nel processo di ottimizzazione dei sistemi energetici le variabili presenti nella funzione obiettivo sono soggette a determinati limiti. L'insieme di questi vincoli è rappresentato dal modello del sistema, che definisce i valori che le variabili possono e non possono assumere. In letteratura l'ottimizzazione dei sistemi energetici è ampiamente trattata, in particolare si citano per la chiarezza e completezza [1], [2], [3].

La tipologia di variabili e di equazioni utilizzate per definire il modello del sistema e la funzione obiettivo determinano le caratteristiche del problema di ottimizzazione. Nel paragrafo 3.2.1 si elencheranno i differenti problemi di ottimizzazione, osservandone le principali peculiarità. La risoluzione di problemi di ottimizzazione, paragrafo 3.4, non può prescindere da una profonda conoscenza dei metodi risolutivi e delle tecniche semplificative. A tale riguardo ottimi riferimenti sono [3], [4].

Come si vedrà nel paragrafo 3.3 il tipo di analisi che si vuol svolgere su un sistema influenza la scelta di quali grandezze assumere come variabili indipendenti e quali come variabili dipendenti. Gli studi sui sistemi energetici molto spesso riguardano la determinazione: della topologia (analisi di design), del funzionamento (analisi di off-design) o della topologia e del funzionamento (analisi congiunta di design e off design).

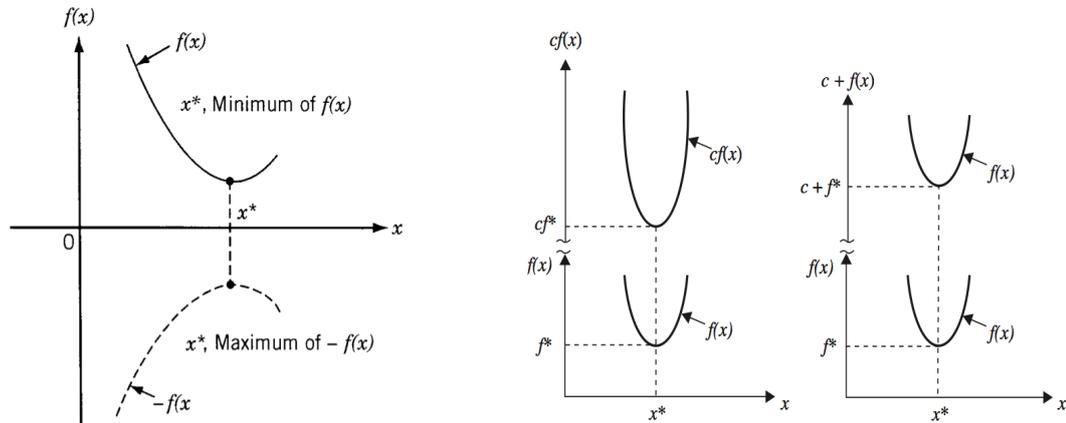
3.2 Problemi di ottimizzazione

In termini generali la teoria dell'ottimizzazione è una branca della ricerca operativa, un campo della matematica che tratta problemi di "decision making", il cui scopo è, dati certi obiettivi, di identificare la soluzione migliore tra un set di alternative senza doverle indagare tutte. I problemi di ottimizzazione possono essere trattati come problemi di individuazione del minimo di una funzione, la funzione obiettivo per l'appunto.

L'individuazione del massimo di una funzione può, infatti, essere risolto ricercando il minimo del negativo della stessa funzione [3]. Si osservi ad esempio la figura 3.1a che rappresenta l'andamento di una generica funzione $f(x)$, nella sola variabile x , e della sua opposta $-f(x)$. Si può osservare come il punto x^* rappresenta l'ascissa in cui la funzione $f(x)$ assume il valore minimo, e, allo stesso tempo la funzione $-f(x)$ il valore massimo. Esistono altre due operazioni che pur modificando la funzione obiettivo non modificano il punto di minimo (massimo):

- Moltiplicazione (o divisione) di $f(x)$ per una costante c ;
- Addizione (o sottrazione) di una costante positiva a (o da) $f(x)$.

Queste due proprietà sono molto utili nei sistemi energetici in quanto permettono di semplificare la funzione obiettivo. La spiegazione grafica è visibile in figura 3.1b, per una trattazione più dettagliata si rimanda a [3].



(a) Funzione da ottimizzare e punto di minimo
 (b) Proprietà di addizione e moltiplicazione per un costante

Figura 3.1: Funzione da ottimizzare e principali proprietà

In termini matematici, il problema di ottimizzazione può assumere varie forme, la seguente è stata proposta da [3] e permette di fare alcune considerazioni circa le analogie con la formulazione del modello di sistemi energetici.

$$\begin{aligned}
 &\text{Trovare } x_1, \dots, x_{n-m} \text{ che minimizzano } z = f(x_1, \dots, x_{n-m}) \\
 &g_1 = g_1(x_1, \dots, x_{n-m}) = 0 \\
 &\text{Soggetta ai vincoli di uguaglianza} \quad : \quad (3.1) \\
 &g_p = g_p(x_1, \dots, x_{n-m}) = 0 \\
 &l_1 = l_1(x_1, \dots, x_{n-m}) \leq L_1 \\
 &\text{e ai vincoli di disuguaglianza} \quad : \\
 &l_q = l_q(x_1, \dots, x_{n-m}) \leq L_q
 \end{aligned}$$

dove il vettore x_1, \dots, x_{n-m} è un vettore di variabili dette indipendenti, $z = f(x_1, \dots, x_{n-m})$ è la funzione obiettivo, funzione, della quale si cerca il punto di minimo e le relazioni $g_i(x_1, \dots, x_{n-m}) = 0$ (con $i = 1, \dots, p$) e $l_j = l_j(x_1, \dots, x_{n-m}) \leq L_j$ (con $j = 1, \dots, q$) sono, rispettivamente, i p vincoli di uguaglianza e i q vincoli di disuguaglianza del problema, con $p + q = m$.

L'obiettivo di questo capitolo è di presentare i problemi di ottimizzazione e i metodi risolutivi per poterli applicare ai sistemi energetici, e non di fare un'analisi approfondita delle medesime tematiche.

Come si vedrà più nel dettaglio nel paragrafo 3.3 nell'ottimizzazione di un sistema energetico il vettore x_1, \dots, x_{n-m} , che compare nella 3.1, è il vettore delle $n - m$ variabili indipendenti (con n numero di tutte le variabili, indipendenti e non); l'insieme delle equazioni $g_i(x_1, \dots, x_{n-m}) = 0$ e $l_j = l_j(x_1, \dots, x_{n-m})$ è il vettore F delle m equazioni del modello del sistema energetico.

In quest'ottica nell'ottimizzazione non si assegna un valore alle variabili indipendenti del modello, esse vengono lasciate libere di assumere valori scelti da appositi algoritmi i quali cercano, tramite procedure iterative, il valore delle variabili indipendenti che minimizzano la funzione obiettivo. I principali algoritmi di ottimizzazione verranno brevemente discussi nel paragrafo 3.4. L'ottimizzazione corrisponde, quindi, a una serie di simulazioni ripetute

del modello del sistema al variare del valore delle variabili indipendenti.

Solitamente, per evitare che il problema di ottimizzazione assuma una complessità eccessiva, alcune variabili indipendenti vengono fissate a parametro (tale scelta deriva da varie considerazioni: ingegneristiche, economiche, ecc.), tutte le rimanenti lasciate libere sono definite variabili di decisione (o libere).

La formulazione 3.1 può essere ricondotta ad una forma più generale che consideri solo le variabili di decisione, proposta da [3], [4], [37], che per comodità viene qui definita standar:

$$\begin{aligned} \text{Trovare } x \in \mathfrak{R} \text{ che minimizzano } f(x) \text{ soggetta a} \\ g_i(x) = 0 \quad \text{con } i = 1, \dots, p \\ l_j(x) \geq 0 \quad \text{con } j = 1, \dots, q \end{aligned} \quad (3.2)$$

dove x è il vettore a n dimensioni delle variabili di decisione, $f(x)$ rappresenta sempre la funzione obiettivo, e $g_i(x)$ e $l_j(x)$ rappresentano i vincoli di uguaglianza e disuguaglianza. La soluzione del problema sarà un vettore x^* che ottimizza la funzione obiettivo $f(x)$ e non viola nessuno dei vincoli.

Il problema di ottimizzazione pertanto consiste nel determinare, mediante una serie di simulazioni ripetute del modello, i valori delle variabili di decisione, vincolate entro i campi di esistenza espressi dai vincoli di uguaglianza e disuguaglianza, che identificano il punto di minimo della funzione obiettivo. Per la formulazione del problema si possono seguire questi quattro step come analizzato in [13]:

1. Definire chiaramente i confini del sistema da ottimizzare. Si può fare un discorso analogo a quanto fatto nella fase di modellazione del sistema. La scelta dei confini del sistema non deve essere né troppo restrittiva, in quanto si devono includere tutte le unità che influenzano fortemente il comportamento del sistema, né troppo ampia, per evitare di complicare eccessivamente e inutilmente il modello. In molti casi è possibile dividere sistemi complessi in sistemi più semplici e applicare separatamente l'ottimizzazione; ma non è possibile avere la certezza che la soluzione ottima così trovata coincida con l'ottimo per il sistema complesso.
2. Costruire un modello del sistema reale. Questa fase è abbastanza critica, e può influire fortemente sui risultati dell'ottimizzazione. È d'uopo ricordare quindi come avere modelli corretti sia il primo passo per raggiungere dei risultati che possano avere un riscontro nella pratica. Le simulazioni dei componenti del sistema sono passaggi preliminari per ottimizzare un sistema in quanto necessarie a definire il comportamento del sistema nel suo complesso in un ampio range di condizioni operative. Infatti, un sistema ottimizzato nelle condizioni di progetto può non essere ottimo in condizioni di fuori progetto [13]. Il grado di dettaglio è scelto in funzione al tipo di analisi e all'ampiezza del sistema (paragrafo 1.1), ciò non toglie che alcuni sottoinsiemi del sistema possano essere analizzati con un grado di dettaglio superiore o inferiore, a seconda che il loro comportamento influenzi fortemente o minimamente il funzionamento del sistema. Quest'ultima fase è già stata ampiamente trattata nei capitoli precedenti.
3. Definire la funzione obiettivo: definire il criterio per valutare e classificare le differenti soluzioni. Questo concetto sarà analizzato più nel dettaglio nel paragrafo 3.2.2.

4. Scegliere le variabili di decisione. La scelta delle variabili di decisione ricade sulle $m - n$ variabili indipendenti del sistema. Usualmente nella scelta si considerano le variabili che esercitano un'influenza maggiore sul comportamento del sistema, tenendo presente le variabili i cui valori sono fissati da fattori esterni ai confini del sistema. Tale aspetto sarà analizzato nel paragrafo 3.4

Dopo aver formulato correttamente il problema di ottimizzazione, e quindi aver definito con esattezza confini e modello del sistema, funzione obiettivo e variabili di decisione, è necessario determinare la categoria di appartenenza del problema di ottimizzazione. I diversi tipi di problemi sono classificati nel paragrafo successivo. Classificare correttamente il problema di ottimizzazione è un punto focale, poiché ogni diversa tipologia di problema sfrutta metodologie di risoluzione differenti. Un errore di valutazione in questa fase può comportare la non risoluzione del problema.

3.2.1 Classificazione dei problemi di ottimizzazione

I problemi di ottimizzazione possono essere classificati in diversi modi, come descritto nel seguito [3]:

- Classificazione basata sull'esistenza dei vincoli. Il problema di ottimizzazione visto nella formulazione 3.2 è definito problema di ottimizzazione vincolata, in relazione alla presenza dei vincoli di uguaglianza $g_i(x)$ e di disuguaglianza $l_j(x)$. Esistono tuttavia problemi che non prevedono alcun vincolo, problemi di ottimizzazione non vincolata. La formulazione è analoga alla 3.2 in cui però non sono presenti i termini $g_i(x)$ e $l_j(x)$. Tali problemi presentano una risoluzione più semplice rispetto ai precedenti.
- Classificazione basata sulla natura delle variabili di decisione. Si possono distinguere due categorie. Nella prima categoria s'identificano i problemi di ottimizzazione parametrica o statica in cui la soluzione è un set di variabili di decisione che minimizza la funzione obiettivo sotto l'azione di vincoli assegnati. Nella seconda categoria, invece, si incontrano i problemi di ottimizzazione dinamica. In questo caso la soluzione, che minimizza la funzione obiettivo sotto l'azione di vincoli assegnati, è costituito da un set di funzioni continue di alcuni altri parametri (un esempio è il tempo). In altre parole la soluzione è un set di andamenti temporali delle variabili di decisione che minimizza la funzione obiettivo e assolve a tutti i vincoli assegnati.
- Classificazione basata sulla natura delle equazioni coinvolte. In questa classificazione si considera la tipologia di equazioni, sia i vincoli che la funzione obiettivo, presenti nel problema. Di conseguenza si potranno presentare problemi lineari, non lineari, di programmazione geometrica o quadratica.

Nonlinear programming problem (NLP). È il problema più generale in cui si possono far ricadere anche i restanti casi. In questa classe si ha la presenza di almeno un'equazione non lineare, e che quindi potrà prevedere la moltiplicazione o la divisione tra due variabili, o ancora l'elevazione al potenza n-esima, una funzione logaritmica, esponenziale, sinusoidale, ecc.

Geometric Programming Problem. In questo caso almeno un'equazione è del tipo

$$H(x) = c_1(x_1^{a_{11}} \cdot x_2^{a_{12}} \dots x_n^{a_{1n}}) + \dots + c_n(x_1^{a_{n1}} \cdot x_2^{a_{n2}} \dots x_n^{a_{nn}})$$

Quadratic Programming Problem in tali problemi si possono identificare una o più relazioni del tipo:

$$F(x) = c + \sum_i^n (q_i \cdot x_i) + \sum_i^n \sum_j^n Q_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$$

Linear Programming Problem (LP). In questo caso tutte le equazioni sono lineari e cioè prevedono esclusivamente la somma o la sottrazione tra le variabili, ed eventualmente la moltiplicazione o divisione delle variabili per delle costanti.

- Classificazione sui valori permessi alle variabili di decisione. La distinzione è fatta sulla tipologia di variabili presenti nel problema: se almeno una delle variabili di decisione può assumere solo valori interi, il problema è di programmazione intera altrimenti è un problema di programmazione a valori reali.
- Classificazione sulla natura deterministica delle variabili di decisione. Si possono individuare problemi di natura stocastica se qualcuno o tutti i parametri (variabili di decisione e/o parametri preassegnati) assumono carattere probabilistico (non deterministico o stocastico). Nei restanti casi si parlerà di problemi deterministici.
- Classificazione basata sulla separabilità della funzioni. Un problema è separabile se sia la funzione obiettivo che i vincoli possono essere espressi come somma di funzioni che dipendono da una sola delle variabili di decisione. Altrimenti il problema non è separabile.
- Classificazione basata sul numero delle funzioni obiettivo. In relazione al numero di funzione obiettivo da minimizzare si distinguono in programmazione a singolo o a multi obiettivo.

Nella pratica è ovvio che uno specifico problema di ottimizzazione possa assumere più di una delle caratteristiche sopra elencate.

Per ciò che concerne i problemi di ottimizzazione nel campo dei sistemi energetici, essi sono vincolati, in quanto come già detto in precedenza, il modello, che rappresenta il sistema in esame, è identificato dai vincoli del problema. Per le altre caratteristiche presentate è difficile identificare una linea comune per descrivere tutti i problemi riguardanti i sistemi energetici, poiché la casistica è molto ampia. Tipicamente i problemi sono di tipo non lineare con variabili in funzione del tempo, e di conseguenza si utilizza una programmazione dinamica non lineare. Tuttavia una delle semplificazioni che spesso si accetta nei problemi di ottimizzazione di sistemi energetici è di utilizzare solo equazioni lineari per poter utilizzare una programmazione di tipo lineare; ciò come si vedrà nel seguito, permette di semplificare molto il problema e di utilizzare differenti algoritmi che risultano meno complessi. Molto spesso per la determinazione della topologia di un sistema, ma anche per identificare il miglior funzionamento dello stesso, vengono utilizzate delle variabili binarie (e quindi intere) per rappresentare la condizione di accensione e spegnimento di un unità o la sua presenza all'interno del sistema, questo concetto è stato già introdotto nel paragrafo 2.4.1, in merito alle curve caratteristiche. Nel proseguo della trattazione si analizzeranno con maggior frequenza i problemi dinamici lineari e non lineari che presentano una o più variabili binarie, e saranno identificati dall'acronimo MI(N)LP, Mixed Integer (Non) Linear Programming.

3.2.2 Ottimizzazione mono e multi-obiettivo

Una fase chiave del processo di ottimizzazione è definire il criterio con il quale poter classificare le diverse soluzioni e di conseguenza sceglierne la migliore. La decisione del criterio deriva da considerazione di varia natura, solitamente è strettamente e direttamente collegata allo scopo dell'analisi del sistema. Ad esempio se si vuol valutare la sostituzione di un componente con uno più performante si utilizzerà come criterio di decisione la convenienza economica dell'operazione, e in particolare quale beneficio comporti l'installazione del nuovo componente a fronte della spesa sostenuta per l'acquisto. Per descrivere in termini matematici il criterio scelto ci si avvale di una particolare funzione definita funzione obiettivo [3]. Nella pratica ingegneristica i criteri che si presentano nell'ottimizzazione dei sistemi energetici sono di natura [13]:

- **Termodinamica:** dove si tengono in considerazione le prestazioni termodinamiche del sistema. In particolare si fa riferimento alla massimizzazione del rendimento complessivo, alla massimizzazione di uno o più flussi (ad esempio potenza elettrica e/o calore), o ancora minimizzazione delle perdite exergetiche.
- **Economica:** si tengono in considerazione i costi e i profitti associati ai vari componenti e al sistema stesso. Solitamente si considera o la minimizzazione dei costi o la massimizzazione del profitto sia in termini assoluti sia in termini unitari (per unità di tempo). In questa categoria possono ricadere anche tutti i criteri utilizzati per la valutazione degli investimenti: tempo di recupero, valore attuale netto, indice di profittabilità, tasso interno di profittabilità [38].
- **Ambientale:** si valutano le emissioni (solide, liquide e gassose) del sistema nell'ambiente. Un esempio è la minimizzazione dell'impatto ambientale, è molto utilizzata per i sistemi dove sono previsti per legge dei limiti molto stringenti sulle emissioni.
- **Termoeconomica:** valutano in modo combinato sia l'aspetto termodinamico, e quindi relativo ai parametri prestazionali, sia quello economico. Le funzioni sono generalmente definite associando un costo monetario ai flussi di massa ed energia del sistema, includendo quindi implicitamente informazioni relative al rendimento termodinamico attraverso i flussi di costo del combustibile. L'uso di parametri prestazionali termodinamici è trattato ampiamente in letteratura, ad esempio si può citare [39][40] [26];
- **Altra natura:** valutano altri aspetti tipici dei sistemi di conversione, ad esempio valutazioni riguardanti il peso, le dimensioni, il posizionamento o il layout del sistema.

Nel paragrafo 3.2 si è sottolineata l'importanza della scelta delle variabili di decisione. Una possibile conferma della scelta fatta si può avere valutando se le variabili di decisione compaiono, direttamente o indirettamente, nella funzione obiettivo. In pratica ciò significa valutare se ad una variazione nei valori di una variabile di decisione è associata una variazione nel valore della funzione obiettivo. La funzione obiettivo deve quindi essere funzione delle variabili di decisione.

In molti casi sia in fase di progetto sia in fase di funzionamento si desidererebbe avere dei sistemi che siano ottimi sotto più punti di vista. Ad esempio un desiderio innato negli ingegneri è quello di disporre di sistemi con alte prestazioni (rendimento) e a basso costo; ciò però difficilmente si verifica nella pratica poiché i sistemi più performanti sono anche

quelli più costosi. Un discorso simile si ha paragonando gli aspetti economici, ad aspetti ambientali. La riduzione o l'abbattimento delle emissioni presentano costi non trascurabili nel bilancio economico del sistema. Si pensi ad esempio a tutti i componenti (elettrofiltri, filtri a manica) e/o alle procedure (ottimizzazione del processo di combustione, macinazione fine del polverino di carbone o ottima atomizzazione dell'olio combustibile [41] necessarie ad una centrale termoelettrica per limitare gli inquinanti. Ad ogni procedura e ad ogni componente sono associati: costi di installazione, costi di funzionamento, costi di manutenzione, ecc. i quali vanno a gravare sul bilancio economico del sistema.

Si può vedere quindi come criteri diversi applicati ad uno stesso sistema presentino soluzioni ottime in contrasto tra loro; in molti casi anzi la soluzione ottima per un obiettivo risulta tra le peggiori per un altro.

Una possibilità per superare questo ostacolo è utilizzare un'ottimizzazione multi-obiettivo. Un problema di ottimizzazione multi-obiettivo richiede di soddisfare contemporaneamente un certo numero di obiettivi diversi e spesso contrastanti tra loro. Le funzioni obiettivo associate a ciascun criterio possono essere (in)dipendenti e/o incommensurabili (non possedere alcun sottomultiplo in comune) tra loro. Nella progettazione dei sistemi energetici, ad esempio, il rendimento termico e il denaro speso nell'unità di tempo (flusso di cassa) possono avere scarsa dipendenza reciproca. Questo rende difficile individuare un criterio univoco per considerare tutti gli obiettivi prefissati, ed è quindi necessario utilizzare una differente metodologia per identificare il compromesso ottimo tra gli obiettivi considerati. Matematicamente, un problema di ottimizzazione multi-obiettivo con m obiettivi e n variabili di decisione comporta la minimizzazione delle componenti di un vettore di funzioni [13], [3] e non più di una sola funzione. La forma generale di un problema di ottimizzazione multi-obiettivo è quindi

$$\text{Trovare } x \in \mathfrak{R} \text{ che minimizzano } F(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x)) \quad (3.3)$$

Il problema può essere soggetto o meno a vincoli di uguaglianza e disuguaglianza. F è la funzione di valutazione che mappa i punti dello spazio \mathfrak{R}^n delle variabili di decisione $x = (x_1, \dots, x_n)$ nei punti dello spazio \mathfrak{R}^m delle funzioni obiettivo. Come detto in precedenza l'esistenza di un ottimo globale per un problema di ottimizzazione multi-obiettivo è assai improbabile: questo significa che non esiste una combinazione di valori delle variabili di decisione che minimizza contemporaneamente tutte le componenti del vettore F . Le soluzioni di un problema di ottimizzazione multi-obiettivo sono solitamente infinite, e i punti corrispondenti nello spazio delle funzioni obiettivo rappresentano i migliori compromessi possibili tra gli obiettivi in contrasto.

Il modo più semplice per trattare un problema del tipo definito nella 3.3 è di combinare linearmente le funzioni obiettivo del vettore $F(x)$ in una sola in modo da ottenere un solo criterio di scelta e ridurre il problema ad un'ottimizzazione mono-obiettivo. Pertanto, se $f_1(x)$ e $f_2(x)$ sono le due funzioni obiettivo scelte ($F(x) = (f_1(x), f_2(x))$), si costruisce una nuova funzione obiettivo (complessiva) da ottimizzare definita come:

$$f(x) = \alpha_1 \cdot f_1(x) + \alpha_2 \cdot f_2(x) \quad \text{dove} \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (3.4)$$

α_1 e α_2 sono coefficienti costanti il cui valore indica l'importanza (peso) relativa di una funzione obiettivo rispetto all'altra. Questo approccio permette di trovare una sola soluzione di un problema di ottimizzazione multi-obiettivo per una singola coppia di valori dei pesi α_1 e α_2 . Al variare dei valori di α_1 e α_2 si possono determinare più soluzioni che sono egualmente ottime per entrambi gli obiettivi $f_1(x)$ e $f_2(x)$. In termini più completi,

l'approccio multi-obiettivo usa il concetto di dominanza di Pareto per individuare il compromesso ottimo tra gli obiettivi considerati. L'ottimalità di Pareto [13] è il concetto chiave per stabilire una gerarchia tra le soluzioni di un problema di ottimizzazione multi-obiettivo, con lo scopo di determinare se una soluzione rappresenta o meno uno dei compromessi ottimi. La dominanza di Pareto dice che un vettore $u = (u_1, \dots, u_m)$ nello spazio \mathbb{R}^m delle funzioni obiettivo domina $v = (v_1, \dots, v_m)$ se e solo se tutte le componenti di u sono minori o uguali delle componenti di v e almeno una componente di u è strettamente minore della corrispondente componente di v , ovvero:

$$u_j \leq v_j \text{ per } j = 1, \dots, m$$

$$u_k < v_k \text{ per almeno un } k \in (1, \dots, m)$$

Quindi una soluzione $x = (x_1, \dots, x_n)$ di un problema di ottimizzazione multi-obiettivo viene detta ottima nel senso di Pareto rispetto all'intero spazio \mathbb{R}^n delle variabili di decisione se e solo se non esiste un'altra soluzione $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$ per la quale $F(x^*) = (f_1(x^*), \dots, f_m(x^*))$ domini $F(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))$. L'insieme dei vettori corrispondente all'insieme delle soluzioni ottimali di Pareto nello spazio \mathbb{R}^m delle funzioni obiettivo è detto fronte di Pareto.

La determinazione del fronte di Pareto permette di individuare tutte le soluzioni che sono egualmente ottime per tutti gli obiettivi del vettore $F(x)$ e quindi permette di operare una scelta in funzione del peso che si intende dare ad ogni obiettivo.

Si può, quindi, facilmente capire come la prima metodologia (espressa nella 3.4) sia insita nel metodo di Pareto, in quanto il fronte di Pareto esprime il valore delle funzioni obiettivo al variare dei diversi pesi (nel esempio precedente α_1 e α_2).

Un modo per approssimare il fronte di Pareto, infatti, è quello di discretizzarlo svolgendo n ottimizzazioni della funzione in (pb:bioob) con n differenti combinazioni dei parametri α_1 e α_2 . Ovviamente maggiore sarà il numero n più il fronte di Pareto discretizzato si avvicinerà alla soluzione continua.

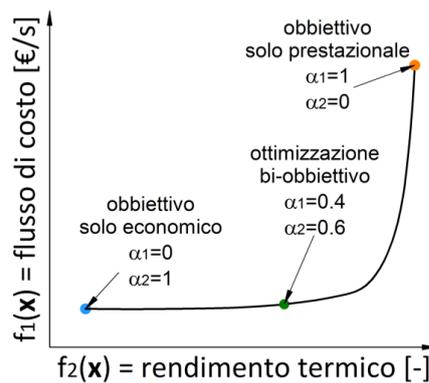


Figura 3.2: Fronte di Pareto

Si consideri ad esempio i risultati dell'ottimizzazione bi-obiettivo di un sistema energetico visibili in figura 3.2. Il primo obiettivo, economico, è la minimizzazione dei flussi di costo legati ad investimenti, manutenzione e consumo di combustibile; il secondo, prestazionale, è la massimizzazione il rendimento termico. La soluzione in azzurro corrisponde al minimo flusso di costo, mentre la soluzione in arancio indica il massimo rendimento

termico del sistema.

Tutte le soluzioni intermedie, che non verrebbero prese in considerazione in ottimizzazioni mono-obiettivo (economico o prestazionale), costituiscono il fronte di Pareto e sono parimenti ottime rispetto ad entrambi gli obiettivi e potrebbero essere importanti nel processo di decisione. Come detto poc'anzi il fronte di Pareto è ottenibile anche utilizzando un approccio mono-obiettivo, in cui ciascun coefficiente α_1 e α_2 è fatto variare tra 0 e 1. Ad esempio la soluzione intermedia indicata in verde corrisponde all'aver assegnato un peso $\alpha_1 = 0,4$ alla funzione obiettivo economica $f_1(x)$ e un peso $\alpha_2 = 0,6$ alla funzione obiettivo prestazionale $f_2(x)$. Si noti che l'andamento del fronte di Pareto è piuttosto piatto nella zona vicina all'ottimo economico, questo significa che per un modesto incremento del flusso di costo si può ottenere un grosso incremento del rendimento termico. Questa è una soluzione che può risultare conveniente e che non verrebbe presa in considerazione se si fosse fatta un'ottimizzazione con solo obiettivo economico.

3.3 Ottimizzazione nel campo dei Macro-Sistemi

Generalmente nei sistemi energetici i processi di ottimizzazione possono essere distinti in tre livelli [10]:

1. *Sintesi*: dove si decide l'ottima composizione del sistema e quindi quali componenti devono essere presenti e le loro connessioni (reciproche e con l'ambiente esterno).
2. *Design*: dove si individuano le caratteristiche ottime dei componenti e dei flussi presenti nel sistema nelle condizioni di progetto, altresì dette nominali.
3. *Funzionamento*: dove si ricerca l'operatività ottima del sistema, già definito nei componenti e nelle connessioni.

Un particolare sistema energetico può essere sottoposto ad uno o più livelli di ottimizzazione a seconda del tipo di analisi che si desidera svolgere. Se ad un sistema vengono applicati tutti e tre i livelli si parla di ottimizzazione completa. Fig 3.3.

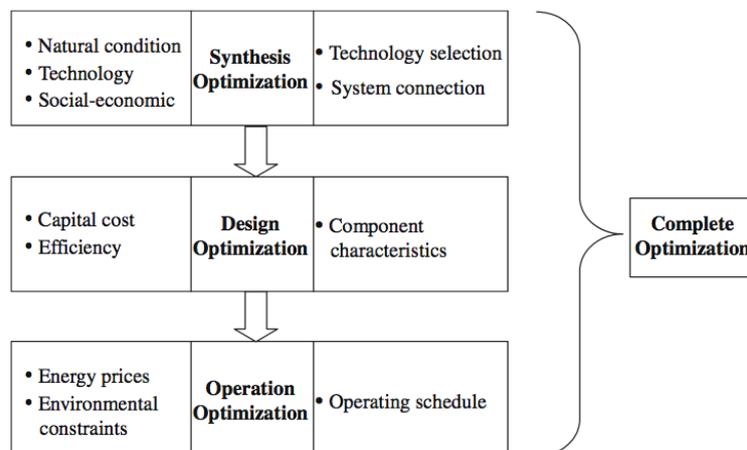


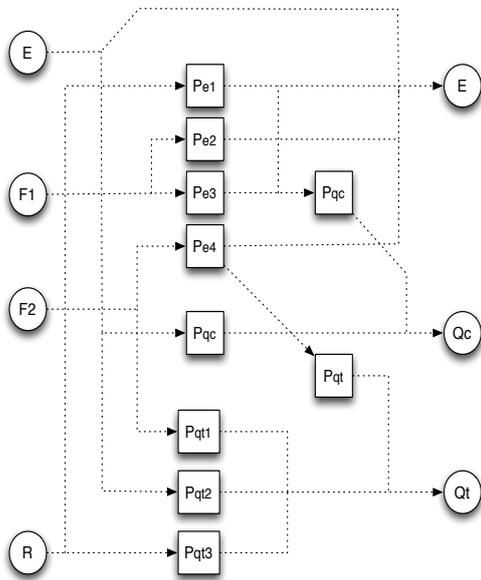
Figura 3.3: Processo di ottimizzazione completa: Sintesi, Progetto, Funzionamento

Molto spesso come si vedrà nel capitolo 5 vengono svolte ottimizzazioni congiunte di sintesi e di design, per determinare la composizione completa del sistema, o di design e funzionamento per ottimizzare i componenti non soltanto in riferimento alle condizioni nominali, ma su tutto il campo di operatività. Nel paragrafo 3.2 si sono analizzati gli elementi generali per preparare un processo di ottimizzazione (una funzione obiettivo, un insieme di variabili di decisione, un modello che lega le variabili del sistema). Ogni livello di ottimizzazione influisce su tutti e tre questi aspetti, ma in particolar modo sulla scelta delle variabili di decisione. Nell'ottimizzazione di sintesi per i sistemi di conversione le variabili di decisione sono quelle che determinano la presenza o meno di un componente e/o di un collegamento all'interno di un sistema. Come già visto nel capitolo 2 tali variabili solitamente sono variabili binarie. In molti casi però, oltre a determinare la presenza del componente se ne vuol specificare le caratteristiche, in particolar modo la taglia; utilizzando quindi un'ottimizzazione congiunta di design e sintesi. In questo caso quindi le variabili di decisione sono oltre alle variabili binarie anche quelle che determinano la taglia del componente, nella nostra analisi solitamente sono rappresentate dal massimo valore dei flussi di massa o energia in uscita da un componente. Infine nell'ottimizzazione di funzionamento si assumono come variabili di decisione alcuni flussi di energia e/o di massa. Non è necessario assumere come variabili di decisione tutti i flussi presenti nel sistema, poiché, come già visto nel paragrafo 2.4, i flussi all'interno del sistema sono legati tra loro da specifiche relazioni matematiche che sono considerate nel modello. Il numero di variabile di decisione ovviamente sarà scelto in relazione ai gradi di libertà del sistema, concetto che sarà analizzato meglio nel paragrafo 3.4.2.

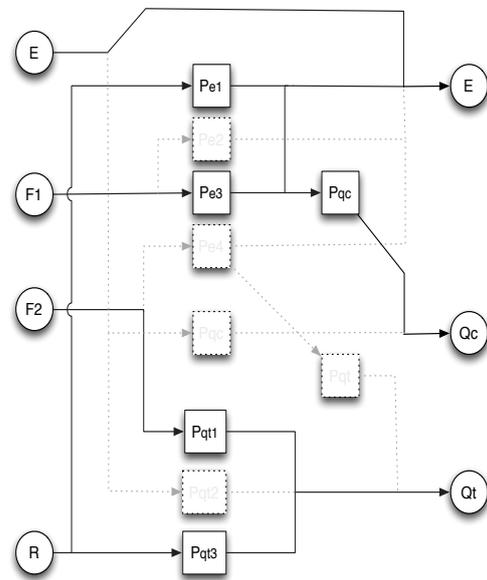
La funzione obiettivo, come visto nel paragrafo precedente, è fortemente influenzata dallo scopo dell'analisi a cui si vuol sottoporre il sistema; cioè dal motivo per cui si rende necessario svolgere l'ottimizzazione. Inoltre si è anche detto come tale funzione debba essere in relazione diretta con le variabili di decisione del sistema; e quindi l'influenza del livello di ottimizzazione sulla scelta delle variabili di decisione viene trasmessa anche alla funzione obiettivo.

Come già noto dal capitolo 2 il modello del sistema può essere determinato in relazione alla composizione dello stesso. Per cui per le ottimizzazioni di design e di funzionamento il modello può essere ricavato senza problemi poiché la topologia del sistema è nota. Nell'ottimizzazione di sintesi, invece, la composizione del sistema non è nota, e anzi è proprio ciò che si vuol determinare. In questo caso il modello del sistema dovrà rappresentare non solo la composizione finale del sistema, ma il set di possibili composizioni che si vorranno mettere a confronto. Sarà poi l'ottimizzatore a definire il layout del sistema individuando il valore delle variabili indipendenti che determina l'ottimo per il criterio fissato.

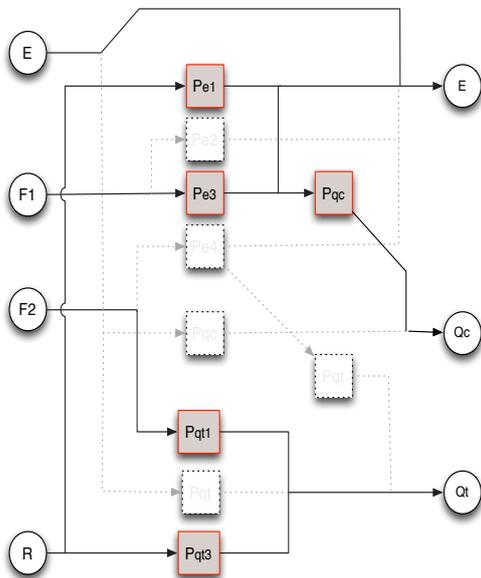
Nella figura 3.4 è evidenziato in modo grafico un possibile procedimento di ottimizzazione completa. In figura 3.4a si possono vedere tutti i possibili componenti e i possibili collegamenti che si è deciso di inserire nel set di soluzioni fattibili per definire la topologia del sistema. In figura 3.4b sono riportati i risultati dell'ottimizzazione di sintesi, i componenti e i collegamenti scelti sono contraddistinti dal tratto continuo nero. L'ottimizzazione di design in questo caso ha lo scopo di definire le caratteristiche dei componenti (taglia, rendimento, ecc) note alcune condizioni nominali (ad esempio il carico nominale), figura 3.4c. La figura 3.4d evidenzia un'ottimizzazione di funzionamento in cui col tratto continuo rosso indicati alcuni possibili flussi assunti come variabile di decisione. In questa analisi partendo da dei dati noti (come potrebbero essere le richieste e/o le risorse) si vuol determinare il valore delle variabili di decisione che definisce l'ottimo per il criterio scelto.



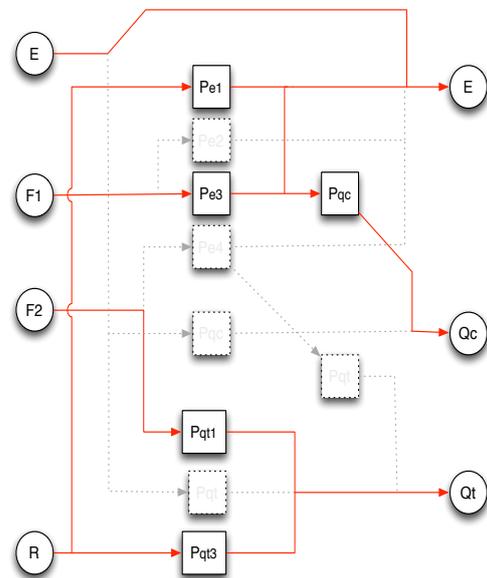
(a) Schema generale di un sistema di conversione da sottoporra ad ottimizzazione completa



(b) Risultati dell'ottimizzazione di Sintesi



(c) Risultati dell'ottimizzazione di Progetto



(d) Risultati dell'ottimizzazione di Funzionamento

Figura 3.4: Rappresenazione grafica di un generico probleme di ottimizzazione completa

3.4 Review sui principali metodi di ottimizzazione

Ogni differente tipologia di problema può far affidamento su una o più metodologie per la sua risoluzione, in quanto non esiste un singolo metodo disponibile per risolvere tutti i problemi di ottimizzazione in modo efficiente

Un certo numero di metodi di ottimizzazione (noti come tecniche di programmazione matematica) è stato sviluppato per risolvere diversi tipi di problemi (ad es. tecniche di programmazione lineare, quadratica, dinamica, stocastica, intera, intera mista, algoritmi evolutivi, ecc.). La forza di tali metodi risiede nell'uso di concetti matematici abbastanza semplici, spesso organizzati in procedure iterative che eseguono dei calcoli secondo uno schema logico rigoroso e tale da poter essere implementato facilmente in routine di calcolo. I principali metodi di ottimizzazione, e le loro caratteristiche, sono [13], [3]:

1. *Metodi analitici (o classici)*: I metodi classici di ottimizzazione sono utili per trovare la soluzione ottimale di funzioni continue e derivabili. Questi metodi sono analitici e fanno uso delle tecniche di calcolo differenziale nel localizzare i punti ottimali. Poiché alcuni dei problemi pratici coinvolgono funzioni obiettivo che non sono continue e / o derivabile, le tecniche di ottimizzazione classiche hanno un ambito limitato in applicazioni pratiche. Possono essere applicati sia a problemi di ottimizzazione non vincolata (risolti mediante lo studio della derivata della funzione obiettivo) sia vincolata (utilizzo del Lagrangiano o Kuhn-Tucker). I requisiti che il problema di ottimizzazione deve avere per poter essere risolto da questi metodi è la derivabilità della funzione obiettivo $f(x)$ (due volte derivabile) e dei vincoli;
2. *Metodi diretti (o di ricerca)*: questi metodi possono essere applicati per risolvere problemi di ottimizzazione multivariabile, non lineare, vincolata e non. Questi metodi sfruttano l'analisi di un numero di set di valori delle variabili di decisione per trarre conclusioni sull'ordine di grandezza della funzione obiettivo per questi set. I metodi diretti (o di ricerca) partono da una soluzione di primo tentativo e aggiornano la soluzione in un processo iterativo utilizzando una direzione e un passo di ricerca. Diverse definizioni per la determinazione della direzione e del passo di ricerca caratterizzano differenti metodi diretti (es. Newton-Rapson, del gradiente, SQP, ecc.). Tali metodi considerano esclusivamente una serie discreta di punti, per cui, se applicati a funzioni continue, non permettono di individuare l'ottimo assoluto, ma solamente un punto che si avvicina ad esso con una tolleranza stabilita.
3. *Metodi di programmazione (ottimizzazione) lineare*: questi metodi richiedono, per la loro applicazione, che il problema di ottimizzazione sia lineare (definizione in 3.2.1). I LP (Linear Problem) sono facilmente risolvibili qualora sia possibile definire un poliedro n -dimensionale che rappresenti la regione ammissibile per le diverse soluzioni. La soluzione ottima corrisponderà ad un vertice del poliedro. Gli algoritmi risolutivi vanno, in definitiva, a calcolare il valore della funzione obiettivo esclusivamente nei vertici del poliedro. Tra le metodologie più utilizzate per la risoluzione di tali problemi si cita il metodo del Simplex [42].
4. *Metodi di programmazione (ottimizzazione) intera*: questi metodi vengono utilizzati quando, nella funzione obiettivo o nei vincoli sono presenti delle variabili di decisione che possono assumere solo valori interi. Essi si basano principalmente sulla soluzione di sotto-problemi successivi nei quali le variabili intere vengono momentaneamente

considerate reali e successivamente approssimate con gli interi superiori e inferiori del valore reale assunto in ciascun sotto-problema (Branch and Bound).

5. *Metodi di ottimizzazione moderni*: derivano dai risultati della moderna ricerca sui metodi di ottimizzazione e sono stati sviluppati sulla base dell'osservazione di numerosi fenomeni naturali, infatti molti processi chimici, molecolari, istintivi, evolutivi, biologici ecc. presenti in natura sono intrinsecamente delle ottimizzazioni. In particolare tutti questi metodi si distinguono dagli algoritmi che vengono implementati per la risoluzione del problema di ottimizzazione. Tra questi metodi sono:

- Metodi genetici o evolutivi: si basano sulla considerazione che l'evoluzione delle specie viventi non è altro che la ricerca dell'ottimo adattamento all'ambiente in cui esse vivono e alle sue variazioni.
- Simulated Annealing (letteralmente Ricottura Simulata) viene utilizzato per trovare un minimo globale in problemi di ottimizzazione che presentano più minimi locali.
- Particle Swarm Optimization (PSO, ottimizzazione con sciami di particelle) è un metodo euristico, ispirato al movimento degli sciami. Esso permette di identificare una nuova soluzione candidata a essere ottima nello spazio di ricerca, sulla base di una specifica quantità detta fitness. L'algoritmo utilizzato, simile agli algoritmi evolutivi, definisce una popolazione di soluzioni candidate ad essere ottime (dette particelle). Tali particelle possono muoversi nello spazio di ricerca sulla base di semplici relazioni che tengono in considerazione la velocità di spostamento delle particelle stesse, la migliore soluzione fin ora esplorata da ciascuna particella e la migliore soluzione esplorata da tutte le particelle.
- Ant Colony Optimization (ACO, traducibile con Ottimizzazione a formicaio) si basa sul paragone con il comportamento cooperativo delle colonie reali di formiche, le quali sono capaci di trovare la strada più breve dal loro formicaio alla fonte di cibo.
- Ottimizzazione di sistemi Fuzzy: si basa sul concetto che la formulazione matematica solitamente è troppo restrittiva, in molti casi è più ragionevole avere uno stadio di transizione fra l'assoluta approvazione e l'assoluta negazione di una soluzione. Questo implica che i vincoli debbano essere definiti in termini fuzzy (confusi, sfocati, ovvero non precisi).

Oltre ai metodi di ottimizzazione, nella pratica vengono adoperate anche alcune tecniche (sempre applicabili a specifici problemi e quindi non con carattere generale) per la semplificazione dei problemi. Tra queste è bene citare la Programmazione dinamica, in quanto verrà utilizzata nel paragrafo 5.2. Nel paragrafo 3.2.1 si è detto come i problemi dinamici richiedano come soluzione un set di funzioni continue delle variabili di decisione. La programmazione dinamica è legata al calcolo delle variazioni delle variabili di decisione, e lo fa attraverso una serie di processi discreti nei quali il calcolo delle variazioni viene eseguito in modo continuo e sequenziale. La caratteristica dinamica della soluzione voluta complica notevolmente la risoluzione del problema e ne aumenta, di conseguenza, il costo computazionale ed economico. La programmazione dinamica è una tecnica applicata a questo tipo di problemi al fine di semplificarne la risoluzione decomponendo il problema di decisione sequenziale in una serie di problemi di decisione monostadio da risolvere sequenzialmente. Nel seguito si andrà ad analizzare brevemente le diverse metodologie di

ottimizzazione, soffermandosi su quelle tecniche che più spesso vengono utilizzate nella risoluzione dei problemi affini ai sistemi energetici.

3.4.1 Metodi analitici e diretti

Metodi analitici

I metodi analitici sono quelli forniti dalla teoria classica dei massimi e minimi per problemi vincolati e non vincolati. Limitando le indagini ai sistemi energetici i problemi sono sempre di tipo vincolato, in quanto come già detto in precedenza i vincoli corrispondono al modello del sistema. Tuttavia la risoluzione richiede sempre la loro trasformazione in problemi non vincolati, pertanto la conoscenza degli algoritmi risolutivi di questi ultimi risulta preliminare a quella di problemi vincolati.

Ottimizzazione non vincolata

La condizione necessaria affinché un vettore delle variabili di decisione $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$ sia un estremo (minimo o massimo) per la funzione continua e derivabile $f(x)$ è che risulti:

$$\nabla f(x^*) = 0;$$

Si ricorda poi che la matrice Hessiana $[H]$ della funzione $f(x)$ è definita come la matrice delle sue derivate seconde, e i minori della matrice Hessiana $[H]$ sono tutte le sottomatrici quadrate di ordine i .

Condizione sufficiente affinché un vettore delle variabili di decisione $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$ sia minimo per la funzione $f(x)$ è che i determinanti dei minori della matrice Hessiana $[H]$, calcolati nel punto x^* siano tutti positivi. Affinché x^* sia massimo, i determinanti devono invece essere alternativamente negativi e positivi. In altri termini si può dire che la condizione sufficiente affinché x^* sia un punto di minimo (locale) o di massimo (locale) per la funzione $f(x)$ è che la matrice Hessiana, calcolata nel punto x^* , sia rispettivamente definita positiva e definita negativa. Casi diversi comportano l'impossibilità di esprimere un giudizio sul punto x^* .

Ottimizzazione con vincoli di uguaglianza e disuguaglianza

Il problema 3.2 può essere risolto mediante l'aiuto della funzione Lagrangiana, che è una combinazione lineare della funzione obiettivo $f(x)$ e dei vincoli $g_i(x)$ e $l_j(x)$, tali limiti vengono moltiplicati per opportune variabili λ dette moltiplicatori di Lagrange. La funzione Lagrangiana è definita come :

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_i^p (\lambda_i g_i(x)) + \sum_j^q (\lambda_j l_j(x)) \quad (3.5)$$

L'introduzione del Lagrangiano converte il problema vincolato in un problema non vincolato nel quale la nuova funzione obiettivo è il Lagrangiano stesso. Il numero delle variabili del problema passa da n a $n + p + q$ vista la presenza delle nuove p e q variabili λ . Le condizioni necessarie affinché $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$ sia un minimo (o massimo) sono chiamate

di Kuhn-Tucker e sono [13]:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \nabla_x L(x^*, \lambda^*) = \frac{\partial L(x^*, \lambda^*)}{\partial x_r} & \text{per } r = 1, \dots, n \quad (\text{a}) \\ \frac{\partial f(x^*)}{\partial x_r} + \sum_{i=1}^p \lambda_i^* \frac{\partial g_i(x^*)}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^q \lambda_j^* \frac{\partial l_j(x^*)}{\partial x_j} = 0 & \\ g_i(x^*) = 0 & \text{per } i = 1, \dots, p \quad (\text{b}) \\ l_j(x^*) \geq 0 & \text{per } j = 1, \dots, q \quad (\text{c}) \\ \lambda_j^* l_j(x^*) = 0 & \text{per } j = 1, \dots, q \quad (\text{d}) \\ \lambda_i^* \geq 0 & \text{per } i = 1, \dots, p \quad (\text{e}) \\ \lambda_i^* \text{ nessuna restrizione di segno} & \text{per } i = 1, \dots, p \quad (\text{f}) \end{array} \right. \quad (3.6)$$

Le diverse relazioni nel sistema hanno i seguenti significati:

- L'equazione (a) impone che il gradiente del Lagrangiano sia nullo per individuare il punto di possibile ottimo (detto anche punto di Kuhn-Tucker);
- Le relazioni (b) e (c) impongono che la soluzione x^* rispetti i vincoli di uguaglianza e disuguaglianza. Inoltre queste due relazioni si possono anche vedere come derivate della funzione Lagrangiana $L(x, \lambda)$ rispetto ai moltiplicatori λ ;
- La relazione (d) impone che i vincoli di disuguaglianza inattivi (per i quali è $l_j(x^*) \neq 0$) abbiano moltiplicatore nullo.

Metodi diretti

I metodi diretti sono metodi numerici, basati su algoritmi iterativi tali per cui, a partire da una soluzione di primo tentativo x^0 , la soluzione corrente viene aggiornata a ogni iterazione secondo la formula:

$$x^{k+1} = x^k + a^k \cdot d^k;$$

in cui il parametro d^k rappresenta la "direzione di ricerca", ovvero il vettore nello spazio delle variabili di decisione che indica la direzione nella quale l'algoritmo stima che si trovi l'ottimo; mentre a^k è il "passo", cioè lo scalare che misura la distanza di avanzamento nella direzione di ricerca. Le differenze tra un metodo e l'altro si riscontrano nelle equazioni utilizzate per calcolare a e d .

Newton- Rapson

Essendo il punto di ottimo scelto tra i punti in cui le derivate prime $f'(x)$ nelle variabili di decisione x sono nulle, la ricerca dell'ottimo è sviluppata ricercando le radici delle derivate prime. Nel caso più semplice, una sola funzione obiettivo $f(x)$ e una sola variabile di decisione x , bisogna cercare il punto in cui $f'(x) = 0$. Per determinare la radice di questa equazione viene utilizzato il metodo approssimato delle tangenti (o di Newton-Rapson, o semplicemente di Newton), nel quale la funzione $f'(x) = 0$ viene approssimata dalla sua tangente ($f''(x) = 0$) nel punto corrente.

$$x^{k+1} = x^k - \frac{f'(x)^k}{f''(x)^k} \quad (3.7)$$

dove in questo caso $a^k = \left| \frac{f'(x)^k}{f''(x)^k} \right|$ e $d^k = -\text{sign}\left(\frac{f'(x)^k}{f''(x)^k}\right)$.

Metodo del gradiente

Per stabilire la direzione di ricerca l'algoritmo si basa sul calcolo del gradiente. Nel metodo del gradiente semplice (o steepest descent), per ogni soluzione x^k la direzione di ricerca d^k coincide con quella del gradiente $\text{grad } f(x)$. Il passo a^k viene stabilito invece secondo considerazione più complesse, ad esempio su stime approssimativamente l'andamento della funzione.

La formula di aggiornamento è:

$$x^{k+1} = x^k + a^k \nabla f(x^k); \quad (3.8)$$

Programmazione quadratica sequenziale (SQP)

Il metodo SQP (Sequential Quadratic Programming) risolve il problema di ottimizzazione non-lineare vincolata definito dalla 3.2 e rappresenta lo stato dell'arte nella soluzione di questa classe di problemi. Esso si basa sulla risoluzione a ogni iterazione di sottoproblemi di programmazione quadratica che approssimano localmente il problema di ottimizzazione originario. Il problema originale viene trasformato ad ogni iterazione in un sottoproblema più semplice, il sottoproblema viene risolto, e il risultato viene usato come punto di partenza per l'iterazione successiva. Lo scopo del processo iterativo è cercare la soluzione delle relazioni di Kuhn- Tucker (KT). Il problema di ottimizzazione lineare vincolata 3.2 può essere riscritto, per semplicità, in forma più compatta senza perdere chiaramente in generalità:

$$\begin{aligned} \text{Trovare } x \in \mathfrak{R}^n \text{ che minimizzano } f(x) \text{ soggetta a} \\ c_i(x) = 0 \quad \text{con } i = 1, \dots, p \\ c_j(x) \geq 0 \quad \text{con } j = 1, \dots, q \end{aligned} \quad (3.9)$$

Le relazioni KT sono condizioni almeno necessarie per l'ottimo globale in problemi di ottimizzazione vincolata del tipo 3.9. Quando il problema è convesso, cioè se la funzione obiettivo $f(x)$ e le funzioni di vincolo $c_i(x)$ sono convesse, le relazioni KT sono condizioni non solo necessarie ma anche sufficienti.

Le equazioni KT sono espresse come:

$$\begin{cases} \nabla f(x^*) + \sum_{i=1}^{p+q} \lambda_i^* \nabla c_i(x^*) = 0 & \forall \quad i \\ \lambda_i^* c_i(x^*) = 0 & \text{per } i = 1, \dots, p \\ l_j(x^* \geq 0) \lambda_j^* \geq 0 & \text{per } i = 1, \dots, p + q \end{cases} \quad (3.10)$$

Il metodo SQP tenta di risolvere le condizioni di KT con convergenza di ordine maggiore di 1 utilizzando una procedura di aggiornamento (simile a quella del metodo di Newton-Rapson) che a ogni iterazione k approssima l'Hessiano della funzione Lagrangiana. Il valore stimato dell'Hessiano $[H]^k$ del Lagrangiano $L(x, \lambda)$ viene usata come approssimazione quadratica di $L(x, \lambda)$ per formulare un sottoproblema di programmazione quadratica (QP) nel quale tutti i vincoli non-lineari vengono linearizzati. Questo sottoproblema assume la seguente forma alla k -esima iterazione:

$$\begin{aligned} \text{Trovare } d^k \in \mathfrak{R} \quad \text{che minimizza} \quad & 0,5 \cdot d^{(k)T} \cdot H^k d^k + \nabla f(x^k)^T \cdot d^k \\ & \nabla c_i(x^k)^T + c_i(x^k) = 0 \quad \text{con } i = 1, \dots, p \\ \text{soggetta a} & \\ & \nabla c_i(x^k)^T + c_i(x^k) \leq 0 \quad \text{con } i = p, \dots, p + q \end{aligned} \quad (3.11)$$

La soluzione di tale sottoproblema, che è la direzione di ricerca d^k , si può ottenere utilizzando un metodo QP qualsiasi. La direzione di ricerca d^k così ottenuta porta alla soluzione aggiornata candidata a risolvere il problema originario 3.10 con lo schema dei metodi diretti:

$$x^{k+1} = x^k + a^k \cdot d^k \quad (3.12)$$

dove il passo a^k nella direzione di ricerca d^k viene determinato in modo da produrre una sufficiente diminuzione di una funzione di merito, basata su una combinazione lineare della funzione obiettivo e dei vincoli attivi attraverso una stima dei moltiplicatori di Lagrange λ . Questo metodo è implementato parzialmente in conopt3 solutore di problemi non lineari in GAMS.

3.4.2 Programmazione lineare

La classe di problemi di ottimizzazione vincolata più semplici è quella che comprende i problemi del tipo 3.9 nei quali la funzioni f (o le funzioni F in caso di problemi di ottimizzazione multi-obiettivo definiti nella 3.4 e c_i sono tutte funzioni lineari delle variabili di decisione x . La semplicità di questa classe di problemi spinge spesso a rappresentare problemi non lineari con modelli lineari approssimati per poterli risolvere con un minore sforzo.

Nei sistemi energetici si utilizza molto spesso questa approssimazione nei problemi di notevoli dimensioni, dinamici e/o particolarmente complessi. La semplificazione di un problema non lineare in uno lineare può essere ritenuto valido solo ed esclusivamente nei casi in cui le funzioni non lineari siano ben approssimabili con funzioni lineari.

I problemi di programmazione lineare sono usualmente definiti nella seguente forma "canonica":

$$\begin{aligned} \text{Trovare } x \in \Re \text{ che minimizzano } f(x) &= a^T \cdot x & (3.13) \\ \text{soggetta a } [C] \cdot (x) &= b \quad \text{con } x \geq 0 \end{aligned}$$

dove $[C]$ è una matrice $m \times n$ con $m \leq n$ che contiene i coefficienti dei vincoli lineari di uguaglianza. In tale formulazione i ogni vincoli di disuguaglianza è sostituito da un vincolo di uguaglia a cui viene sommata una variabile di scarto positiva.

Questo tipo di problema potrebbe non avere soluzioni per due motivi: non esistono punti fattibili (che soddisfano al sistema $[C] \cdot (x) = b$), oppure la funzione obiettivo non è limitata inferiormente nella regione fattibile.

La verifica di tali condizioni risulta piuttosto semplici e quindi nell'analisi si ipotizzerà che sia sempre verificata. Si definisce soluzione ammissibile del problema 3.13 un vettore che soddisfa tutti i vincoli. Linsieme di tutte le soluzioni ammissibili si dice regione ammissibile, ed è funzione dei vincoli e della funzione obiettivo. La soluzione ottima per il problema è dunque una soluzione ammissibile che ottimizza (minimizza o massimizza) il valore della funzione obiettivo tra tutte le soluzioni ammissibili. Da un punto di vista prettamente geometrico una soluzione è un punto nello spazio n -dimensionale e la regione ammissibile è un poliedro convesso nello stesso spazio. Nel caso in cui $m = n$ il sistema $[C] \cdot (x) = b$ determina un'unica soluzione; lo spazio delle soluzioni ammissibili quindi è rappresentato da un punto. La funzione obiettivo e i vincoli in questa circostanza non influiscono sul valore della soluzione. Se $m \leq n$ rimangono $n - m$ gradi di libertà al problema. In particolare definendo $n - m$ variabili le restanti m sono determinabili.

I problemi lineari possiedono una proprietà particolare, che permette di ridurre tempi e sforzi computazionali. Essendo la regione ammissibile in relazione con sole funzioni lineari, essa non presenterà curvature che possono originare minimi. E dunque:

Proprietà 1 *Dato un problema di programmazione lineare, se il poliedro P delle soluzioni ammissibili è non vuoto e limitato, allora esiste almeno una soluzione ottima corrispondente con un vertice di P (vertice di P ottimo) [42].*

Il vertice del poliedro è definito da un valore nullo per $n - m$ variabili e un valore determinato dal sistema $[C] \cdot (x) = b$ per le restanti m variabili.

I differenti metodi risolutivi si caratterizzano per il modo con cui vengono determinati gli $n-m$ valori nulli per le variabili. Uno dei metodi che più spesso viene utilizzato negli algoritmi risolutivi è il metodo del simplesso. Il metodo del simplesso è un metodo iterativo che permette di esplorare in modo efficiente l'insieme delle soluzioni ammissibili di base, a partire da una soluzione ammissibile di base data. L'efficienza consiste nel garantire di generare, ad ogni iterazione:

- soluzioni ammissibili
- soluzioni che migliorino (o comunque non peggiorino) la soluzione all'iterazione precedente, in termini di valore della funzione obiettivo.

Il metodo del simplesso può essere distinto in 3 fasi:

1. Passaggio alla forma canonica e identificazione di una prima soluzione: In questa prima fase si deve ridurre il sistema $[C](x) = b$, tramite operazioni sulle righe, in forma canonica, una delle quali può essere ottenuta secondo le prime m variabili:

$$\begin{aligned}
 x_1 + 0 + \cdots + 0 + c_{1,m+1}x_{1,m+1} + \cdots + c_{1,n}x_n &= b_1 \\
 0 + x_2 + \cdots + 0 + c_{2,m+1}x_{2,m+1} + \cdots + c_{2,n}x_n &= b_2 \\
 &\vdots \\
 0 + 0 + \cdots + x_m + c_{m,m+1}x_{m,m+1} + \cdots + c_{m,n}x_n &= b_m
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Nel sistema 3.14 le x_1, \dots, x_m compaiono in una sola equazione e con coefficiente unitario e vengono chiamate variabili dipendenti, le rimanenti $n - m$ compaiono con coefficienti qualunque e vengono chiamate variabili indipendenti. Si noti che, per come sono state definite, le m variabili dipendenti formano una base per il sistema.¹ Una prima soluzione possibile è quella ovvia ottenuta imponendo che tutte le $n - m$ variabili indipendenti siano nulle:

$$\begin{aligned}
 x_i &= 0 \text{ per } i = m + 1, \dots, n; \\
 x_i &= b_i \text{ per } i = 1, \dots, m;
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

2. Aggiornamento della soluzione: il metodo scambia una delle $n - m$ variabili indipendenti (prima nulla dalla 3.15, e quindi variabile base) con una delle m variabili dipendenti (prima positiva dalla 3.15, variabile fuori base). La scelta della variabile da far entrare in base è determinata dalla ricerca di una nuova soluzione che migliori

¹Una base di una matrice $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$ è una sottomatrice quadrata di A di rango massimo m , in altri termini, una matrice $B \in \mathbb{R}^{m \times m}$ ottenuta scegliendo m linearmente indipendenti della matrice A

la funzione obiettivo. Verrà quindi scelta la variabile indipendente che presenterà il coefficiente minore nella funzione obiettivo $f(x) = a^T x$. Dalla l'altra parte la variabile che lascia la base, normalmente è ottenuta mediante la regola del quoziente minimo. Supponiamo che x_j (con $m+1 < j < n$) sia la variabile scelta per l'ingresso in base e definendo il pedice i in riferimento al i -esima equazione ($1 < i < m$). Allora, la variabile uscente è la variabile corrispondente al minimo quoziente. $Min(\frac{b_i}{c_{i,j}})$ per $1 < i < m$; Una volta individuato la variabile di base, si effettua lo scambio e si riporta il problema in forma canonica.

3. Termine della procedura di aggiornamento: quando non è più possibile migliorare la funzione obiettivo (nessuna variabile indipendente, variata di un valore unitario, aumenta il valore di $f(x)$ la base corrente è quella ottima (sono state trovate le $n - m$ variabili indipendenti che assumono valore nullo).

3.4.3 Programmazione intera

I metodi di programmazione intera permettono di risolvere problemi di ottimizzazione nei quali sia presente almeno una variabile intera. Come si è visto in precedenza, nei sistemi energetici molto spesso l'utilizzo di variabili intere (soprattutto binarie) è inevitabile per analisi di design e di off design. La programmazione intera è difficilmente risolvibile tramite i metodi diretti (paragrafo 3.3.2), poiché in corrispondenza di una variazione del valore delle variabili intere la funzione obiettivo è discontinua. I metodi di programmazione intera permettono di maneggiare queste discontinuità ignorando inizialmente la restrizione di interezza delle variabili, generando così sotto-problemi di ottimizzazione non interi risolvibili con qualunque metodo di ottimizzazione. I problemi riferiti ai sistemi energetici, come già detto in precedenza si riferiscono molto spesso a programmazione lineare e non lineari miste intere. (MINLP e MILP). Di seguito viene proposta la tecnica del branch AND bound che frequentemente è implementata negli algoritmi risolutori per tali problemi.

BRANCH AND BOUND

È possibile risolvere un problema MILP ignorando la restrizione di interezza e risolvendo il problema con un qualunque metodo di programmazione lineare o non lineare. Se la soluzione ottenuta prevede valori frazionari per le variabili intere si ricavano soluzioni intere approssimate con una procedura di arrotondamento. Quando sono presenti molte variabili intere le approssimazioni potrebbero essere eccessive, occorre quindi avere uno strumento sistematico che esamini le possibili soluzioni intere e che elimini quelle che peggiorano la funzione obiettivo $f(x)$. La tecnica branch AND bound assolve efficientemente a tale compito, essa si basa su due concetti cardine: quello di branching (suddivisione) e quello di bound (limite).

Operativamente la tecnica si basa su un algoritmo che genera una sequenza di sotto-problemi di LP, chiamati Nodi, organizzati in una struttura ad albero (Fig. 3.5). Dopo aver risolto ogni Nodo con un qualunque metodo di programmazione lineare vengono introdotti dei vincoli aggiuntivi sulle variabili intere.

La procedura di generazione dell'albero di Nodi è la seguente:

- Risoluzione del problema originario MILP come un problema lineare a sole variabili reali, chiamato LP-1 in Fig. 3.5. La soluzione di questo problema avrà dei valori frazionari per le variabili intere;

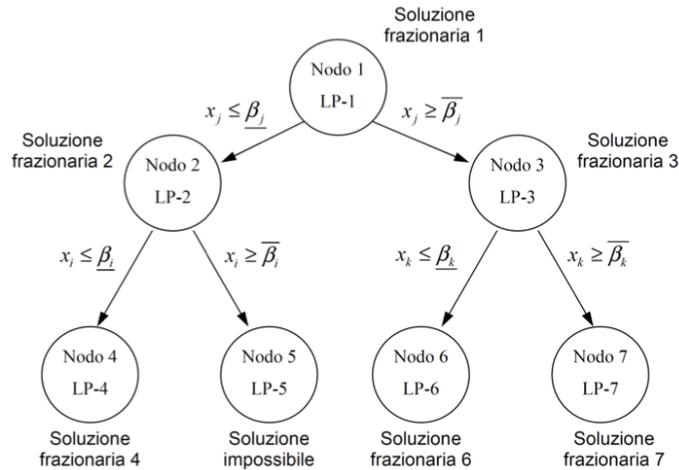


Figura 3.5: Tecnica del Branching

- Suddivisione (branching) della regione di ricerca in base ad una di queste variabili intere (esempio x_j): si considera l'intero inferiore $\underline{\beta}_j$ ed superiore $\overline{\beta}_j$ del valore frazionario β_j che ha assunto la variabile intera x_j nella soluzione LP-1;
- Vengono definiti due nuovi sotto-problemi lineari (Nodi) LP-2 e LP-3, il primo imponendo il vincolo $x_j \leq \overline{\beta}_j$ e il secondo imponendo il vincolo $x_j \geq \underline{\beta}_j$. Ogni sotto-problema LP così definito viene risolto ottenendo una soluzioni intere, frazionarie o nessuna soluzione. Questo processo di diramazione e soluzioni di problemi LP continua finché il ramo non viene potato. La potatura avviene se:
 - La soluzione del Nodo è intera;
 - Il Nodo non ammette soluzioni;
 - Il valore ottimo della $f(x)$ del Nodo non migliora quello della soluzione intera corrente. Questo nasce dalla considerazione che la soluzione ottima di un problema lineare (bound) costituisce il limite inferiore della $f(x)$, per qualsiasi direzione che parte dal Nodo stesso.
- L'algoritmo continua a generare Nodi fino a quando tutti i rami vengono potati: il Nodo a cui corrisponde il valore minore della $f(x)$ contiene la soluzione ottima.

3.4.4 Programmazione dinamica

In molti problemi di ottimizzazioni le decisioni devono essere prese in modo sequenziale a differenti istanti di tempo, in diversi punti nello spazio, in posizioni differenti all'interno di una macchina/sistema. Problemi di questo tipo sono chiamati problemi di decisione sequenziali o, dato che essi richiedono che le decisioni debbano essere prese a un certo numero di stadi, vengono anche chiamati problemi di decisione multistadio [3]. La programmazione dinamica è una tecnica matematica adatta per l'ottimizzazione di problemi decisionali multistadio. Questa tecnica è stata sviluppata da Richard Bellman nei primi anni 1950 [43].

Nei sistemi energetici quasi tutti i problemi di ottimizzazione sono di genere dinamico, poiché si vuole determinare le funzioni che rappresentano le variazioni delle variabili di

decisioni in funzione del tempo. Il problema di ottimizzazione dinamica può quindi essere definito così:

$$\begin{aligned} \text{Trovare } x(t) \in \mathfrak{R}^n \times \mathfrak{R}^T (t = 1, \dots, T) \\ \text{che minimizza } f(x) \\ \text{soggetta a } \quad c_i(x(t)) = 0 \quad \text{con } i = 1, \dots, p \\ \quad \quad \quad c_i(x(t)) \leq 0 \quad \text{con } i = p, \dots, p + q \end{aligned} \quad (3.16)$$

La tecnica di programmazione dinamica, quando applicabile, scompone un problema di decisione multistadio come una sequenza di problemi decisionali a singolo stadio. Così un problema in N-stadi è rappresentato come una sequenza di N problemi a singolo stadio che vengono risolti (sub-ottimizazioni) in sequenza. Nella maggior parte dei casi, questi N sotto-problemi sono più facili da risolvere rispetto al problema originale. La decomposizione di N sotto-problemi è fatta in modo tale che la soluzione ottima del problema a N-stadi originaria può essere ottenuto dalle soluzioni ottimali delle N problemi unidimensionali. La programmazione dinamica è quindi una tecnica di ottimizzazione, non un metodo, in quanto non è applicata per risolvere il problema di ottimizzazione, ma per semplificarlo.

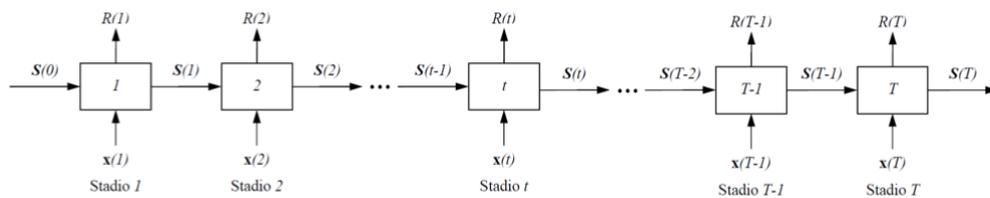


Figura 3.6: Programmazione Dinamica

Il problema 3.16 può essere visto come una successioni di T black-box come si vede nella figura 3.6. In cui :

- ogni box rappresenta uno stadio t-esimo del problema;
- S rappresenta un vettore di informazioni che vengono scambiate tra due istanti temporali, $S(t-1)$ sono le variabili in input per lo stadio t, mentre $S(t)$ sono le variabili in output per lo stesso stadio;
- $x(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))$ vettore delle variabili di decisione;
- $R(t)$ una funzione di valutazione (funzione obiettivo per il singolo stadio) che misura l'efficacia delle decisioni prese in funzione degli obiettivi definiti nel problema; tale valore verrà chiamato in seguito parametro di valutazione.

Le variabili di decisione $x(t)$, gli input $S(t-1)$ e output $S(t)$ dello stadio t sono legati tra loro da una funzione s detta di trasformazione:

$$S(t) = s(x(t), S(t-1));$$

La funzione s rappresenta l'insieme dei vincoli e quindi nel caso dei sistemi energetici il modello del sistema. Il parametro di valutazione $R(t)$ dello stadio t è influenzato dalle decisioni $x(t)$ prese nello stadio stesso e dalle decisioni $x(t-1)$ prese nello stadio precedente (t-1) attraverso il vettore $S(t-1)$ (output dello stadio t-1 e input dello stadio t):

$$R(t) = r(x(t), S(t-1))$$

Con questi nuovi parametri il problema 3.16 può essere riscritto:

Trovare $x(1), \dots, x(t), \dots, x(T)$ che minimizzano

$$f(R(t)) = f(R(1), \dots, R(t), \dots, R(T)) \quad (3.17)$$

$$\text{soggetta, per } t = 1, \dots, T \text{ a } S(t) = s(x(t), S(t-1))$$

$$R(t) = r(x(t), S(t-1))$$

L'applicabilità della programmazione dinamica richiede che la funzione di valutazione sia separabile e monotona [3]. Per avere separabilità della funzione obiettivo essa deve poter essere rappresentata come combinazione delle funzioni di valutazione di ciascuno stadio. Mentre la condizione di monotonia della funzione obiettivo si verifica se, per qualsiasi vettore a e b delle variabili di decisione a e b tali che:

$$r(x(t) = a, S(t-1)) \geq r(x(t) = b, S(t-1))$$

è soddisfatta la seguente disequazione

$$f(x(1), \dots, x(t) = a, \dots, x(T)) \geq f(x(1), \dots, x(t) = b, \dots, x(T)) \quad (3.18)$$

$$\text{per } t = 1, \dots, T.$$

Rispetto all'ottimizzare il sistema per tutti gli istanti di tempo (stadi) contemporaneamente (tutto il periodo T) è certamente preferibile ottimizzarlo per ogni istante t (stadio) preso singolarmente. Questo concetto non è chiaramente applicabile a tutti i problemi, e potrebbe portare a soluzioni ottime per i singoli istanti di tempo t (stadi) molto distanti dall'ottimo vero che considera l'intero periodo di tempo T . Questo deriva dalla caratteristica principale dei problemi dinamici: le scelte prese per un istante di tempo (stadio) $t-1$ influenzano quelle fattibili nel istante (stadio) t e quindi quelle fattibili in tutti i successivi $t+1, \dots, T$. La chiave per risolvere questo problema è, quindi, di ottimizzare per primo l'istante di tempo (stadio) che non influenza gli altri, ovvero l'ultimo ($t = T$). Nota la variabile di decisione ottima $x^*(T)$ per l'ultimo istante (stadio) si può proseguire ottimizzando contemporaneamente gli ultimi due istanti di tempo ($t = T$ e $t = T-1$), in realtà le decisioni devono essere prese solo per il penultimo istante stadio essendo l'ultimo già ottimizzato. Una volta nota anche la variabile di decisione ottima $x^*(T-1)$ si può reiterare il procedimento sino all'ottimizzazione di tutti gli istanti di tempo (stadi). Il processo di sub-ottimizzazioni ricorsive deve quindi essere compiuto in ordine inverso. Tale metodologia deriva dal principio di ottimalità espresso da Bellman [43]:

Una politica ottima (o un set di decisioni ottime) ha la proprietà che qualunque sia lo stato iniziale derivato da decisioni già prese, le rimanenti decisioni devono costituire una politica ottima (o un set di decisioni ottime) per riguarda lo stato risultante dalla prima decisione (traduzione)

3.5 Formulazione del problema di ottimizzazione di un sistema di conversione

In questo paragrafo si andrà a determinare la formulazione di un generico problema di ottimizzazione del progetto e del funzionamento di un sistema di conversione dell'energia.

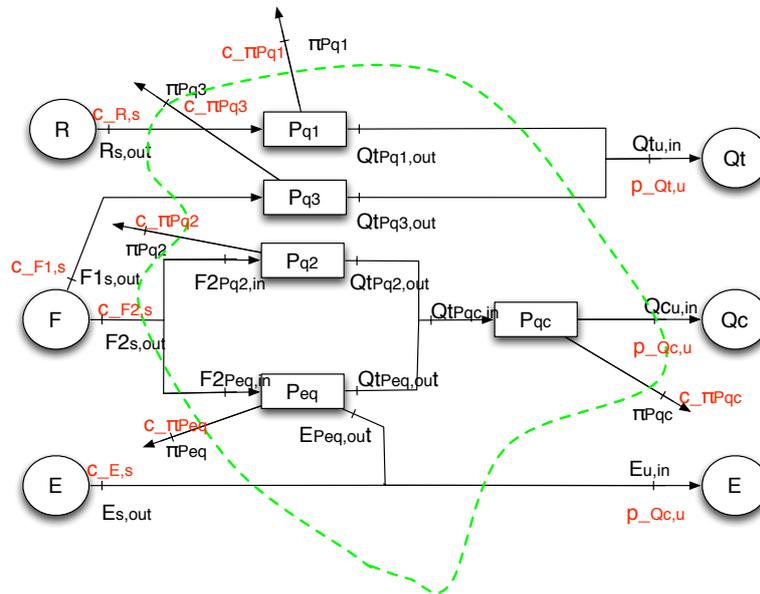


Figura 3.7: Schema generale del sistema di conversione, con l'espressione delle variabili di costo

In figura 3.7 è rappresentato lo schema di un sistema di conversione di energia atto a soddisfare tre utenze.

Il sistema è lo stesso di quello analizzato nel capitolo 2, per la descrizione completa si rimanda al paragrafo 2.5. L'analisi a cui si vuole sottoporre il sistema è di tipo termoeconomico, e quindi si rendono necessari l'utilizzo di alcune grandezze di carattere economico. In particolar modo i flussi prelevati dalle disponibilità presenteranno un costo unitario $c_{A,d}(t)$ variabile o meno nel tempo; i flussi inviati all'utenza saranno remunerati con un prezzo unitario $p_{A,u}(t)$ variabile o meno nel tempo. A identifica il generico flusso di energia scambiato tra ambiente e sistema. I flussi di perdita avranno anch'essi un costo unitario $c_{\pi}(t)$ variabile o meno nel tempo. Le unità di trasformazione saranno caratterizzate da un costo di ammortamento $a_{P,i}$ e dei costi di manutenzione $cm_{P,i}$.

In questo sistema si è deciso di sfruttare la semplificazione introdotta nel paragrafo 2.2, e cioè di identificare le interazioni dirette tra ambiente e sistema con un'unica variabile di flusso, come si può vedere in figura.

Di seguito verranno brevemente descritti in modo generale i quattro passaggi per la formulazione del problema di ottimizzazione (individuati in 3.2)

Definizione dei confini del sistema di conversione

La scelta dei confini che distinguono il sistema dall'ambiente esterno (paragrafo 1.1) è in stretta relazione con le specifiche di progetto: ossia i flussi che l'ambiente richiede e rende fruibile al sistema. In particolar modo in riferimento alla figura 3.7 le specifiche sono :

- Il flusso $E_{u,in}(t)$ richiesto dall'utenza elettrica
- Il flusso $Qt_{u,in}(t)$ richiesto dall'utenza termica
- Il flusso $Qc_{u,in}(t)$ richiesto dall'utenza di raffreddamento

- Il flusso $R_{s,out}(t)$ reso fruibile dalla disponibilità di flussi non accumulabili
- I flussi $F1_{s,out}(t)$ e $F2_{s,out}(t)$ resi fruibili della disponibilità di flussi accumulabili
- Il flusso $E_{s,out}(t)$ reso fruibile dalla rete di distribuzione.

Non fanno parte delle specifiche di progetto, ma rappresentano comunque delle interazioni tra ambiente e sistema, i flussi di perdita $\pi_{Pq1}(t), \pi_{Pq2}(t), \pi_{Pq3}(t), \pi_{Pqc}(t), \pi_{Peq}(t)$. L'andamento dei flussi richiesti dall'utenza, come detto nel paragrafo 2.2, si assume sia noto e che presenti un andamento variabile nel tempo. Si ricorda, infatti, che lo scopo del sistema di conversione è proprio quello di soddisfare le utenze.

Definizione della funzione obiettivo

In precedenza si è visto che i possibili criteri per decretare la soluzione migliore possano essere molteplici. Nei sistemi energetici solitamente il problema è monobiettivo: la massimizzazione del profitto (o la minimizzazione dei costi di produzione) durante un periodo T, (usualmente uno o più anni). Il profitto (o il costo di produzione) identifica una funzione obiettivo di natura non solo economica, ma termoeconomica, poiché sono compresi sia aspetti economici come i costi (costi unitari e costi di ammortamento), sia termodinamici come il valore dei flussi. Il profitto nel periodo T di analisi per il sistema in figura 3.7 può essere espresso da:

$$\begin{aligned}
z = f(x) = & \int_0^T (Qt_{u,in}(t) \cdot p_{qt,u}(t) + Qc_{u,in}(t) \cdot p_{qc,u}(t) + E_{u,i}(t) \cdot p_{e,u}(t))dt + \\
& - \int_0^T (R_{s,out}(t) \cdot c_{r,s}(t) + F1_{s,out}(t) \cdot c_{f1,s}(t) + F2_{s,out}(t) \cdot c_{f2,s}(t) + E_{s,out}(t) \cdot p_{e,s}(t))dt + \\
& - \int_0^T (\pi_{Pq1}(t) \cdot c_{\pi,Pq1}(t) + \pi_{Pq2}(t) \cdot c_{\pi,Pq2}(t) + \pi_{Pq3}(t) \cdot c_{\pi,Pq3}(t) + \\
& + \pi_{Pqc}(t) \cdot c_{\pi,Pqc}(t) + \pi_{Peq}(t) \cdot c_{\pi,Peq}(t))dt + \\
& - (Qt_{Pq1,max} \cdot a_{Pq1} + Qt_{Pq2,max} \cdot a_{Pq2} + Qt_{Pq3,max} \cdot a_{Pq3} + \\
& + Qc_{Pqc,max} \cdot a_{Pqc} + E_{Peq,max} \cdot a_{Peq})T + \\
& - (Qt_{Pq1,max} \cdot cm_{Pq1} + Qt_{Pq2,max} \cdot cm_{Pq2} + Qt_{Pq3,max} \cdot cm_{Pq3} + \\
& + Qc_{Pqc,max} \cdot cm_{Pqc} + E_{Peq,max} \cdot cm_{Peq})T.
\end{aligned} \tag{3.19}$$

La $f(x)$ è la somma dei flussi di denaro entranti meno la somma di quelli uscanti, integrati nell'intero periodo di analisi T, e di entrate o uscite di denaro immaginate come concentrate all'inizio di ogni sottoperiodo in cui il periodo T può essere suddiviso (generalmente anni), moltiplicate per il numero di sottoperiodi T. I flussi di denaro sono:

- $B_{u,in}(t) \cdot p_{u,in}(t)$: flusso di denaro entrante generato dalla cessione (vendita) dei flussi $B_{u,in}$ [W] richiesti dall'utenza al prezzo unitario $p_{u,in}(t)$ [€/Wh].
- $(A_{s,out}(t) \cdot c_{s,out}(t))$: flusso di denaro uscente generato dal prelievo (acquisto) dei flussi $A_{s,out}$ [W] dalla rispettiva disponibilità al costo unitario $c_{s,out}(t)$ [€/Wh]. Il costo $c_{s,out}(t)$ può anche essere nullo come nel caso del flusso $R_{s,out}(t)$ che rappresenta la radiazione solare che ovviamente è gratuita.

- $(\pi_{P_i}(t) \cdot c_{\pi,P_i}(t))$: flusso di denaro uscente dovuto ai flussi di perdita dal sistema [W] e al costo unitario $c_{\pi,P_i}(t)$ [€/Wh]. Le perdite in molti casi sono associate alle emissioni di sostanze inquinanti nell'ambiente, che sono regolamentate per legge. Il costo $c_{\pi,P_i}(t)$ può essere pari a zero nel caso se alla perdita di energia non è associabile nessun costo (acqua di raffreddamento).

Le spese concentrate sono:

- $(A_{P_i,max} \cdot a_{P_i})$: uscite di denaro concentrate associate agli ammortamenti delle unità. Il costo di ammortamento annuo è calcolato come prodotto tra la taglia $A_{P_i,max}$ [W] del componente P_i per il suo costo di ammortamento specifico annuo a_{P_i} [€/W anno]. Il costo di ammortamento specifico annuo è definito come:

$$a_{P_i} = \frac{H_{P_i}}{A_{P_i,max}} = \frac{C_{P_i}}{A_{P_i,max}} \cdot \frac{I + (I + 1)^n}{(I + 1)^n - 1} \quad (3.20)$$

dove H_{P_i} [€/W] è il costo di ammortamento annuo del componente P_i , immaginando una rateizzazione del capitale a quote costanti. H_{P_i} viene calcolato come prodotto tra il costo di capitale C_{P_i} [€] investito per l'acquisto e installazione del componente P_i e il fattore di recupero di capitale $\frac{I+(I+1)^n}{(I+1)^n-1}$, dove I è il tasso periodico di interesse e n è il numero di anni in cui si considera ammortizzato l'investimento (coincidente con il numero di rate costanti);

- $(A_{P_i,max} \cdot cm_{P_i})$: uscite di denaro concentrate associate alla manutenzione di ciascuna unità P_i . Si è assunto solo la componente fissa dei costi di manutenzione che dipende dalla taglia dell'unità $A_{P_i,max}$ [W] e dal costo specifico annuo di manutenzione cm_{P_i} [€/W anno]. In molti casi è possibile esprimere una componente del costo di manutenzione dovuta alla gestione dell'unità (solitamente dipende dalla taglia e dal costo specifico variabile di manutenzione a suo volta funzione delle variazioni di carico)

Questa funzione sarà ampiamente utilizzata negli esempi analizzati nel capitolo 5. Dalla funzione profitto è semplice anche ricavare la funzione costo, basta semplicemente non considerare i flussi di denaro entranti, relativi alla cessione dei flussi all'utenza. In questa trattazione, come si è visto nel paragrafo 1.3.1, l'andamento temporale dei flussi è discretizzato tramite intervalli dt pari a un'ora in cui considerare il valore del flusso costante. Tenendo presente questo fattore la funzione profitto per un generico sistema è:

$$z = f(x) = \sum_{t=1}^T \left(\sum_r^{n_u} A_{r,u,in}(t) \cdot p_{r,u,in}(t) - \sum_j^{n_s} A_{j,s,out}(t) \cdot c_{j,s,out}(t) \sum_i^N \pi_{P_i}(t) \cdot c_{\pi,P_i}(t) \right) + \\ - \sum_i^N \delta_i \cdot (A_{P_i,max} \cdot a_{P_i})T - \sum_i^N \delta_i \cdot (A_{P_i,max} \cdot cm_{P_i})T \quad (3.21)$$

Nel generico sistema sono presenti n_u utenze, n_s sorgenti, e N componenti. Inoltre si sono introdotte le variabili binarie relative agli N componenti. Ciascuna di queste variabili è binaria ed è utilizzata per considerare la possibile inclusione/esclusione ($\delta_i = 1/\delta_i = 0$) del componente i al quale è associata. In questo modo, nel processo di ottimizzazione del

sistema di conversione è possibile definire anche la topologia è svolgere quindi un'analisi di sintesi.

Scelta delle variabili di decisione

La scelta delle variabili di decisione dipende, come visto nel paragrafo 3.2, dalla natura del problema di ottimizzazione, ossia se questo sia di sintesi, di design, di funzionamento o una combinazione di queste tipologie. Nel problema di ottimizzazione di progetto e funzionamento del sistema di conversione, in figura 3.7, una scelta opportuna delle variabili di decisione è:

- Variabili δ_i che definiscono l'accensione/spengimento, dell'unità.
- Variabili $A_{P_i,max}$ che definiscono il valore massimo per il flusso in uscita e quindi la taglia (carico massimo) di ciascun unità. Queste possono essere lasciate tutte libere oppure è possibile definire la taglia di alcuni componenti e determinare la taglia dei rimanenti. Solitamente il valore di $A_{P_i,max}$ fissa anche il valore del carico minimo $A_{P_i,min}$ in quanto, per unità dello stesso tipo, il range all'interno del quale il flusso in uscita può variare è spesso definito come:

$$\alpha \cdot A_{P_i,max} \leq A_{P_i,out}(t) \leq A_{P_i,max} \text{ con } \alpha = \frac{A_{P_i,min}}{A_{P_i,max}}$$
- Variabili $A_i(t)$ che definiscono i flussi di energia che collegano i vari componenti del sistema tra loro e con l'ambiente. Ovviamente in relazione al modello che descrive il sistema non sarà necessario assumere tutti i flussi come variabili di decisione. Molti flussi, infatti, come visto nel capitolo due sono legati da relazioni univoche all'interno del modello, per cui sarà sufficiente assumere un numero di variabili pari al grado di libertà del modello. Ad esempio nella sistema in figura 3.7 per l'unità P_{qc} sarà sufficiente assumere un flusso come variabile di decisione (ad esempio $Q_{c_u,in}$) poiché gli altri flussi ($E_{P_{eq,out}}$; $F_{2P_{eq,in}}$; $\pi_{P_{eq}}$) saranno determinabili dalle relazioni espresse nel modello (mappe caratteristiche e bilancio di energia).

Questa scelta delle variabili di decisione è opportuna in quanto influenza la funzione obiettivo e, contestualmente, permette di determinare la taglia dei componenti e il loro funzionamento migliore rispetto all'obiettivo definito nella 3.19.

Nei problemi di ottimizzazione del solo funzionamento una scelta opportuna delle variabili di decisione comporterebbe l'esclusione dalle variabili di decisione appena indicate di quelle relative alle taglie dei componenti. Se il problema di ottimizzazione riguarda invece la sintesi le variabili binarie δ_i identificheranno la presenza o meno di un componente all'interno della configurazione del sistema di conversione.

Costruzione del modello del sistema di conversione

Il modello che descrive il sistema definito in figura 3.7 è stato ampiamente trattato nel paragrafo 2.5. Si riportano, quindi solo brevemente i risultati ottenuti. Si è visto come le equazioni che caratterizzano gli scambi di flussi di energia e massa tra ambiente e sistemi siano identificabili da equazioni di congruenza. Utilizzando la notazione vista in precedenza saranno necessarie $n_u + n_s$ bilanci di energia per i flussi che il sistema cede o preleva al/dall'ambiente. All'interno del sistema ogni unità di trasformazione, che trasforma n flussi in ingresso in m flussi in uscita necessita per essere descritta chiaramente di :

- Un bilancio dei flussi;

- k-1 mappe caratteristiche con $k = n + m$ numero dei flussi totali che interagiscono con l'unità;
- H equazioni ausiliarie.

All'interno del sistema è presente solo un nodo per cui sarà richiesto esclusivamente un bilancio di energia. Il modello del sistema è un modello dinamico, a causa del vincolo posto sulla massima variazione delle rampe di carico dell'unità P_{eq} . Di conseguenza anche il problema di ottimizzazione sarà dinamico. Ovviamente se tale equazione non fosse stata presente il modello (e conseguentemente il problema) sarebbe potuto essere trattato come stazionario, poiché non sono presenti altre equazioni o vincoli che legano due istanti temporali successivi.

In definitiva il problema di ottimizzazione in esame può essere classificato come un problema di ottimizzazione vincolato, dinamico, non lineare, che presenta variabili sia reali sia intere. Si è appena osservato come la causa della dinamicità del problema sia relazionata alla presenza dei vincoli sulle massime rampe di carico. La non linearità è dovuta al prodotto tra le variabili di decisioni nel caso di ottimizzazione di progetto e funzionamento. Si è visto, infatti, che in questo particolare tipo di analisi siano considerate variabili di decisioni sia le variabili binarie, sia le variabili $A_{P_i,max}$ che determinano la taglia dello specifico componente. Queste due variabili sono moltiplicate tra loro nelle disequazioni che descrivono il campo di funzionamento dell'unità. Ad esempio per l'unità P_{q1} tale relazione è espressa:

$$Qt_{P_{q1},min} \cdot \delta_{P_{q1}}(t) \leq Qt_{P_{q1},out}(t) \leq Qt_{P_{q1},max} \cdot \delta_{P_{q1}}(t) \quad (3.22)$$

Si ricorda che $Qt_{P_{q1},min}$ può essere espresso come una costante $0 < \alpha < 1$ moltiplicata per $Qt_{P_{q1},max}$. La non linearità, comportata sforzi computazionali maggiori rispetto al caso lineare, per cui è utile cercare di trasformare un problema non lineare in uno lineare. Si può osservare, in questo caso, come l'unico fenomeno di non linearità sia associabile esclusivamente al prodotto tra le variabili binarie e la taglia dei diversi componenti. Se si è in presenza di un prodotto tra variabili: una di tipo reale e una di tipo binario, è possibile utilizzare la tecnica di Glover. Questa tecnica permette di scomporre il prodotto in una serie di vincoli che non presentano il prodotto tra variabili e che quindi consentono di considerare il problema di ottimizzazione lineare.

3.6 Conclusioni

In questo Capitolo è stata mostrata la forma generale dei problemi di ottimizzazione e si è visto come questi problemi possano essere classificati in funzione della natura delle equazioni del modello, delle variabili di decisione e della funzione obiettivo (o delle funzioni obiettivo). Questa classificazione è fondamentale per una formulazione propria del problema e per la scelta del metodo di ottimizzazione più adatto a trovare una soluzione. Inoltre è stata descritta la procedura per la formulazione del problema di ottimizzazione di sistemi energetici ad ogni grado di dettaglio. L'ottimizzazione dei sistemi di conversione solitamente riguarda la sintesi, il design, il funzionamento del sistema o una combinazione di questi tre aspetti. Generalmente i problemi di ottimizzazione che concernono i sistemi energetici sono vincolati, dinamici e non lineari. Nel paragrafo 3.4 si sono descritti i principali metodi di ottimizzazione per la soluzione di questi tipi di problemi, evidenziandone pregi, difetti,

applicabilità e proponendo possibili tecniche di semplificazioni. I metodi diretti (paragrafo 3.4.1) richiedono che il modello di ottimizzazione sia regolare e continuo, caratteristica che ne limita l'applicabilità solo ad alcuni problemi di ottimizzazione in campo energetico. Infatti, per una modellazione accurata dei sistemi possono essere introdotti nel modello elementi che rendono il problema di ottimizzazione discontinuo (es. variabili binarie). A tale proposito si sono presentati metodi adatti a trattare queste discontinuità (paragrafo 3.4.2 e 3.4.3). Nel paragrafo 3.4.4 è stata presentata la tecnica di programmazione dinamica che permette di ridurre notevolmente i tempi e i costi di ottimizzazione, nel caso il problema sia dinamico. Infine nel paragrafo 3.5 è stato formulato il problema di ottimizzazione del progetto e del funzionamento di un sistema di conversione con l'obiettivo della massimizzazione del profitto generato nel periodo di analisi. Si è visto che la dinamicità del problema sia dovuta alla presenza di vincoli sulla massima rampa di variazione di carico delle unità nel modello di ottimizzazione. Inoltre sono state introdotte delle variabili di decisione binarie δ_i per modellare, lo stato di attività/inattività di ciascuna unità.

Capitolo 4

Sistemi di accumulo: interazioni con il Macro-Sistema e modellazione

In questo capitolo si descriverà come i diversi sistemi d'accumulo possano interagire con i sistemi di conversione dell'energia ed in particolar modo quali benefici possano portare in fase di progettazione e di funzionamento del sistema. Nel settore energetico le tipologie di accumulo sono molteplici, di conseguenza si è ritenuto utile dare una visione rapida ma completa sulle diverse varietà, descrivendone il funzionamento e le principali peculiarità. Le diverse tipologie verranno poi classificate, utilizzando la schematizzazione vista nei capitoli precedenti, in relazione ai flussi di massa o di energia con i quali interagiscono. Per poter studiare il comportamento e l'influenza dei sistemi d'accumulo sul sistema di conversione dell'energia è necessario inglobare nel modello del sistema le relazioni matematiche che descrivono il funzionamento e le caratteristiche dell'accumulo.

4.1 Introduzione

Negli ultimi anni si è potuto osservare un sostanziale cambiamento nel panorama energetico mondiale. La forte penetrazione di fonti rinnovabili, l'influenza delle fonti intermittenti sul prezzo dell'energia, le politiche ambientali per la riduzione delle emissioni inquinanti e l'utilizzo più attento delle fonti fossili, sono solo alcuni degli aspetti che hanno portato ad una modifica al modo di progettare e gestire i sistemi energetici. In particolar modo, soprattutto nel settore elettrico, l'uso massiccio di fonti rinnovabili e/o intermittenti ha condotto a profonde variazioni nel modo di gestire gli impianti e la rete di distribuzione. La forte aleatorietà di queste fonti unita al basso valore di predicibilità di tali variazioni ha indotto a privilegiare tecnologie ed impianti che permettano rapide variazioni di carico, così da poter compensare gli eventuali squilibri tra produzione e richiesta. Inoltre i recenti sviluppi nel settore delle reti intelligenti (smart grid), e di conseguenza nella generazione distribuita (GD) hanno spinto allo sviluppo di tecnologie atte a rendere il più possibile indipendenti piccole parti di rete [44]. Il principio che sta alla base è quello di compensare internamente eventuali fluttuazioni lato sorgenti o lato utenza per minimizzare gli scambi con il resto della rete. In relazione a questi aspetti e ricordando che lo scopo di un sistema di conversione dell'energia è quello di soddisfare la richiesta di determinati flussi di energia o di materia sfruttando le sorgenti presenti nell'ambiente, si è potuto osservare come la possibilità di svincolare temporalmente la fase di conversione dei flussi dalla fase di ces-

sione all'utenza possa portare benefici in termini economici, ambientali, termodinamici. In tal senso i sistemi d'accumulo giocano un ruolo chiave, poiché presentano la possibilità di immagazzinare i flussi di massa e di energia in determinati istanti e di rilasciarli nei momenti voluti. Esempi tipici sono riscontrabili in [61], [13], [46] in riferimento ai benefici economici connessi all'utilizzo di sistemi di accumulo termico in combinazione con sistemi di cogenerazione. In questi casi il beneficio economico è dato dalla possibilità di svincolare i flussi di energia termica (Q) dai flussi di energia elettrica (E). In particolar modo, anche se la produzione debba avvenire in maniera contestuale, l'accumulo permette che la cessione all'utenza possa realizzarsi con tempistiche differenti. In letteratura sono presenti numerosi studi in riferimento sistemi di conversione dell'energia connessi a sistemi di accumulo. In particolare in [10] viene sviluppato un problema MILP per lo studio di un sistema di generazione distribuita in presenza di componenti di accumulo. In [45] sono analizzati e ottimizzati tre differenti casi in cui un impianto fotovoltaico è connesso rispettivamente a una batteria, un cella a combustibile, e congiuntamente ad una batteria e ad una cella a combustibile. In [47] è ottimizzato un sistema di accumulo avanzato ad aria compressa in relazione al suo possibile funzionamento in combinazione ad impianti di potenza.

La gamma di possibili sistemi di accumulo è molto ampia nel campo dell'ingegneria. Alcuni di questi sistemi hanno raggiunto una maturità tecnologica elevata e vengono utilizzati già largamente sia nei sistemi energetici sia nella vita di tutti i giorni, si pensi ad esempio ai serbatoi di accumulo per l'acqua calda sanitaria, o alle batterie al piombo. Altri derivano da tecnologie sviluppate e sono disponibili in commercio, anche se, allo stato attuale, l'utilizzo su larga scala non è diffuso (volani, aria compressa, capacitori, ecc). In altri casi i sistemi sono ancora in fase di sviluppo e pur possedendo caratteristiche molto promettenti non sono ancora attualmente disponibili in termini economicamente comparabili con i precedenti. Tale argomento verrà approfondito nel paragrafo 4.3 in cui saranno indicate e descritte le principale e più frequenti tipologie, le quali verranno classificate in relazione alla categoria (vedi par 1.2) di flusso di massa o di energia accumulato. Partendo proprio da questa classificazione nel paragrafo 4.4 si osserveranno quali siano le possibili interazioni dei sistemi di stoccaggio con i componenti del sistema e con l'ambiente esterno; di conseguenza con le sorgenti e con le utenze. Per far ciò si adopererà la superstruttura, introdotta nel capitolo 1. Nell'ultima parte di questo capitolo si affronterà il tema della modellazione dei sistemi di accumulo. In 4.5 si mostrerà come i componenti di accumulo possano essere modellati in forma simile alle unità di trasformazione in cui però si ha la presenza di equazioni differenziali nella variabile tempo. Ciò comporta che i problemi riguardanti i sistemi d'accumulo non possano essere concepiti come problemi stazionari ma solo come problemi dinamici. Nel paragrafo 4.5.2, infine, si analizzerà come possa essere definito il modello di un sistema di conversione in presenza di un componente di accumulo.

4.2 I sistemi di accumulo e il loro utilizzo nei sistemi di conversione

La normativa californiana definisce un sistema di accumulo di energia come *"Una tecnologia commercialmente disponibile che è in grado di assorbire energia, immagazzinarla per un periodo di tempo, e successivamente cederla"* traduzione [48]. Nella pratica un sistema di accumulo è rappresentato da un componente o da una serie di componenti che hanno la capacità di immagazzinare energia e/o materia e rilasciarla/e nei tempi desiderati.

Nella definizione sono facilmente distinguibili le tre fasi caratteristiche di tutti i sistemi d'accumulo [49]:

- Carica: quando in un determinato intervallo temporale si ha un aumento della quantità di energia e/o di massa contenuta nell'accumulo, ciò può essere espresso matematicamente come:

$$\frac{\partial U(t)}{\partial t} > 0 \text{ e/o } \frac{\partial Ma(t)}{\partial t} > 0$$

con $U(t)$ l'energia interna contenuta nel sistema d'accumulo e $Ma(t)$ la massa contenuta nello stesso sistema.

- Stoccaggio: quando in un determinato intervallo temporale la quantità di energia e/o massa rimane costante all'interno dell'accumulo, ciò può essere espresso matematicamente come:

$$\frac{\partial U(t)}{\partial t} = 0 \text{ e/o } \frac{\partial Ma(t)}{\partial t} = 0$$

definiti come sopra.

- Scarica: quando in un determinato intervallo temporale si ha una diminuzione della quantità di energia e/o di massa contenuta nell'accumulo, ciò può essere espresso matematicamente come:

$$\frac{\partial U(t)}{\partial t} < 0 \text{ e/o } \frac{\partial Ma(t)}{\partial t} < 0$$

definiti come sopra.

I sistemi d'accumulo trovano applicazioni in vari campi, dallo stoccaggio di alimenti nei magazzini dei supermercati alle batterie agli ioni di litio utilizzate nei telefoni cellulari. Prima di proseguire con la trattazione è utile anticipare un concetto che verrà spiegato ampiamente nel paragrafo 4.5. In questa analisi i sistemi d'accumulo saranno trattati al pari delle unità di trasformazione, e perciò saranno rappresentati da delle black-box. Come detto precedentemente l'analisi tramite black-box permette di esaminare il comportamento del componente esclusivamente considerando le relazioni tra i flussi che vi interagiscono e quindi senza analizzare nel dettaglio il funzionamento dello stesso. Questa assunzione è stata presa in conformità al grado di dettaglio assunto in tutta la trattazione, ma non impedisce comunque di svolgere considerazioni di carattere generale. Ogni diverso sistema di accumulo può accumulare esclusivamente flussi appartenenti ad una specifica categoria (vedi par. 1.2). Ciò significa che in ingresso e in uscita dal componente saranno presenti esclusivamente flussi appartenenti alla stessa categoria. Si ricorda che i flussi identificano potenze e portate, per cui quando si parla di accumulo di flussi si intende l'accumulo dell'energia e/o della massa che essi trasportano.

L'accumulo in definitiva crea la possibilità di svincolare le tre fasi caratteristiche di un sistema energetico: acquisizione dei flussi dall'ambiente (sorgenti), conversione, cessione dei flussi all'ambiente (utenze). Questa possibilità può portare benefici sia in fase di progetto sia in fase di funzionamento di un sistema, inoltre in alcuni casi il funzionamento dell'interno sistema non può prescindere dalla presenza di un sistema di stoccaggio (ad esempi in molti impianti stand alone). Si possono distinguere quattro casi in cui la presenza dell'accumulo sia vantaggiosa o indispensabile.

Progetto: In questa fase i sistemi d'accumulo sono utilizzati per livellare il carico. Il livellamento del carico permette di shiftare la produzione di un determinato flusso di massa o energia da una fase temporale in cui si ha una richiesta alta (definita picco) ad

una fase in cui la richiesta è relativamente bassa (fuori picco). Quest'operazione può essere svolta egregiamente dai sistemi d'accumulo poiché essi presentano proprio la caratteristica di poter svincolare la fase di conversione dalla fase di cessione all'utenza. Nella fase di fuori picco quindi il sistema produrrà i flussi necessari a soddisfare l'utenza e a caricare l'accumulo, nella fase di picco invece la richiesta di flussi da parte dell'utenza sarà soddisfatta in parte dal sistema e in parte dall'accumulo. Questo ha una grande influenza nella fase di dimensionamento di un sistema. Infatti, la presenza dell'accumulo permette di dimensionare il sistema non più sulla massima potenza o portata richiesta dall'utenza, bensì su valori inferiori. Ciò è facilmente spiegabile poiché, in assenza dell'accumulo un qualsiasi sistema deve essere progettato in modo da garantire il soddisfacimento dell'utenza per tutti i valori richiesti, e questo implica che la taglia del sistema debba essere assunta almeno pari al massimo carico richiesto. In presenza di accumulo la massima richiesta è soddisfatta in parte dal sistema e in parte dall'accumulo, e quindi non è necessario dimensionare il sistema sul carico massimo. [50] Nel capitolo seguente verrà portato un esempio di quanto detto.

Funzionamento: in questa fase l'accumulo comporta benefici poiché permette al sistema di non dover seguire esattamente l'andamento del carico richiesto dall'utenza e di non esser dipendente dall'andamento temporale delle sorgenti. Ciò implica che il funzionamento del sistema, ovviamente in relazione alle capacità dell'accumulo, possa essere ottimizzato tendo conto solo parzialmente dei vincoli posti dalle utenze e dalle sorgenti. Di conseguenza l'accumulo permette al sistema di lavorare maggiormente al carico nominale o in condizioni di massimo rendimento, di ridurre il numero di accensioni e spegnimento degli impianti, di compensare le rampe di carico, ecc. Tutto ciò si tramuta in benefici economici ed ambientali, poiché un ponderato utilizzo del sistema porta alla diminuzione dei costi d'esercizio ad esempio in riferimento al consumo di combustibili fossili, e di conseguenza anche in termini di emissioni oppure in relazione all'acquisto di flussi dall'ambiente (prelievo di energia elettrica dalla rete di distribuzione).[50], [51].

Fattibilità: in molti casi le richieste poste dall'utenza non possono essere soddisfatte poiché le sorgenti non presentano dei valori tali da sopperire alla richiesta. Il caso tipico sono i sistemi stand-alone in cui ci si ha la presenza di fonti rinnovabili e/o intermittenti. In questi casi è assai difficile che l'andamento temporale dell'utenza coincida precisamente con l'andamento temporale della sorgente. La risoluzione di questo problema implica che venga installato un componente d'accumulo per permettere l'immagazzinamento dell'energia o della materia quando essa sia disponibile e la cessione delle stesse alle utenze quando esse lo richiedano. In definitiva si sfrutta la possibilità creata dall'accumulo di svincolare temporalmente la fase di acquisizione e conversione da quella di cessione all'utenza.

Altre: i sistemi di accumulo sono utilizzati anche con altre finalità. Molte delle quali sono connesse alla qualità del servizio di distribuzione dell'energia elettrica. Di seguito verranno citati i principali benefici senza soffermarsi nel particolare poiché essi sono esclusi dallo scopo di questo lavoro di tesi, ed inoltre presentano valori temporali connessi al processo di carica e scarica molto inferiori ai tempi caratteristici per i sistemi analizzati in questo lavoro. In relazione alla rete di distribuzione dell'energia elettrica i sistemi d'accumulo sono utilizzati per [50]:

- Regolazione di frequenza e smorzamento delle oscillazioni: riferito alla stabilità del sistema in relazione alle variazioni di carico.
- Riserva operativa: si riferisce alla capacità di generazione che è disponibile e può

essere iniettato nel sistema dalla decisione dell'operatore entro un breve periodo di tempo.

- Low voltage ride-through: un problema riferito agli squilibri di tensione che si hanno nel punto in cui un generatore è collegato in relazione ad un disturbo della rete vicina.

4.3 Review sui principali sistemi d'accumulo

La scelta su quale sia il metodo di accumulo migliore per un sistema dato dipende da svariati fattori come: l'andamento temporale delle richieste e delle sorgenti, le caratteristiche del sistema, le caratteristiche del sistema d'accumulo, i costi economici, ecc. Nel paragrafo 4.2 si è visto come i sistemi di accumulo possano essere tratti come dei componenti che possono accumulare flussi appartenenti ad una stessa categoria (vedi par 1.2). Questo fatto fa intuire come un possibile modo di classificare i sistemi d'accumulo sia quello di distinguerli considerando la categoria di flusso che viene immagazzinata. E quindi saranno possibili accumuli di flussi Q, E, F, M e W .

Nei paragrafi successivi verranno descritti per le diverse categorie di accumulo le principali tecnologie utilizzate nei sistemi energetici. Per capire bene il funzionamento dei componenti di accumulo è d'uopo analizzare con un grado di dettaglio maggiore il componente, in pratica osservare l'interno della black-box. Si vedrà come spesso l'accumulo di una determinata forma di energia (flussi appartenenti ad una specifica categoria) possa avvenire esclusivamente tramite conversione in energia di diversa forma e la successiva riconversione nella forma iniziale. Tale processo di conversione avviene, ovviamente, all'interno dei confini del componente e quindi sarà sempre verificata la condizione che i flussi in ingresso e in uscita appartengano alla stessa categoria. Si è ritenuto opportuno aumentare il grado di dettaglio per far comprendere meglio il funzionamento dei sistemi di accumulo.

4.3.1 Accumulo di flussi di energia termica e frigorifera Q

I sistemi di accumulo di flussi Q nella pratica vengono definiti con l'acronimo TES (Thermal Energy Storage). Il principio di funzionamento di base di un sistema TES è sempre individuato dalle tre fasi tipiche dell'accumulo: l'energia è fornita alla TES (carica), è conservata (stoccaggio) e poi viene rimossa dal TES per un uso successivo (scarica). Nei sistemi pratici, alcune delle fasi possono presentarsi contemporaneamente, ed ogni fase può accadere più di una volta in ogni ciclo di stoccaggio. Un flusso Q è associato alla variazione di titolo e/o di temperatura da parte di un determinato fluido vettore. In un sistema d'accumulo l'energia termica U_q presente può essere calcolata parimenti in funzione della massa contenuta Ma_q e dell'energia specifica h_q (dovuta alla variazione di temperatura e/o di titolo).

$$U_q(t) = Ma_q(t) \cdot h_q(t).$$

Criteri diversi portano a diverse categorie di tecnologie di stoccaggio dell'energia termica. Se si utilizza un criterio basato sul livello di temperatura di energia termica accumulata, le soluzioni di accumulo termico possono essere divisi in "bassa temperatura d'immagazzinamento dell'energia termica (LT TES Low Temperature Thermal Energy Storage)" e "alta temperatura di immagazzinamento dell'energia termica (HT TES High Temperature Thermal Energy Storage)". Il sistema LT TES opera in un intervallo di temperatura inferiore a 200 °C ed è stato ampiamente studiato e sviluppato. Applicazioni degli LT TES

possono essere riscontrate nel condizionamento degli edifici, nella gestione dell'acqua calda sanitaria, e nelle serre solari. Il sistema HTTES svolge un ruolo fondamentale nel settore delle tecnologie energetiche rinnovabili e recupero di calore di scarto. Oggi la maggior parte degli utilizzi dei sistemi HTTES sono comunque focalizzata su applicazioni relative all'energia solare termica. Se il criterio è basato sulla lunghezza temporale di calore termica accumulata, può essere diviso in "breve" e "lungo termine". L'ultimo criterio di distinzione, che è quello utilizzato in questa trattazione, è basato sul particolare processo di accumulo: mediante un incremento o una riduzione della temperatura di una sostanza (sfruttando il calore sensibile), o cambiando la fase di una sostanza (sfruttando il calore latente) o attraverso una combinazione dei due.

Accumulo Termico Sensibile

Nell'accumulo termico sensibile, l'energia viene immagazzinata variando la temperatura di materiale di accumulo come acqua, aria, olio, sali, mattoni, sabbia o suolo.

$$U_q(t) = M a_q(t) \cdot c_p \cdot \delta T(t).$$

La quantità di energia immagazzinata in un TES a calore sensibile è proporzionale alla differenza tra le temperature di stoccaggio finale ed iniziale, la massa della sostanza di stoccaggio, e la sua capacità termica. Ogni sostanza presenta i suoi vantaggi e svantaggi. Per esempio, l'acqua ha circa il doppio del calore specifico delle rocce e del suolo. L'elevata capacità termica dell'acqua ($\approx 4.2 kJ/kg$) la rende spesso una scelta logica per i sistemi di TES che operano in un intervallo di temperatura basso (LTTES). La capacità termica relativamente bassa di rocce e ceramica ($\approx 0.84 kJ/kg$) è in qualche modo compensata dalle elevate temperature possibili con questi materiali, e dall'elevata densità [52]. Due svantaggi sono inerenti ai sistemi di accumulo termico sensibile: le grandi dimensioni di solito richieste e la variazione della temperatura dovuta all'aggiunta e/o all'estrazione di energia [53]. In particolar modo le dimensioni sono fattori importanti nei sistemi energetici sia in relazione all'ingombro sia in relazione alle perdite. Per limitare le dimensioni quindi si può incrementare il gradiente termico (ovviamente in relazione al resto del sistema), utilizzare sostanze che presentano alti valori di capacità termica e/o densità. Nonostante queste accortezze questi sistemi presentano dimensioni notevoli se paragonati ad altri metodi di accumulo.

Un sistema TES sensibile consiste in una sostanza di accumulo, un contenitore, e i dispositivi d'ingresso/uscita. Il contenitore ha sia il compito di conservare la sostanza di accumulo sia di prevenire perdite di energia termica. I sistemi di accumulo termico sensibili più diffusi sono:

- **Accumulo in serbatoio:** Questo è sicuramente il metodo più diffuso di accumulo termico sensibile. I serbatoi convenzionalmente possono essere in acciaio, cemento armato, disposti in superficie o nel sottosuolo a seconda dei volumi coinvolti. Le capacità di stoccaggio tipiche sono intorno ai $60-80 kWh/m^3$. Tali sistemi possono essere utilizzati sia per accumulo di breve periodo (ore o giorni) sia per accumuli stagionali (capacità termiche intorno ai $30-50 kWh/m^3$), ciò è in relazione ovviamente alle dimensioni si passa dai $50-100 m^3$ per i primi ai $500-6000 m^3$ per i secondi [55]. Nella maggior parte dei casi la sostanza accumulata è acqua. L'acqua, infatti, è uno dei migliori fluidi di supporto per l'accumulo a bassa temperatura [53]. Ha calore specifico più elevato rispetto ad altri materiali, è economica e ampiamente disponibile.

Un fenomeno tipico nei serbatoi è la stratificazione. Essa è influenzata dalle di-

mensioni, dal volume, dalle geometrie, dalle portate d'acqua, e dalle condizioni di circolazione del sistema di stoccaggio. È stato dimostrato che la stratificazione in un accumulo di energia termica (TES) possa aumentare considerevolmente le prestazioni del sistema. La stratificazione assicura la temperatura massima nella parte superiore e la temperatura minima nella parte inferiore del serbatoio ed è ottenuta attraverso l'eliminazione di miscelazione durante la fase di stoccaggio. Nella stratificazione, infatti, si sfrutta il gradiente di densità associato al gradiente termico, in cui il fluido a temperatura maggiore presenta il minor valore di densità e tende quindi a "galleggiare" sugli altri. Per i serbatoi di grandi dimensioni è necessario disporre di tecnologie in grado di garantire la tenuta stagna (per minimizzare le perdite di calore attraverso le pareti) e ottimizzare la stratificazione all'interno del serbatoio, in modo da preservare il rendimento termico. Uno dei maggiori svantaggi dell'accumulo d'acqua sono rappresentate dalle temperatura d'esercizio, è noto infatti che a pressione atmosferica l'acqua si presenta allo stato liquido nel range di temperatura 0-100 °C. Questo problema può essere ovviato in tre modi: incrementando il valore della pressione, aggiungendo all'acqua altre sostanze (glicole), cambiando sostanza. Rimanendo nei sistemi a bassa temperatura negli ultimi anni si sono sviluppati sistemi d'accumulo a sostanze solide come sabbia o pietre. Per i sistemi ad alta temperatura HTTES i recenti progressi sono stati causati dal crescente interesse nel settore del solare termodinamico.

L'intermittenza della fonte primaria (la radiazione solare) presenta il principale ostacolo per la competitività di questa tecnologia. Sistemi d'accumulo adeguati possono sopperire a tale mancanza. Nel solare termodinamico le temperature richieste per i sistemi di stoccaggio sono tali da non permettere l'utilizzo dell'acqua, $>300^{\circ}\text{C}$. Per queste applicazioni in molti casi la stratificazione risulta complicata e si predilige l'utilizzo di due serbatoi uno per il fluido caldo ed uno per il fluido freddo. In questi casi vengono scelte altre tipologie di sostanze. Per quanto riguarda i materiali solidi, cemento e ceramica sono i più studiati, soprattutto a causa del loro basso prezzo e della buona conducibilità termica. Negli ultimi anni, studi del DLR di Stoccarda hanno dimostrato che il calcestruzzo è una buona soluzione da applicare nel accumulo termico, ciò è dovuto principalmente al suo basso costo, facilità di manipolazione e stabilità strutturale. In tabella vengono riportate le principali caratteristiche [54]:

Tabella 4.1: Principale proprietà del cemento e della ceramica

| Materiale | Ceramica | Cemento |
|--|-----------------|----------------|
| Densità [kg/m^3] | 3500 | 2750 |
| Calore specifico a 350 °C [J/kg K] | 866 | 916 |
| Conducibilità termica a 350 °C [W/m K] | 1.35 | 1.0 |
| Coefficiente di espansione termica a 350 °C [$10^{-6}/K$] | 11.8 | 9.3 |

Per ciò che concerne i materiali liquidi, una varietà di fluidi sono stati testati per il trasporto del calore: aria, olio, e sodio, prima che i sali fusi siano stati selezionati come più performanti. I sali fusi hanno i seguenti vantaggi sono liquidi a pressione atmosferica, le temperature di esercizio sono compatibili con i principali sistemi di conversione, sono non infiammabile e non tossico. Inoltre, i sali fusi vengono utilizzati

nelle industrie chimiche e siderurgiche come fluido per il trasporto termico, e ciò significa la possibilità di sfruttare un buon background tecnologico. Trai sali fusi i due principali candidati sono il cosiddette sale solare e un sale commercialmente chiamato come HitecXL. Il sale solare è un sale binario costituito per il 60 % di $NaNO_3$ e per il 40% KNO_3 . Il sale HitecXL è un sale ternario costituito da 48% di $Ca(NO_3)_2$, 7% $NaNO_3$, e il 45% KNO_3 . [54]. In figura 4.1 è rappresentata la configurazione di un impianto solare termodinamico.

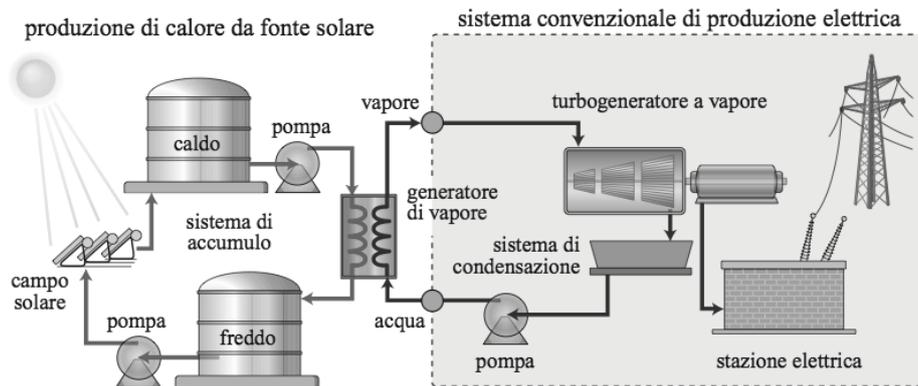


Figura 4.1: Schema generale di un impianto solare termodinamico

- Accumulo nel sottosuolo: se è richiesta un'elevata capacità d'accumulo i serbatoi possono essere economicamente e spazialmente non convenienti. In questo caso i flussi di energia termica possono essere accumulati nel sottosuolo. Ci sono sostanzialmente tre metodologie sfruttabili [55]:
 - Tubi termici (ad esempio scambiatori di calore immersi nel sotto-suolo), sono richiesti grandi volumi di accumulo per migliorare l'efficienza, si possono raggiungere $15-30 \text{ kWh/m}^3$
 - Sistemi di accumulo in falda acquifera (ATES), sono caratterizzati da un volume di accumulo inferiore ma presentano dipendenza dalle specifiche del sito, all'incirca $30-40 \text{ kWh/m}^3$.
 - Sistemi di accumulo in caverna artificiale con volumi limitati, si ottengono $40 - 60 \text{ kWh/m}^3$.

In particolare modo i sistemi ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) trovano ampio spazio soprattutto nel campo edilizio, in riferimento al condizionamento degli edifici. Questi sistemi funzionano, solitamente, in combinazione alle pompe di calore e sfruttano due falde acquifere (o meglio due serie distinte di pozzi) una per il prelievo e l'immissione di acqua più calda della temperatura naturale della falda, l'altra per il prelievo e l'immissione di acqua più fredda della temperatura naturale della falda. Queste due serie di pozzi costituiscono due sistemi d'accumulo del tutto paragonabili al sistema a due serbatoi visto nel caso precedente. I pozzi perforati a distanza tale da minimizzare l'interferenza termica reciproca, alternano la propria funzione stagionalmente: nella stagione estiva, il prelievo d'acqua per i condensatori delle pompe di calore è effettuato dal pozzo freddo, mentre si immette acqua nel pozzo caldo. Viceversa nella stagione invernale: l'acqua da inviare agli evaporatori delle pompe di

calore è estratta dal pozzo caldo, ed è reimpressa in falda attraverso il pozzo freddo [19].

Accumulo termico latente

Nei sistemi di stoccaggio latenti, durante il processo di accumulo di energia, la sostanza contenuta nell'accumulo varia il suo stato di aggregazione (cambiamento di fase), è così viene chiamato materiale a cambiamento di fase (Phase Change Material) [53]. Il calore latente è generalmente molto superiore calore sensibile per una data sostanza, e quindi siano necessari volumi di stoccaggio minori, inoltre la variazione di temperatura durante il funzionamento è limitata perché il cambiamento di fase avviene a pressioni pressoché costanti. Quando l'acqua si trasforma in vapore, il calore latente è dell'ordine di 2 MJ/kg [53]. In particolare l'energia contenuta all'interno di un sistema d'accumulo a calore latente:

$$U_q(t) = Ma_q(t) \cdot r(T) \cdot \Delta x(t).$$

In cui U_q identifica l'energia termica, Ma_q la massa del PCM, r il calore latente (che è funzione della temperatura o della pressione a cui avviene il cambio di fase) e della variazione di titolo.

Qualsiasi sistema di accumulo latente deve possedere almeno i seguenti tre componenti [57]:

- Una sostanza di accumulo termico che subisce una transizione di fase entro il campo di temperatura di funzionamento desiderata, ed in cui la maggior parte del calore viene stoccato come calore latente.
- Un contenimento per la sostanza stoccaggio.
- Una superficie di scambio termico per il trasferimento di calore in ingresso e in uscita.

La maggior parte dei sistemi pratici che utilizzano il cambiamento di fase nell'accumulo di energia impiega soluzioni di sali disciolti in acqua. Diversi problemi sono associati a tali sistemi:

- Si può avere un sovra-raffreddamento del PCM, piuttosto che la cristallizzazione con rilascio di calore. Questo problema può essere evitato parzialmente aggiungendo piccoli cristalli come agenti nucleanti.
- È difficile costruire uno scambiatore di calore in grado di trattare in modo efficiente l'agglomerato di varie dimensioni di cristalli che galleggiano nel liquido.
- Il funzionamento del sistema non può essere completamente invertito.
- Il materiale a cambiamento di fase di solito presenta un basso valore di conducibilità termica.

I sistemi di accumulo latenti possono essere utilizzati sia per l'accumulo di breve periodo sia per l'accumulo stagionale. Il materiale più tradizionale e storico utilizzato nello stoccaggio stagionale è H_2O , la cui forma liquida è comunemente noto come acqua, mentre la fase solida è rappresentata da ghiaccio o neve. Una recente applicazione di successo d'accumulo di neve ghiaccio è stato utilizzato nel ospedale Sundsvall in Svezia, ed è stato ricercato da Skogsberg e Nordell [56]. L'accumulo di calore latente è una tecnica di stoccaggio promettente, in quanto fornisce una elevata densità di immagazzinamento di energia, secondo solo

allo stoccaggio energia chimica, e può immagazzinare e rilasciare calore a temperatura costante corrispondente alla temperatura di transizione di fase del fluido termoaccumulatore. Un aspetto fondamentale in questa tipologia d'accumulo è la scelta del materiale a cambiamento di fase. I criteri per la scelta sono molteplici; si devono effettuare considerazioni di tipo economico, fisico, chimico, tecnologico. Senza entrare troppo nel dettaglio per non appesantire troppo la trattazione le principali caratteristiche che dovrebbe possedere un PCM sono:

- Possedere un punto di fusione nel range di temperatura desiderata
- Elevato calore latente per unità di massa
- Abilità di completa inversione di ciclo nella transizione
- Chimicamente stabile e compatibile con il contenitore
- Limitati cambi di volume nel cambiamento di fase
- Non tossico, non infiammabile, non esplosivo
- Economico, in relazione all'applicazione.

In letteratura si dà ampio spazio ai PCM per approfondire l'argomento possono essere utili gli studi di [57], [58], [59]. Considerando il passaggio di fase solido-liquido, che è solitamente il più frequente, i PCM possono essere distinti in tre categorie [53]:

- PCM organici: possono essere distinti a loro volta in paraffine e non-paraffine. Le prime (delle quali la più degna rappresentatrice è una miscela a catena lineare di n-alcani $(CH_3 - (CH_2)_N - CH_3)$) presentano il vantaggio di essere sicure, chimicamente inerti, stabili sotto i 500°C , abbastanza economiche, non corrosive, bassa tensione di vapore in forma liquida. Dall'altra parte presentano degli svantaggi come bassa conducibilità termica, non compatibilità con la plastica e sono infiammabili. I PCM non-paraffine rappresentano una categoria molto ampia in cui sono compresi ad esempio gli esteri e il glicole. Presentano vantaggi simili alle paraffine come elevato calore di solidificazione, stabilità chimica, limitata tendenza al sottoraffreddamento; i principali svantaggi sono bassa conducibilità, infiammabilità, tossicità, instabilità alle alte temperature.
- PCM inorganici: i materiali a cambiamento di fase inorganici includono idrati di sale, sali, metalli e leghe. In particolar modo gli idrati di sale come il solfato di sodio decaidrato (sale di Glaubert), cloruro di calcio esaidrato, tiosolfato di sodio pentaidrato, sodio acetato triidrato, sono stati studiati in gran parte a causa del loro basso costo. I principali vantaggi di composti inorganici sono un'elevata capacità termica volumetrica latente, spesso il doppio della capacità di composti organici ed elevata conducibilità termica. Gli idrati di sale possono essere considerati come leghe di sali inorganici e acqua che formano un solido cristallino tipico di formula generale $AB * nH_2O$ (AB rappresenta il sale inorganico). La trasformazione solido-liquido di idrati di sale è in realtà una disidratazione del sale, anche se questo processo non è propriamente una fusione può essere termodinamicamente considerato in maniera analoga. I principali svantaggi dell'utilizzo di sali fusi sono rappresentati da sottoraffreddamento, corrosione e mancanza di stabilità termica. I PCM metallici sono

un'altra tipologia di materiali inorganici, contraddistinta dai metalli basso fondenti. In realtà questa tipologia di materiali non sono ancora molto considerati a causa del loro peso. Questi però presentano notevoli vantaggi sia in termini di calore di solidificazione sia in relazione alla conducibilità termica.

- PCM eutetici: sono una miscela di differenti PCM, che hanno una temperatura di transizione di fase fissa. I componenti possono essere sia PCM inorganici sia PCM organici, sulla base del quale i PCM eutettici sono normalmente classificati in tre sottogruppi: eutettici inorganico-inorganico, eutettici organico-organico, e eutettiche organico-inorganico. I componenti dei PCM eutettici hanno la caratteristica di liquefarsi e solidificare congruentemente e contemporaneamente, in modo che non avvengano fenomeni di segregazione.

4.3.2 Accumulo di flussi di energia elettrica E

Lo stoccaggio dei flussi di energia elettrica E (definito EES Electrical Energy Storage), presenta caratteristiche differenti rispetto all'accumulo di flussi termici. L'energia elettrica, infatti, difficilmente permette di essere accumulata in quanto tale; lo stoccaggio di detta forma deve avvenire mediante la trasformazione della stessa in una forma differente. È perciò facile pensare come i sistemi d'accumulo presentino complessità maggiore rispetto al caso precedente. L'utilità di avere sistemi di accumulo di energia elettrica è nota da anni, si pensi ad esempio che la prima centrale idroelettrica con possibilità di pompaggio è stata messa in funzione nel 1929. Questi sistemi sono molto utili sia su grandi scale, in relazione alla stabilità e al funzionamento della rete elettrica, (peak shaving, Load leveling, regolazione di frequenza, ecc) sia su scale minori in relazione a sistemi portatili o stand alone. La classificazione delle diverse tecnologie per l'accumulo elettrico può seguire diversi criteri. Possono essere distinti in relazioni al tempo di carica, e scarica e di conseguenza in relazione al relativo campo di impiego. Si passa da sistemi che possono venir scaricati in pochi secondi (ad esempio i supercapacitori o i volani), e che quindi vengono utilizzati soprattutto per migliorare la qualità del servizio elettrico, a sistemi che impiegano giorni per le fasi di carica e scarica (ad esempio i sistemi idroelettrici a pompaggio o i sistemi CAES), ed in questo caso l'utilizzo è rivolto maggiormente al livellamento del carico o alla compensazione dell'intermittenza di una data fonte. Un'altra metodologia di classificazione è relativa alla forma di energia in cui i flussi E sono trasformati per poter essere immagazzinati. Con questa distinzione si identificano sostanzialmente tre maxi categorie: accumulo in energia meccanica (a sua volta distinto in potenziale, cinetica) ,accumulo in energia elettrochimica, e accumulo in energia chimica.

Accumulo in energia meccanica (cinetica e potenziale)

Sistemi idroelettrici a pompaggio: i Pumped hydro energy storage systems (PHES) rappresentano uno dei metodi più diffusi e più conosciuti per l'accumulo di energia elettrica su ampia scala, si stima [55], [50] che la capacità mondiale installa per questi sistemi sia di 82,8 GW. Questi sistemi funzionano convertendo l'energia elettrica in energia potenziale in fase di carica e viceversa nella fase di scarica. Questa conversione avviene mediante un sistema, la cui configurazione è rappresentata in figura 4.2; in cui sono presenti due serbatoi di accumulo d'acqua posti a due altezze differenti, una turbina e una pompa. In molti casi le fasi di turbinaggio e pompaggio possono essere svolte da una stessa macchina

(pompa/turbina reversibile).

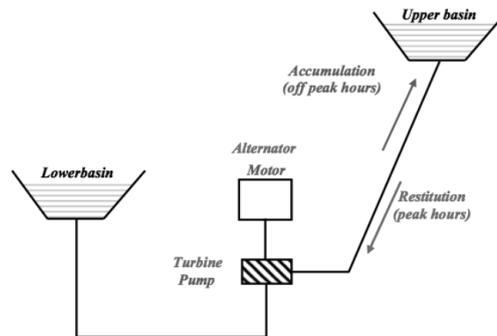


Figura 4.2: Schema generale di sistema idroelettrico a pompaggio

Il principio di funzionamento è molto semplice. Facendo riferimento ai sistemi idroelettrici a pompaggio connessi alla rete di trasmissione, le tre fasi tipiche dei sistemi d'accumulo sono rappresentate da: una prima fase (solitamente le ore notturne) in cui in relazione al prezzo dell'energia elettrica basso, il sistema pompa (utilizzando un flusso di energia elettrica) una determinata quantità d'acqua dal bacino inferiore al bacino superiore; una seconda fase in cui nel bacino superiore è conservata una determinata quantità di energia potenziale, ed una terza fase in cui parte dell'energia potenziale è sfruttata per azionare la turbina con conseguenza restituzione dell'energia elettrica. Avendo a che fare con delle trasformazioni di energia è ovvio pensare che l'intero processo d'accumulo sia caratterizzato da un'efficienza non unitaria. Infatti, per svolgere un ciclo completo carica e scarica bisogna passare per il rendimento di conversione di energia elettrica in energia potenziale in fase di pompaggio e viceversa in fase di turbinaggio. Per ciò che concerne le turbine il valore del loro rendimento si attesta all'incirca sul 95%, le pompe presentano rendimento minore. Solitamente l'efficienza totale del sistema è all'incirca del 65-75% [55], [52]. Per cui per ogni kWh di energia prodotta è richiesto all'incirca 1,4 kWh.

L'energia accumulata nel serbatoio superiore può essere calcolata come: $U(t) = \rho \cdot Ma(t) \cdot g \cdot H(t)$ in cui si può osservare che la capacità d'accumulo sia proporzionale alla massa contenuta ($Ma(t)$) e all'altezza ($H(t)$) (differenza di quota tra i due bacini). Ciò significa che per poter accumulare una quantità di energia elevata bisogna disporre o di serbatoi di grandi dimensioni (elevata massa contenuta al loro interno) o di elevate altezze utili.

Uno dei principali vantaggi di questi sistemi è la velocità di entrata in funzione dell'impianto, meno di un minuto per raggiungere il 100% della potenza nominale. Il principale svantaggio di questi sistemi ed in particolar modo di quelli caratterizzati da un grande potenziale nominale è la forte dipendenza geografica per il posizionamento dei due bacini. Inoltre la costruzione di nuovi bacini è molto difficile sia per l'onere economico relativo alle opere civili, sia in relazione a considerazioni di tipo geologico, ambientale e sociale. Per cui solitamente vengono sfruttati i bacini di impianti idroelettrici esistenti.

È ancora in fase di sviluppo, l'utilizzo di un serbatoio superficiale superiore in combinazione con un serbatoio inferiore artificiale. Il serbatoio superficiale superiore può essere un accumulo d'acqua già presente in natura, ad esempio un lago. Il serbatoio inferiore, invece è una grande caverna scavata nella dura roccia. I due serbatoi sono idraulicamente collegati dal corso d'acqua che passa attraverso una centrale elettrica con un duplice scopo

turbina/pompa e generatore/motore. Questo sistema opera nello stesso modo di un sistema convenzionale. Il serbatoio inferiore può essere posizionato per ottenere altezze utili di circa 1400 m (rispetto ai 300 m che solitamente caratterizzano le strutture idroelettrici convenzionali), per cui potenze comparabili possono essere raggiunti con serbatoi significativamente più piccoli. Sistemi interrati possono essere più facilmente accettati dall'opinione pubblica in quanto l'impatto ambientale è ridotto [52].

Sistemi d'accumulo ad aria compressa: i Compressed air energy storage systems (CAES) sono sistemi che conservano l'energia elettrica sotto forma di energia di pressione di una massa d'aria. Sono gli unici sistemi insieme ai sistemi idroelettrici a pompaggio a permette l'accumulo di energia in modo efficiente su grande scala. In linea di principio il funzionamento di un sistema CAES è molto simile ad quello di una turbina a gas, eccezion fatta per la mancata relazione tra la fase di compressione e di espansione. I sistemi CAES sono composti da un motore/generatore elettrico, un compressore, un serbatoio d'accumulo per l'aria e una turbina si veda figura 4.3. Le tre fasi caratteristiche dell'accumulo

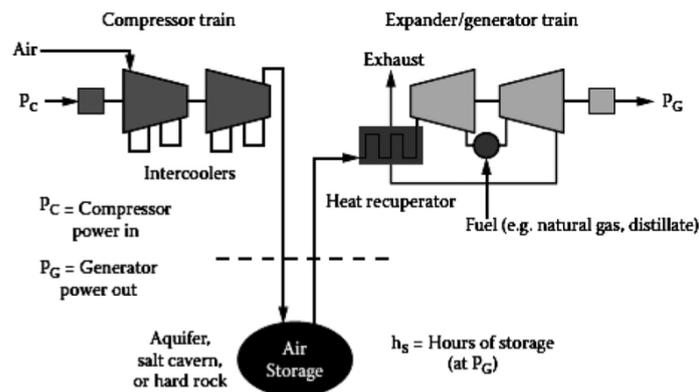


Figura 4.3: Schema generale di sistema CAES

possono essere distinte come: l'utilizzo di energia elettrica (o come surplus dalla rete o derivata da fonti rinnovabili) per azionare il compressore e comprimere l'aria (40-100 bar) all'interno del serbatoio d'accumulo (carica), la conservazione dell'energia all'interno del serbatoio (stoccaggio), e la fase di rilascio dell'aria verso la turbina con la generazione di un flusso di energia elettrica E.

A differenza delle turbine a gas convenzionali quindi i sistemi CAES non presentano un collegamento diretto tra turbina e compressore, solitamente espresso dal calettamento sullo stesso albero. Nella fase di compressione in molti casi si ha il raffreddamento dell'aria, ciò è fatto per minimizzare il volume d'accumulo e per ridurre lo stress sulle pareti del sistema di stoccaggio [47], [52]. Il raffreddamento dell'aria può provocare però problemi in fase di espansione in turbine, poiché durante un processo di espansione la temperatura diminuisce e può raggiungere valori non permessi per il funzionamento dell'impianto. Per evitare questo problema è quindi necessario riscaldare l'aria prima di esser inviata alla turbina, ciò può essere sfruttando la combustione del gas naturale o restituendo parte del calore prelevato in fase di compressione e accumulato in opportuni sistemi d'accumulo (AA-CAES)[47].

Nella gran parte dei sistemi è presente una valvola di laminazione prima dell'ingresso in turbina per portare il valore di pressione al livello desiderato. La fase di stoccaggio può avvenire sfruttando tre tipologie differenti di serbatoi: serbatoi acquiferi (analoghi a quelli utilizzati per il gas naturale), caverne di sale, caverne costruite artificialmente in formazioni

rocciose [53]. Inoltre si possono distinguere due configurazioni possibili per lo stoccaggio dell'aria compressa [52]: nella prima il volume del serbatoio è costante e la pressione si incrementa in fase di carica e si decrementa in fase di scarica; nella seconda la pressione è mantenuta per mezzo di una forza esterna (volume variabile). Si veda la figura 4.4. A

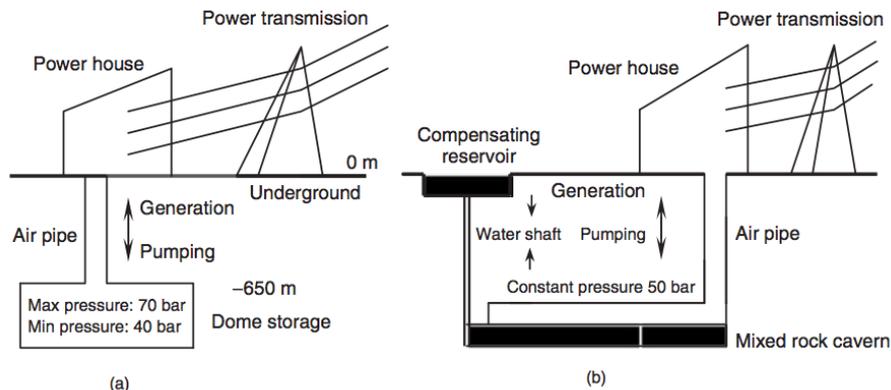


Figura 4.4: Configurazioni possibili di sistema CAES

livello economico questi sistemi sono comparabili con gli impianti a pompaggio; 400-800 €/kW anche se sono fortemente influenzati dalla tipologia del sistema di accumulo dell'aria compressa. Tale fattore rappresenta anche uno dei maggiori svantaggi in quanto, al pari dei sistemi a pompaggio, il posizionamento di sistemi CAES è fortemente influenzato dalla componente geografica.

In letteratura sono riportati diversi valori per l'efficienza del ciclo, [52], [53], [47] all'incirca si ha un range che va dal 66% al 82%. Attualmente sono in funzione solo due sistemi CAES nel mondo. Il primo si trova ad Huntorf Amburgo, in Germania. L'impianto è collegato alla rete elettrica locale. Durante le ore di punta, l'aria viene compressa a circa 47.780 kPa e memorizzata in due caverne ricavate da una cupola salina. La capacità di stoccaggio globale è di 283.179 m^3 . Durante i periodi di picco della domanda, l'aria viene rilasciata, dopo esser stata riscaldata da gas naturale, e espansa in turbine ad alta e bassa pressione. Il sistema può generare 290 MW per un massimo di circa 2 h. L'impianto Huntorf richiede un input di energia elettrica di 0,8 kWh per la compressione dell'aria e 1,5 kWh di ingresso del gas naturale per il riscaldamento, per ogni 1,0 kWh di produzione dell'impianto.[TESSeA]. Il secondo si trova in Alabama, presenta una potenza di 110 MW e la sua caverna di 560.000 m^3 progettata per operare con pressioni tra i 45 e i 74 bar permette la generazione per 26h della potenza nominale.

Volani: i Flywheel Energy Storage System (FES) vengono utilizzati in particolar modo per migliorare la qualità del servizio in quanto sono caratterizzati da tempi di scarica molto brevi sulla scala dei secondi. Per questo motivo si descriverà solo brevemente i principi base di funzionamento senza fare un'analisi dettagliata. Tali sistemi immagazzinano energia elettrica convertendola in energia cinetica associata ad una massa rotante. Questi sistemi sono composti da un motore/generatore al quale è collegata una massa che ruota su due cuscinetti magnetici al fine di diminuire l'attrito ad alta velocità. L'intera struttura può essere posta nel vuoto per ridurre ulteriormente le perdite.[53] Le tre fasi tipiche dell'accumulo possono essere descritte come: una prima fase in cui la macchina funziona come motore e porta in rotazione ad una determinata velocità angolare la massa (carica), la secon-

da fase dove la macchina viene scollegata dal volano che rimane in rotazione (stoccaggio), la terza fase in cui è ripristinato il collegamento con il volano, la macchina qui funziona da generatore con la produzione di un flusso di energia elettrica E . Sono disponibili due tipologie di volani: volani in acciaio con una bassa velocità di rotazione ($<6000\text{rpm}$) e volani in materiale composito con un'elevata velocità di rotazione ($10^4 - 10^5\text{ rpm}$). Gli svantaggi connessi a questi sistemi oltre alla rapida scarica, sono la relativamente bassa densità di energia (circa 125 Wh/kg ma influenzata dal tipo di materiale) e l'elevato fattore di autoscarica. L'autoscarica è un fenomeno che caratterizza la fase di stoccaggio, quando cioè il volano viene disaccoppiato dal generatore/motore, e che determina la quantità di energia persa in un determinato intervallo di tempo (solitamente l'ora) a causa degli attriti. Per i volani l'autoscarica porta ad una perdita del 20% della capacità totale in un ora. Ciò in parte è compensato da un'efficienza di ciclo relativamente alta 90-95%.

Accumulo in energia elettrochimica

Batterie L'accumulo elettrochimico è caratterizzato dalla capacità di convertire l'energia chimica di legame direttamente in elettricità. I sistemi che si basano su questo principio sono comunemente definiti Batterie. In questi sistemi si ha la conversione dell'energia elettrica in energia elettrochimica associata allo svolgersi di determinate reazioni. Queste reazioni hanno luogo all'interno di una cella elettrolitica, e coinvolge due elettrodi immersi in un elettrolita ed un circuito esterno che permette l'immissione o l'estrazione di potenza elettrica. Le reazioni elettrochimiche comportano il trasferimento di elettroni da un elettrodo all'altro attraverso un circuito elettrico esterno, e il trasferimento di ioni tra gli elettrodi grazie all'elettrolita. Ogni batteria è costituita da celle singole o multiple, collegate in serie o in parallelo in funzione della tensione di uscita desiderata e della capacità [53]. Ogni cella è costituita da:

- Anodo o elettrodo negativo che fornisce elettroni e viene ossidato durante la reazione elettrochimica;
- Il catodo o elettrodo positivo che accetta elettroni e si riduce durante la reazione;
- L'elettrolita che fornisce il mezzo per il trasferimento di elettroni tra l'anodo e il catodo;
- I separatori tra elettrodi positivi e negativi per l'isolamento elettrico.

Le tre fasi caratteristiche dell'accumulo possono essere descritte come segue. Nella fase di scarica l'anodo è l'elettrodo che viene ossidato inviando ioni positivi attraverso l'elettrolita e elettroni attraverso il circuito esterno. Contestualmente il catodo riceve gli elettroni dal carico. Per mantenere la corrente nel circuito esterno, gli elettroni devono essere generati all'anodo ed consumati al catodo allo stesso tempo. Nella fase di stoccaggio non avvengono reazioni e la quantità di energia contenuta in una cella rimane all'incirca costante (si ha la presenza di fenomeni di autoscarica), nella fase di carica invece si ha l'imposizione dall'esterno di un flusso di elettroni che sviluppa reazioni inverse rispetto al processo di carica [53]. Nella pratica sono disponibili due tipologie di batterie: le batterie primarie sono quelle che permettono un solo ciclo di carica e scarica, le batterie secondarie invece consentono un numero superiore di cicli. In questa trattazione verranno prese in considerazione soprattutto le seconde poiché trovano maggior applicazione nei sistemi energetici. Le batterie sono selezionate sulla base di considerazioni sulla quantità di energia e potenza che possono fornire.

Le caratteristiche che contraddistinguono le differenti batterie sono: la tensione ai capi della cella, l'efficienza, la durata di vita, la profondità di scarica (DOD) e la densità di energia. La durata di vita di una batteria è solitamente espressa in numero di cicli. Dove un ciclo rappresenta una fase di carica e la successiva fase di scarica. La profondità di scarica esprime la quantità di energia presente all'interno della cella. Questi parametri sono tutti fortemente influenzati dalla composizione della batteria, cioè da quali elementi vengono assunti come elettrodi e come elettrolita.

L'utilizzo di batteria nei sistemi energetici ha avuto un buon sviluppo negli ultimi anni, soprattutto in relazione della forte penetrazione nel mercato delle fonti rinnovabili. Le batterie presentano i seguenti vantaggi: grande modularità, grande disponibilità di taglie, entrata in funzione praticamente immediata, scarsa manutenzione richiesta. Di contro tale tecnologia presenta degli svantaggi notevoli che ne limita l'utilizzo su ampia scala: bassa densità di energia, piccole potenze disponibili, ciclo di vita limitato e limitata capacità di scarica. Le batterie che sono o in uso e/o potenzialmente adatte per applicazioni di carattere energetico sono batterie al piombo acido, batterie a base di nichel, batteria zolfo-sodio e batterie agli ioni di litio. Nel seguito verranno brevemente descritte le caratteristiche principali.

- Batterie al piombo: sono i dispositivi di conversione elettrochimica più diffusi e più economici [53] (più del 90% del mercato [50]). Batterie al piombo-acido sono basate su reazioni chimiche che coinvolgono biossido di piombo (che costituisce l'elettrodo catodo), piombo (che costituisce l'elettrodo di anodo) e acido solforico che agisce come elettrolita. Ci sono due tipi principali di batterie al piombo: batterie aperte, che sono la tipologia più comuni, e le batterie regolate da valvola, che sono oggetto di approfondite ricerche e sviluppo. Batteria al piombo ha un basso costo (260 - 540 €/kWh), ed una elevata affidabilità ed efficienza (70-90%) [53]. Oltre alla relativa influenza della temperatura sul funzionamento della batteria, e la sua vita relativamente breve, i principali svantaggi della batteria al piombo sono la necessità di manutenzione periodica e la sua bassa energia e potenza specifica.
- Batterie a base di nichel: assumono principalmente tre configurazioni nichel-cadmio (NiCd), nichel-metallo (NiMH) e il nichel-zinco (NiZn). Tutte e tre utilizzano lo stesso materiale per l'elettrodo positivo e l'elettrolita rispettivamente idrossido di nichel e una soluzione acquosa di idrossido di potassio, e idrossido di litio. Per ciò che concerne l'elettrodo negativo, le batterie NiCd utilizzano idrossido di cadmio, le NiMH utilizzano una lega di metallo e le NiZn utilizza idrossido di zinco. Le batterie al nichel-cadmio possono competere con le batterie piombo-acido perché hanno una densità di energia superiore, un ciclo di vita più lungo (più di 3500 cicli [50]) e requisiti di manutenzione inferiori. Nonostante i suddetti vantaggi della batteria al nichel-cadmio sulla batteria al piombo nichel-cadmio non ha avuto un grande successo commerciale, soprattutto a causa dei suoi notevoli costi, più di 10 volte di piombo-acido e dall'alto valore di autoscarica [53]. Oltre a questo, le batterie al nichel-cadmio contengono metalli pesanti tossici che possono causare rischi per la salute negli esseri umani. Per questo motivo nel novembre 2003, la Commissione europea ha elaborato una proposta di nuove direttive, tra cui obiettivi di riciclaggio del 75% di questo tipo di batterie. In questo nuovo quadro lo stoccaggio di energia nelle batterie al nichel-cadmio ha un futuro incerto. Nickel metal Hybride (NiMH) sono un'alternativa fattibile alle batterie al nichel-cadmio a causa della loro migliori

prestazioni e vantaggi ambientali. In confronto batterie al piombo e al nichel-cadmio, la batteria NiMH è ecologica, in relazione alla mancanza di sostanze tossiche come cadmio, piombo o mercurio. La densità di energia delle cellule NiMH è il 25-30 % in più rispetto a quelle in nichel cadmio. Le batterie NiMH soffrono di una grave auto-scarico, che li rende inefficiente per lo stoccaggio di energia a lungo termine.

- Batteria NaS: nascono dalla volontà di ottenere maggior energia e maggior potenza e sono alla base di 20 progetti in Giappone e in altre nazioni. Una NaS è costituita da zolfo liquido in corrispondenza dell'elettrodo positivo e sodio fuso all'elettrodo negativo come materiali attivi, separati da un elettrolita solido in beta alluminia (forma isomorfa dell'ossido di alluminio). Le batterie NaS sono generalmente progettate in modo tubolare in cui il sodio è normalmente contenuto in una cavità formata all'interno dell'elettrolita. Rispetto alle altre tecnologie principali le batterie NaS presentano una maggiore densità di energia [151 kWh/m^3] (quattro volte quello della batteria al piombo) ed hanno un più lungo ciclo di vita (2500 cicli su 90 % profondità di scarica). Altre caratteristiche importanti delle batterie NaS sono: bassa manutenzione e il loro 99% di riciclabilità. Lo svantaggio principale è il loro costo elevato (circa \$2000/kW e circa \$350/kWh). [53]
- Batterie al litio: sono ampiamente utilizzati in piccole applicazioni, come i telefoni cellulari e dispositivi elettronici alcuni produttori stanno sviluppando le batterie al litio per l'utilizzo nei sistemi elettrici. Le batterie al litio sono di due tipi principalmente: celle agli ioni di litio e ai polimeri di litio. La maggior parte delle cellule agli ioni di litio sono fabbricate su tre strati, il primo strato rappresenta l'elettrodo positivo ed composto di ossido di litio e cobalto (LiCoO_2), il secondo è l'elettrolita formato da sale di litio disciolto in carboni organici (LiPF6) e infine il terzo è l'elettrodo negativo fatto di grafite (C6). Per le batterie agli ioni di litio il tasso di auto-scarica è molto basso al massimo 5 % al mese e la durata della batteria può raggiungere più di 1500 cicli. Sebbene le batterie agli ioni di litio abbiano oltre il 50 % del mercato dei piccoli dispositivi portatili, ci sono alcuni progetti per rendere le batterie Li-ion disponibili su larga scala. Gli ostacoli principali sono il costo elevato ($> \$600/\text{kWh}$), il complesso circuito di protezione, la sovra-carica e il sovra-riscaldamento.

Celle a combustibile reversibili. Le celle a combustibili classicamente non possono venir considerate dei sistemi di accumulo poiché lo stoccaggio del combustibili avviene al di fuori del componente, ed inoltre nella maggior parte dei casi è presente solo il processo di trasformazione di flussi F in flussi E. Quindi rappresentano a tutti gli effetti delle unità di trasformazione. Un discorso diverso si può fare per le cosiddette celle a combustibile reversibili. In esse, infatti, ha luogo una doppia trasformazione: da energie elettrica in energia elettrochimica e viceversa. Nello specifico sono presenti delle reazioni di ossidoriduzione (redox)[50]. Queste celle a combustibile sfruttano come vettore principale l'idrogeno. In particolar modo le tre fasi dell'accumulo possono essere distinte come segue. La fase di carica prevede l'ingresso nel sistema di un flusso d'acqua, che mediante l'utilizzo di energia elettrica, viene scissa nei suoi componenti principali idrogeno e ossigeno (idrolisi). La fase di stoccaggio prevede l'accumulo dell'idrogeno e dell'ossigeno in due serbatoi separati. La fase di scarica prevede l'utilizzo dell'idrogeno e dell'ossigeno nella cella a combustibile per la produzione di elettricità e acqua. Le celle a combustibile idrogeno possiedono diversi vantaggi, tra cui l'alta densità di energia, l'applicabilità a sistemi di piccola e grande scala e la possibilità di utilizzo modulare. In termini di vita e di cicli di vita utili sono stimati

più di 15 anni e 20.000 cicli di carica e scarica, rispettivamente [53]. Tali sistemi sono fortemente studiati sia per l'utilizzo nei sistemi stand-alone in particolar modo con impianti fotovoltaici sia per il livellamento del carico. Sul lato negativo ci sono attualmente gli elevati costi e la bassa efficienza.

Accumulo di flussi E in altre forme.

Ci sono altre modi per accumulare flussi di energia elettrica E, gran parte dei quali trovano il loro maggior utilizzo per migliorare la qualità della rete nelle fasi di regolazione di frequenze e riserva operativa, per cui verranno solo accennati.

Capacitori e Supercapacitori: i condensatori (o capacitori) accumulano energia elettrica direttamente come un accumulo di carica elettrica tra due piastre di metallo conduttivo separate da un materiale isolante conosciuto come un dielettrico. Quando viene fornita energia su di una piastra si accumuleranno cariche negative mentre sull'altra piastra sarà indotto un accumulo di carica di segno opposto [53]. I vantaggi di condensatori per piccolo accumulo di energia sono la rapidità di scarica, il lungo ciclo di vita, tuttavia il principale problema dai condensatori è la densità di energia bassa. Se è richiesta una grande capacità di accumulo si necessita che la superficie del dielettrico sia molto grande. Questo fatto rende l'uso di grandi condensatori antieconomico. I supercondensatori hanno lo stesso principio dei condensatori tranne che il materiale isolante viene sostituito da elettrolita ionico. Questo permette di fornire una maggior densità di energia.[53]

Superconduttori Magnetici: Il sistema di accumulo di energia magnetica superconduttore è un dispositivo di accumulo di energia che immagazzina energia elettrica in un campo magnetico senza conversione in forme chimiche o meccaniche. Questo sistema induce una corrente continua in una bobina fatta di un materiale superconduttore, resistenza elettrica quasi zero, solitamente niobio-titanio operante alla temperatura di -270°C . Nella fase di carica il valore della corrente aumenta mentre nella fase di scarica tale valore diminuisce e deve essere convertito in corrente AC per le usuali operazioni. Il problema sono le basse temperature richieste per ridurre la resistenza elettrica della lega, che portano ad un massiccio utilizzo di energia e i costi molto alti. Questi sistemi possiedono un tempo di risposta molto rapido pochi millisecondi, inoltre un numero di cicli elevato, superiore alle altre tecnologie comparabili[53].

4.3.3 Accumulo di flussi di energia chimica e meccanica F

I flussi di energia F come visto nel capitolo 1 rappresentano una categoria molto ampia di energie. In particolar modo le forme che più comunemente trovano applicazione nel campo dei sistemi energetici sono l'energia chimica associata ai combustibili e l'energia potenziale riferita ad un portata d'acqua posta ad una determinata altezza. Come detto in precedenza i flussi di energia F sono direttamente associabili ai relativi flussi di massa grazie all'energia specifica (in un caso rappresentata dal potere calorifero e nell'altro dall'energia potenziale specifica). L'accumulo di tali flussi di energia è quindi strettamente collegato all'accumulo della relativa massa, ad esempio immagazzinare 1 m^3 di carbone equivale allo stoccaggio dell'energia chimica posseduta da quel m^3 . I combustibili, o l'acqua posta ad una certa altezza sono a tutti gli effetti una forma di accumulo dell'energia. In particolare i combustibili sono una forma di accumulo di energia chimica e presentano un'energia specifica circa 100 volte maggiore di tutte le tecnologie di accumulo viste in precedenza. L'energia specifica dell'accumulo di un combustibile è legata al potere calorifico che presenta. Per

ciò che riguarda i combustibili la tecnologia di stoccaggio è fortemente influenzata dallo stato di aggregazione dello stesso e dalle sue caratteristiche principali.

Nel seguito si analizzeranno le tecnologie che comunemente vengono utilizzate per lo stoccaggio dei principali combustibili da fonte fossile. I combustibili da fonti rinnovabili presentano caratteristiche analoghe.

Carbone: L'accumulo di carbone avviene solitamente presso le centrali termoelettriche o presso altri impianti industriali. Il carbone viene sminuzzato in pezzi del diametro di circa 50mm [55] e conservato in silos o in magazzini, o all'aria aperta (ad esempio parchi carbone).

Petrolio e combustibili liquidi: L'accumulo di petrolio, dei prodotti semiraffinati e dei prodotti finiti avviene in cisterne o serbatoi che possono presentare diverse capacità (anche fino a 46000 m³ [55]). Questi serbatoi devono essere progettati per impedire le perdite di combustibile verso l'esterno, le quali causerebbero forte inquinamento ambientale. A seconda del combustibile contenuto i serbatoi devono essere progettati secondo specifiche normative. In riferimento allo stoccaggio di grande dimensioni si possono distinguere:

- Serbatoi per prodotti a bassa tensione di vapore. Si impiegano per oli combustibili residui o distillati (fino al gasolio) e per bitumi. Sono serbatoi cilindrici verticali, in lamiera di acciaio saldata, con tetto conico fisso, che vengono raggruppati entro bacini di contenimento collettivi e hanno generalmente serpentine di riscaldamento sul fondo e, per i prodotti più viscosi (per esempio, bitumi), hanno coibentazione completa su tutta la superficie esposta. Quelli a parete nuda sono dotati di dispositivi di irrorazione d'acqua, per il raffreddamento di emergenza.
- Serbatoi per prodotti a media tensione di vapore. Vengono impiegati per il greggio e per i distillati leggeri. Sono serbatoi cilindrici a tetto galleggiante che impedisce la formazione di cuscinetti di gas e di aria sopra il liquido. Fondo, tetto e mantello cilindrico sono in lamiere di acciaio calandrate e saldate. Il tetto galleggiante è da tempo il sistema più efficace, pratico ed economico per il contenimento delle perdite per evaporazione. I serbatoi per il greggio sono riscaldabili all'occorrenza mediante serpentina a vapore posta sul fondo. Ogni serbatoio è situato entro un bacino di contenimento delimitato da argini di terra o da muri in cemento armato. Il volume del bacino deve eguagliare quello del serbatoio: l'area del bacino è quindi molto estesa rispetto a quella del serbatoio e determina il caratteristico aspetto planimetrico dei parchi serbatoi. Gli accumuli di capacità minore sono solitamente rappresentate da cisterne in acciaio, molto spesso interrate, opportunamente dimensionate per prevenire fuoriuscite di combustibile.

Gas Naturale: L'accumulo di gas naturale è strettamente collegato con le fluttuazioni stagionali dei consumi, (la richiesta di gas in inverno è circa tre volte quella estiva [62]). Lo stoccaggio del gas naturale avviene sostanzialmente in due modi: come gas compresso GNL (Gas Naturale Liquefatto) in cisterne o in serbatoi sotterranei. Il primo metodo è basato sul fatto che il gas naturale liquido presenta una densità maggiore (o un volume specifico minore) di quello allo stato gassoso. L'utilizzo del GNL è anche connesso alla possibilità di trasporto del gas naturale in assenza di metanodotti. Il processo di liquefazione prevede la liquefazione per pressurizzazione e successivamente il raffreddamento, fino a raggiungere la condizione di stoccaggio e immagazzinamento a pressione atmosferica e a temperatura prossima a quella di ebollizione del metano (-161,46 °C). Il gas liquefatto ha una densità di

415 kg/m^3 a $-162 \text{ }^\circ\text{C}$, il che comporta un coefficiente di riduzione del volume pari a circa 610 rispetto alle condizioni standard. Il GNL viene immagazzinato in serbatoi a doppio guscio a pressione atmosferica (fig. 4.5).

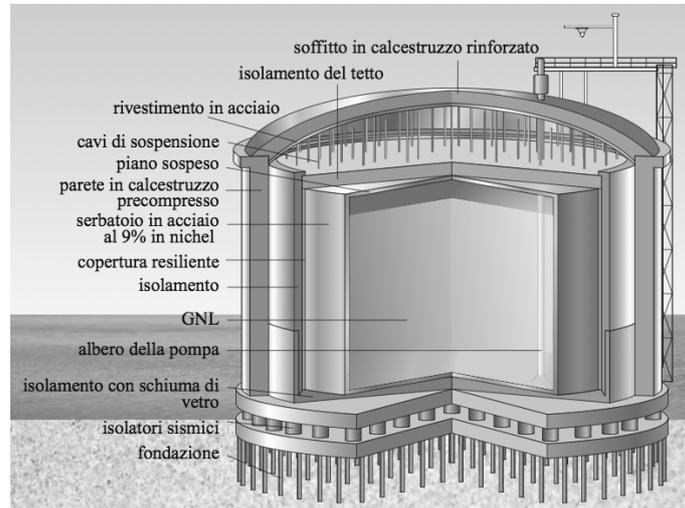


Figura 4.5: Schema di un serbatoio per lo stoccaggio del GNL

L'intercapedine tra i due gusci è utilizzata per realizzare l'isolamento termico; il serbatoio interno, a contatto con il GNL, è realizzato in acciai speciali con il 9% di nichel per evitare i fenomeni di fragilimento dovuti alle basse temperature di esercizio. I serbatoi di stoccaggio sono generalmente di forma cilindrica e presentano un fondo piatto, che poggia su un materiale isolante rigido, come per esempio schiuma poliuretanic. Le pareti del serbatoio devono resistere al carico idrostatico esercitato dal GNL e pertanto devono avere uno spessore adeguato. Il tetto del serbatoio presenta uno strato di isolamento sospeso, sostenuto dal guscio esterno. I sistemi di connessione con le condotte passano tutti attraverso il tetto del serbatoio, per evitare il sifonamento del contenuto in caso di guasto nell'impianto.

La tipologia del materiale del secondo guscio consente di distinguere i serbatoi in funzione del loro grado di sicurezza. Quando si tratta di un guscio realizzato in acciaio al carbonio, e quindi in materiale non idoneo all'impiego criogenico, si parla di serbatoio a contenimento semplice (single containment tank), in quanto il guscio esterno svolge le sole funzioni di isolamento e raccolta dei vapori. Quando invece si attribuiscono al guscio esterno delle funzioni di contenimento del GNL, esso deve essere realizzato in materiali idonei, generalmente in calcestruzzo; si parla qui di serbatoio a doppio contenimento (double containment tank) o a contenimento totale (full containment tank) e in quest'ultimo caso si può avere pressurizzazione del serbatoio esterno. Largamente utilizzati sono i serbatoi superficiali, anche se i serbatoi interrati presentano un minor impatto visivo ma un costo più elevato. Il secondo modo di stoccaggio del gas naturale è lo stoccaggio sotterraneo. Di questa categoria il sistema più diffuso è lo stoccaggio in giacimenti di gas esauriti. Sono comunque utilizzati anche sistemi di immagazzinamento in giacimenti di olio esauriti o acquiferi (cioè strutture geologiche contenenti acqua), ma anche in cavità ricavate in formazioni saline sotterranee o in miniere di carbone abbandonate.

Idrogeno: L'idrogeno pur presentando un valore di energia specifica molto alto 120 MJ/kg (il metano 50 la benzina 45) presenta un valore di densità molto basso, ciò fa sì che

il volume richiesto per accumulare un determinata quantità di energia sia molto maggior rispetto agli altri combustibili. Per l'accumulo di tale combustibile solitamente si cerca di concentrarlo aumentando l'energia contenuta nell'unità di volume. Per avere un'idea delle cifre che sono dietro al problema, si consideri che il consumo di un'auto di media cilindrata è di circa 30 kg di benzina per 400 km; nelle stesse condizioni servono 8 kg di H_2 . A pressione e temperatura ambiente 4 kg di H_2 occupano un volume di $45 m^3$, cioè un pallone di circa 5 m di diametro.

Se il gas venisse compresso alla pressione di 20 MPa, per conservare 4 kg di H_2 servirebbero 225 l, pari a cinque comuni bombole d'acciaio da 45 l (circa 260 kg). Questo metodo ha una densità volumica di energia comunque bassa (circa 13 MJ/l) rispetto a quella della benzina (circa 30 MJ/l).

L'accumulo dell'idrogeno è un processo molto delicato in relazione al ampio intervallo di infiammabilità che ha rispetto agli altri combustibili. Le forme di immagazzinamento più comuni per l'idrogeno sono come gas pressurizzato o come gas liquefatto.

Lo stoccaggio dell'idrogeno gassoso in pressione (10-20 MPa) avviene in bombole d'acciaio. L'aspetto più delicato riguarda l'infragilimento dell'acciaio; questo fenomeno è noto ed è particolarmente evidente negli acciai ad alta resistenza. Esso dipende dal fatto che la molecola si dissocia e l'idrogeno atomico diffonde nell'acciaio; ciò può avvenire nelle diverse fasi di vita dell'acciaio stesso (fabbricazione, saldatura) o durante il suo impiego (corrosione). L'infragilimento corrisponde a un calo della capacità di deformarsi plasticamente e porta alla frattura improvvisa.

La liquefazione dell'idrogeno prevede di portare il gas alla pressione ambiente alla temperatura di -253°C . Lo stoccaggio di idrogeno liquefatto devono avere requisiti di isolamento termico molto severi. I contenitori di H_2 liquido hanno raggiunto un alto grado di sviluppo e sono progettati in genere con una forma sferica, perché ha superficie minore a parità di volume. Questi serbatoi sono caratterizzati da una perdita del circa 1-2% al giorno dell'idrogeno contenuto a causa dell'evaporazione.

4.3.4 Accumulo di flussi di materie prime M e di prodotti finiti W

La categoria di accumulo di flussi di materia M e W rappresenta tutte le tecnologie che vengono utilizzate per l'accumulo di materie prime e di prodotti finiti non energetici. All'interno di questa categoria i possibili sistemi di accumulo sono molteplici, e sono posti in forte relazione soprattutto col tipo di materiale da accumulare e con le caratteristiche che esso presenta. Come si è visto nel paragrafo 1.2 i flussi presenti all'interno delle categorie M e W possono assumere delle caratteristiche molto diverse tra di loro. Si passa ad esempio dal legno utilizzato nelle industrie per la produzioni di tavoli al concime liquido che si ottiene nel produzione di biogas. Per questo motivo e per il fatto che solitamente le categorie di flussi M e W sono raramente prese in considerazione nei sistemi energetici tale categoria non verrà approfondita ulteriormente.

4.4 Interazioni dei sistemi d'accumulo con il sistema di conversione

Nel paragrafo precedente sono stati analizzati abbastanza nel dettaglio le principali tecnologie utilizzate nei sistemi di accumulo di massa ed energia correlati ai sistemi energetici.

Sostanzialmente i flussi possono venir tutti accumulati eccezion fatta per i flussi di energia non accumulabile R . Ovviamente ciò deriva dalla definizione che si è data a tali flussi. Si ricorda, infatti, che una delle principali caratteristiche dei flussi R è proprio quella di non poter essere accumulati. Nei flussi di energia R sono comprese forme di energia associate ad esempio alle correnti ventose e alla radiazione solare. Come visto nel paragrafo 4.2 l'accumulo può essere considerato come una black-box che presenta in ingresso e in uscita uno o più flussi tutti della stessa CATEGORIA (vedi par 1.2). Con questa definizione si può facilmente capire come in commercio non esistano sistemi in grado di accumulare la corrente ventosa o la radiazione solare. Queste forme di energia possono sì venir accumulate trasformandole in altre forme, (elettrochimica o meccanica) ma il processo di riconversione in flussi R non è attualmente possibile o conveniente. In definitiva tali flussi potranno interagire solo con le unità di trasformazione. Nel seguito si andrà a descrivere le possibili interazioni che i sistemi di accumulo hanno con il sistema e con l'ambiente. Per far questo si usufruirà della classificazione dei sistemi di accumulo redatta nel paragrafo precedente e della superstruttura introdotta nel capitolo 1. Si possono quindi individuare componenti di accumulo che immagazzinano flussi:

- Di energia elettrica E
- Di energia termica e frigorifera Q (Q_t e Q_c)
- Di energia chimica e meccanica accumulabile F
- Di massa di materie prime e di prodotti finiti (M e W)

Prima di proseguire nella trattazione è bene esprimere un concetto che seppur intuitivo non può essere trascurato. I componenti d'accumulo possono essere connessi esclusivamente con unità, utenze o sorgenti che accettano o forniscono la specifica categoria di flusso immagazzinata nell'accumulo. Ciò significa che, ad esempio, un accumulo di energia termica potrà prevedere: in ingresso esclusivamente un collegamento con un'unità di trasformazione che presenta dei flussi di energia termica in uscita o con una sorgenti di flussi Q ; mentre in uscita esclusivamente una connessione con un'utenza termica o con un impianto che possa essere alimentato dal flusso Q . Le possibili interazioni di questi componenti con l'ambiente e con il resto del sistema sono sostanzialmente quattro. Essi possono:

- ricevere flussi dall'ambiente, lato sorgenti, e cederli a uno o più unità del sistema;
- ricevere flussi da uno o più unità del sistema e cederli all'ambiente lato utenza;
- ricevere flussi da uno o più unità del sistema e cederli ad altri componenti del sistema;
- riceve flussi dall'ambiente, lato sorgenti, e cederli all'ambiente lato utenze.

Nella prima tipologia d'interazioni sono compresi ad esempio i fenomeni di stoccaggio del combustibile. Si pensi ad una centrale termoelettrica alimentata a carbone. Come è ben noto nella maggior parte dei casi quest'impianti non si trovano in prossimità delle miniere di estrazione, ed è quindi necessario prevedere il trasporto del combustibile. Il trasporto, che solitamente avviene su rotaia o via mare, comporta che il combustibile giunga all'impianto solo in determinate quantità e in determinati istanti temporali, in relazione alla capacità di navi e treni, al loro numero e alla frequenza dei viaggi. Questo implica che il flusso di energia

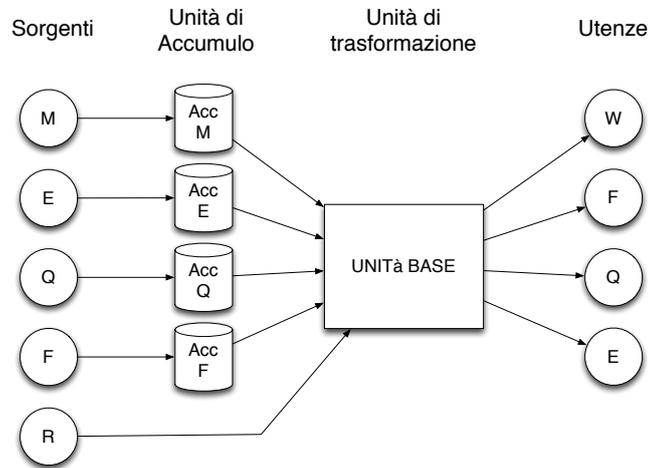
chimica F che giunge all'impianto abbia un andamento temporale caratterizzato da valori molto elevati nei periodi di attracco del navi, e un valore nullo nei periodi in cui non ci sia lo scarico del carbone. In questa situazione è facilmente comprensibile come l'unica possibilità di avere un funzionamento continuativo dell'impianto, fattore molto importanti per questa tipologia di sistemi caratterizzata da una forte inerzia termica, sia quella di prevedere un sistema di accumulo del carbone. Sistemi del tutto analoghi sono gli impianti che sfruttano le biomasse ligno-cellulosiche (sia i sistemi di medio-grande taglia come impianti a vapore per la produzione di flussi di energia elettrica, sia nei sistemi domestici per la produzione di flussi termici Q). Le biomasse utilizzati per questi scopi possono provenire o da residui agricoli e forestali o da specie arboree derivanti da coltivazioni agricole e forestali. Entrambi i casi comunque presentano una caratteristica fortemente stagionale, di conseguenza possono rendere disponibili al sistema una gran quantità di combustibile, ma solo in alcuni periodi dell'anno. Per poter usufruire con continuità e in particolar modo in relazione alle richieste delle utenze è necessario prevedere un sistema di stoccaggio della biomassa. I sistemi sono molto diversi tra di loro in funzione della taglia dell'impianto e della tipologia di biomassa utilizzata.

In questi due esempi presentanti risulta evidente che il collegamento diretto tra un flusso di energia presente nell'ambiente e il sistema d'accumulo sia utile in presenza di un flusso che abbia un andamento intermittente in funzione del tempo. L'accumulo permette di svincolare temporalmente il funzionamento dell'impianto dalle sorgenti ambientali, questo ovviamente in funzione delle capacità del sistema di immagazzinamento.

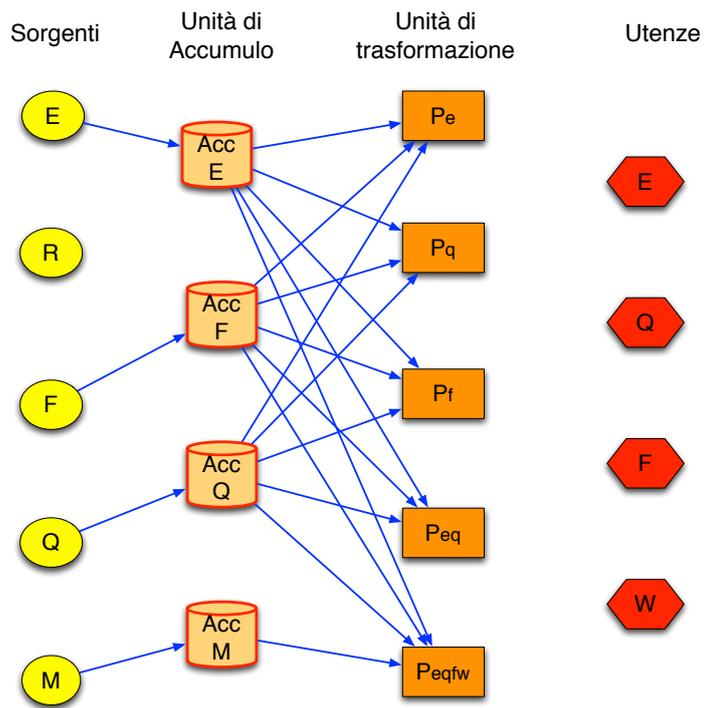
Nella figura 4.6a si mostra come i sistemi di accumulo, posti tra le sorgenti e le unità di trasformazione, possano essere schematizzati nella superstruttura con il massimo grado di sintesi. La figura 4.6b mostra invece l'interazione dei sistemi di accumulo nella superstruttura in cui si sono riportate le tipiche unità di trasformazione che si incontrano nei sistemi di conversione. Per chiarezza sono stati rappresentati (in colore blu) esclusivamente le possibili interazioni che i sistemi di accumulo hanno con le sorgenti e con le unità di trasformazione. Si può osservare (confronto con la superstruttura in figura 1.9) come i sistemi di accumulo presentino in uscita gli stessi possibili collegamenti, con le unità di trasformazione, che presentano le sorgenti. I sistemi di accumulo posti in questa posizione, in pratica, si comportano come delle sorgenti che rendono fruibili dei flussi di massa, o di energia, soggetti a diversi vincoli temporali rispetto alle sorgenti reali.

Nella seconda tipologia sono compresi ad esempio i sistemi stand alone che sfruttano come ingressi al sistema i flussi non accumulabili R . Si pensi ad esempio ad un'unità di trasformazione (un impianto fotovoltaico o solare termico) che sfrutta la radiazione solare (tipico esempio di flusso di energia R) per soddisfare un'utenza elettrica o termica (richiesta di flussi E e Q rispettivamente). La radiazione solare come è ben noto ha una caratteristiche fortemente aleatoria ed intermittente, ed inoltre difficilmente presenta un andamento temporale compatibile con quello richiesto dall'utenza. Questi sistemi, in definitiva, per il soddisfacimento dell'utenza, (sempre nell'ipotesi di sistemi isolati) hanno l'obbligo di includere un componente d'accumulo. Vista l'impossibilità di stoccaggio dei flussi R , l'unica soluzione possibile è prevedere l'immagazzinamento dei flussi trasformati, in questo caso energia elettrica e calore.

Un altro esempio in cui è utile avere la presenza di questo tipo di interazione tra accumulo e ambiente si presenta quando la richiesta di due diversi flussi da parte dell'utenza viene soddisfatta grazie ad un'unica unità di trasformazione. Un caso tipico è rappresentato da una richiesta di flussi Q e una richiesta di flussi E soddisfatta mediante un impianto P_{eq}



(a) Possibili interazione dei sistemi di accumulo lato sorgenti con l'unità base



(b) Possibili interazione dei sistemi di accumulo lato sorgenti analizzati nella superstruttura

Figura 4.6: Possibili interazione dei sistemi di accumulo lato sorgenti con le unità di trasformazione del sistema di conversione

(CHP). Se c'è una corrispondenza biunivoca tra i due flussi in uscita dall'unità di trasformazione, come nel caso del motore a combustione interna analizzato nel paragrafo 1.4.2 (senza bypass), risulta complicato poter soddisfare le due utenze. Risulta, infatti, difficile ipotizzare che l'andamento temporale delle richieste, e soprattutto il rapporto tra le due, sia in ogni istante compatibile con l'andamento degli output dell'unità di trasformazione. Una soluzione a questo problema è proprio quella di installare un componente d'accumulo per uno dei due flussi, solitamente in questi casi per ragioni economiche si predilige l'accumulo dei flussi Q , che permette di svincolare i due flussi in uscita dall'impianto cogenerativo.

Da questi esempi si può capire come uno dei principali vantaggi che presenta l'interazione tra sistemi d'accumulo e utenza è proprio quella di svincolare il comportamento del sistema dall'andamento dell'utenza a cui il sistema d'accumulo è collegato, sempre nei limiti della capacità dell'accumulo stesso. Nella figura 4.7a si mostra come i sistemi di accumulo, posti tra le unità di trasformazione e le utenze, possano essere schematizzati nella superstruttura con il massimo grado di sintesi. La figura 4.7b mostra invece l'interazione dei sistemi di accumulo nella superstruttura in cui si sono riportate le tipiche unità di trasformazione che si incontrano nei sistemi di conversione. Come in precedenza, per chiarezza, sono stati rappresentati (in colore blu) esclusivamente le possibili interazioni che i sistemi di accumulo hanno con le utenze e con le unità di trasformazione. Si può osservare (confronto con la superstruttura 1.9) come i sistemi di accumulo presentino in ingresso gli stessi possibili collegamenti, con le unità di trasformazione, che presentano le utenze. I sistemi di accumulo posti in questa posizione, in pratica, si comportano come delle utenze che non richiedono più uno specifico andamento temporale dei flussi di massa, o di energia, ma permettono dei vincoli meno restrittivi. Le utenze, come si è visto nel paragrafo 1.3.2, impongono i valori dei flussi di massa o di energia che le devono essere ceduti, cioè impongono dei vincoli sulla potenza o sulla portata. I sistemi di accumulo posti in questa posizione in pratica sostituiscono tali vincoli con vincoli sull'energia o sulla massa. Questi vincoli sono meno restrittivi poiché si riferiscono a istanti temporali ampi, mentre i vincoli sulla potenza sono vincoli sui valori istantanei.

La terza categoria rappresenta le interazioni che l'accumulo può avere quando è connesso a due o più unità all'interno del sistema. Un possibile esempio è rappresentato da un sistema solare termodinamico utilizzato per il soddisfacimento di un'utenza elettrica. La figura 4.8a descrive lo schema funzionale tipico di un impianto a torre, che utilizza sali fusi come fluido termovettore e per l'accumulo termico. La figura 4.8b rappresenta il sistema schematizzandolo con le convenzioni e i dettami descritti in questo lavoro di tesi. Il sistema sfrutta una sorgente di flussi R che identifica la fonte solare. Il flusso R insieme ad un flusso $Q_{2P_q,in}$ che rappresenta la portata di sali, prelevati dal serbatoio a bassa temperatura (290°C), vengono inviati all'impianto P_q . Esso rappresenta la torre solare in cui i sali a bassa temperatura vengono fatti circolare in un insieme di serpentine di tubi di acciaio montate su pannelli piano assorbitori e dove, mediante l'interazione con la fonte solare concentrata si riscaldano fino a circa 565°C ($Q_{1P_q,out}$). Il flusso di sali in uscita dall'unità è inviato ad un serbatoio di accumulo caldo. La portata in uscita dal serbatoio freddo è ovviamente uguale a quella in entrata nel serbatoio caldo ed è regolata in funzione dell'intensità della radiazione solare, in modo da mantenere costante la temperatura in uscita dal ricevitore. Quando è richiesta la produzione di energia elettrica (E_u), i sali dal serbatoio caldo ($Q_{1Acc2,out}$) vengono inviati al componente P_{eq} . In esso i sali sono utilizzati per produrre vapore ad alta pressione ed elevata temperatura (12 MPa, 540°C). Il vapore è poi utilizzato in un ciclo termoelettrico convenzionale: viene fatto espandere in un gruppo

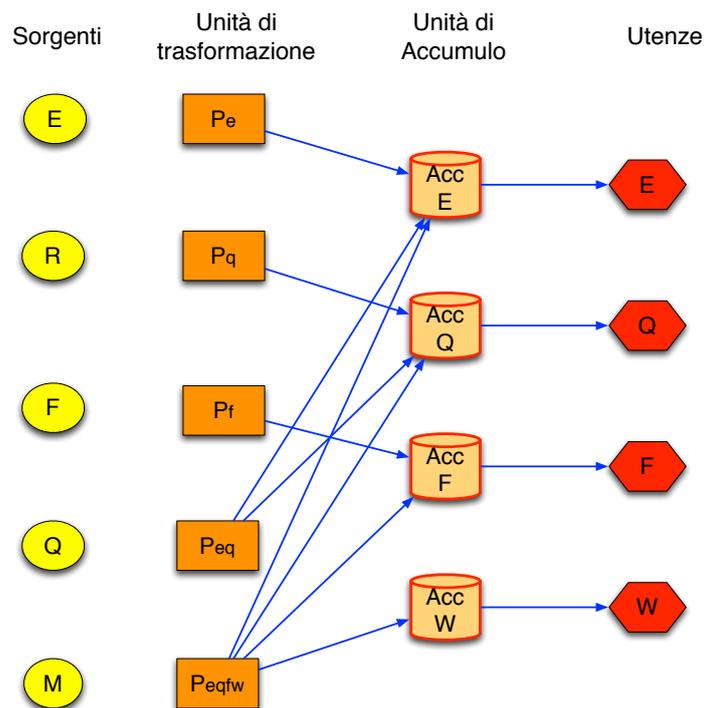
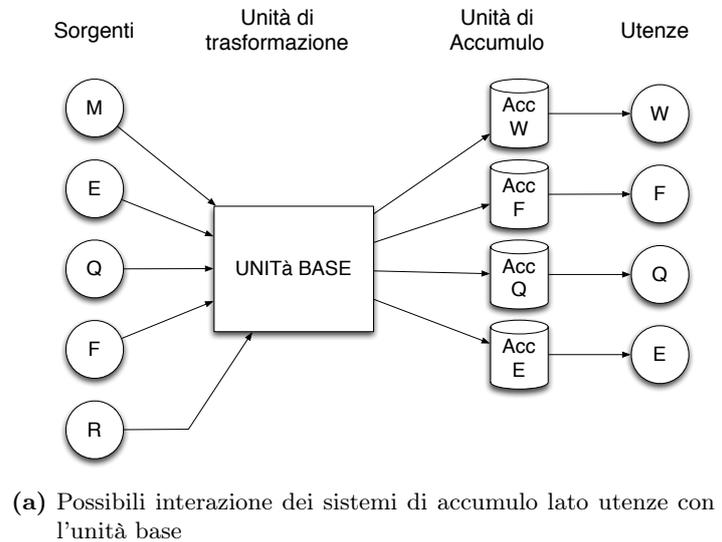
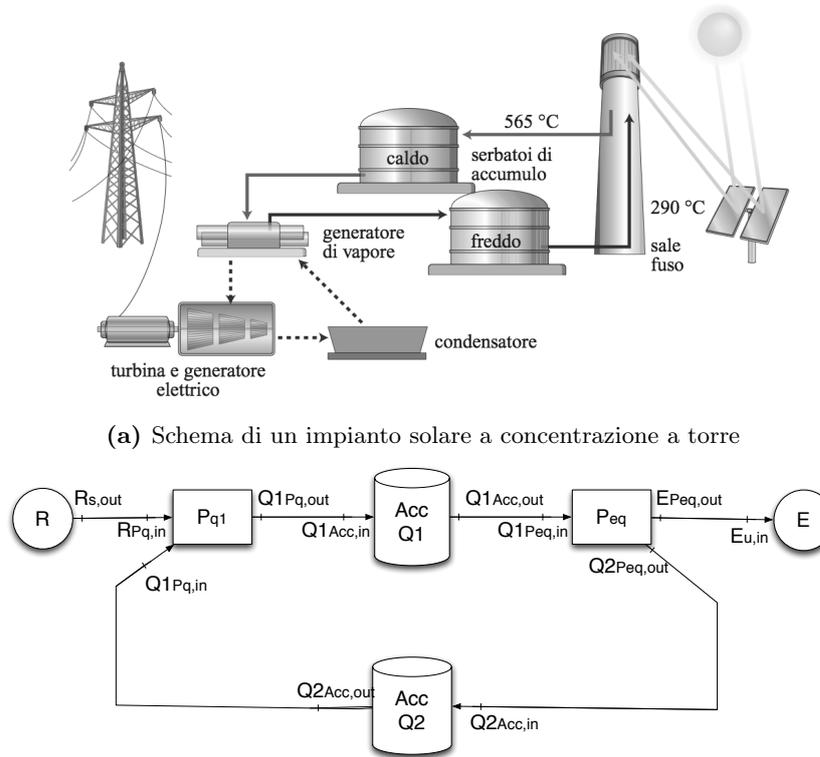


Figura 4.7: Possibili interazione dei sistemi di accumulo lato utenze con le unità di trasformazione del sistema di conversione



(a) Schema di un impianto solare a concentrazione a torre

(b) Rappresentazione schematica del sistema di conversione solare con la presenza dei serbatoi di accumulo

Figura 4.8: Possibili interazione dei sistemi di accumulo lato utenze con le unità di trasformazione del sistema di conversione

turbina-alternatore, per produrre energia elettrica ($E_{Peq,out}$), quindi viene condensato, preriscaldato e inviato di nuovo al generatore di vapore. I sali in uscita dall'unità sono inviati nuovamente al serbatoio freddo ($Q_{2Peq,out}$).

In questo caso l'accumulo è utile per svincolare temporalmente il funzionamento di un'unità che è strettamente collegata alla sorgente (la torre di concentrazione) da quello di un'unità collegata all'utenza (l'impianto a vapore). Come per le unità di trasformazione si evita di rappresentare nella superstruttura tutti i possibili collegamenti tra i sistemi di accumulo e le unità di trasformazione, poiché tali collegamenti sono molteplici e soprattutto fortemente influenzati dalla composizione del sistema.

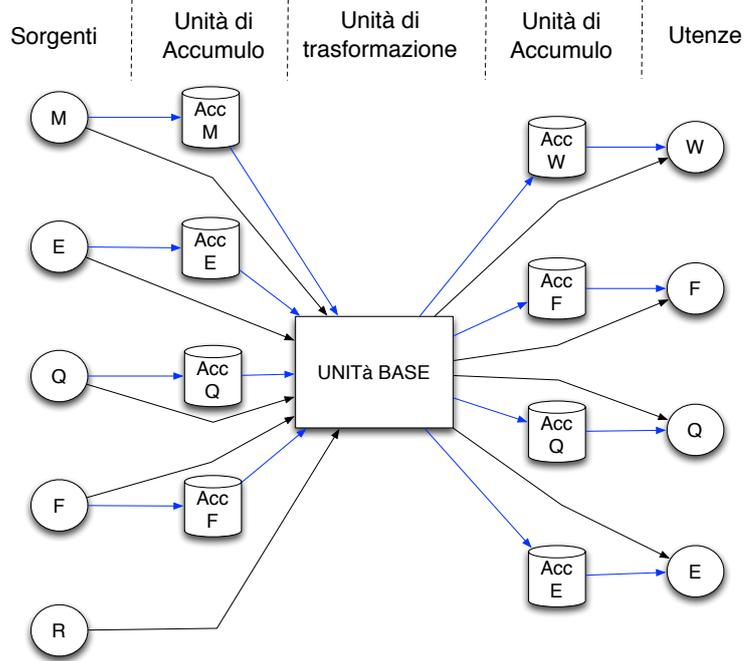
L'ultimo caso descrive le interazioni che l'accumulo può avere con sorgenti e utenza direttamente; senza cioè che il flusso subisca un processo di trasformazione. Ovviamente in questo caso le sorgenti devono rendere fruibile un flusso della stessa categoria e che presenti le stesse caratteristiche di quello richiesto dall'utenza. Tali collegamenti non sono molto frequenti nei sistemi di conversione, poiché solitamente le utenze richiedono dei flussi differenti da quelli che mettono a disposizione le sorgenti. È possibile però riscontrare alcuni di questi collegamenti quando le utenze non sono considerate come richieste, ma semplicemente come uscite dal sistema (vedere paragrafo 1.3.1). È il caso, ad esempio, dei sistemi di accumulo a pompaggio o i sistemi CAES. Il funzionamento tipico di questi sistemi, come descritto nel paragrafo 4.3.2, è quello di prelevare un flusso di energia E dalla rete di distribuzione nei momenti in cui il prezzo dell'energia è basso e accumulare l'ener-

gia che esso trasporta (convertendolo in energia meccanica). Negli istanti in cui il prezzo dell'energia è alto cedere parte dell'energia accumulata alla rete (riconvertendo l'energia meccanica in energia elettrica). Quest'operazione ovviamente è fatta per trarre un profitto economico (dato dalla vendita dell'energia elettrica ad un prezzo maggiore dell'acquisto). I collegamenti diretti tra l'accumulo e l'ambiente sono presenti spesso nell'industria di processo o nell'industria di distribuzione. L'accumulo in questi casi è utilizzato per svincolare la dipendenza temporale tra ciò che l'ambiente richiede da ciò che rende disponibile. Un esempio classico è la distribuzione di alimenti in un supermercato. In questo caso i flussi di massa resi disponibili dall'ambiente rappresentano i camion che riforniscono il supermercato; e quindi l'andamento di tali flussi è fortemente influenzato dalla frequenza dei viaggi e dalla capacità dei camion. I flussi richiesti sono rappresentati dagli acquisti fatti dagli utenti finali. È facile capire come i due flussi presentino andamenti temporale fortemente discordanti, motivo per cui è necessario un magazzino (accumulo) per poter soddisfare l'utenza. Questi casi non saranno comunque trattati poiché non fanno parte dello scopo di questa tesi.

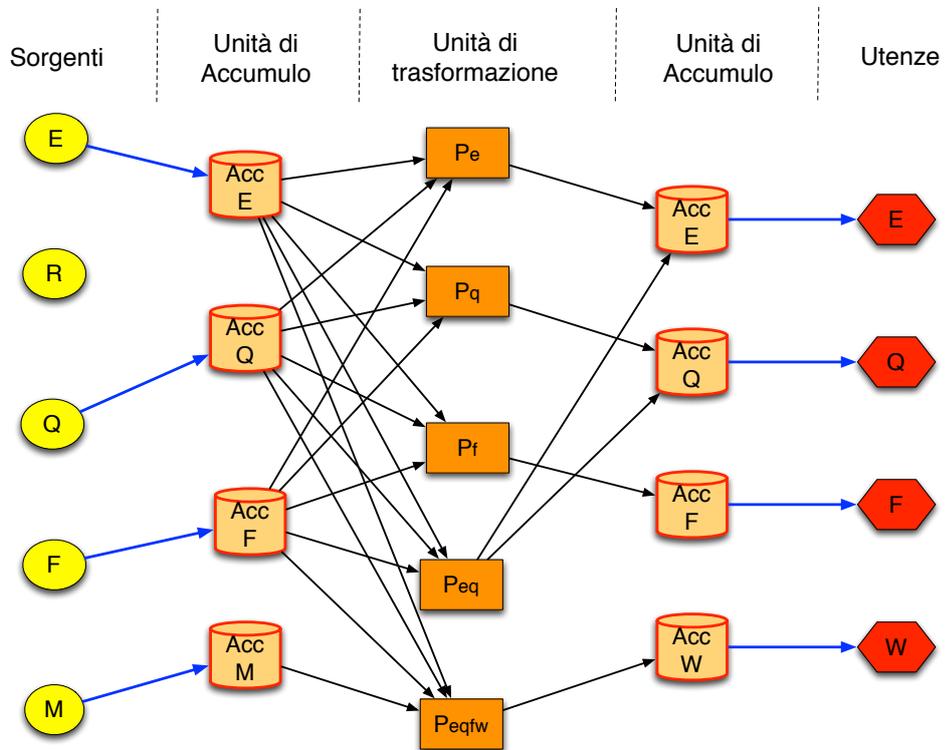
Nel seguito viene riportata la superstruttura analizzata nel paragrafo 1.5 in cui sono stati inseriti i componenti d'accumulo. In figura 4.9a è mostrata la superstruttura identificata con il grado di massima sintesi, ossia con la presenza della sola unità base, in cui sono stati inseriti i possibili sistemi di accumulo, sia lato sorgenti che lato utenze. Questa superstruttura come visto nel paragrafo 1.5 permette di individuare tutte le possibili traiettorie di conversione di fonti energetiche in prodotti finali, linea di colore nero. In colore blu sono state evidenziate le possibili interazioni che le diverse unità di accumulo possono presentare con l'ambiente esterno e con l'unità di trasformazione. In figura 4.9b è rappresentata la superstruttura semplificata (vedi Fig. 1.11) in cui sono stati inseriti i possibili sistemi di accumulo lato sorgenti e lato utenze. In figura sono evidenziabili anche tutte le traiettorie di conversione (confronto con 1.11) qualora non vi sia accumulo nel sistema. In colore blu sono identificate le possibili interazioni che le unità di accumulo possiedono con l'ambiente esterno, mentre in colore nero sono rappresentate le interazioni possibili tra i sistemi di accumulo e le unità di trasformazione. Tali interazioni sono comunque facilmente evidenziabili nelle figure 4.6b e 4.7b. Dove in figura 4.6b sono riscontrabili le possibili interazioni tra le uscite dei sistemi di accumulo e gli ingressi delle unità di trasformazione, mentre in Fig. 4.7b sono evidenziate le possibili interazioni tra le uscite delle unità di trasformazione e gli ingressi dei sistemi di accumulo.

4.5 Modellazione generale dei sistemi di accumulo

Una volta analizzati i principali sistemi di accumulo, le loro caratteristiche e peculiarità, le possibili interazioni che hanno con il sistema e con l'ambiente, e l'utilità che si può trarre dal loro utilizzo, è necessario individuare una metodologia atta a descrivere i componenti di accumulo e il loro funzionamento in termini implementabili dagli strumenti di calcolo. Nei capitoli 2 e 3 si è visto come per descrivere la composizione di un sistema di conversione, il suo funzionamento e le interazioni con l'ambiente sia necessario individuare un modello matematico. Quindi per studiare i sistemi di accumulo è d'uopo individuare il modello matematico che ne descrive il funzionamento e le interazioni con il resto del sistema e con l'ambiente. In letteratura sono presenti molti lavori in cui vengono modellati diversi sistemi di accumulo. Ad esempio in [64] viene presentato il modello di una batteria agli ioni di



(a) Possibili traiettorie di conversione per i sistemi di conversione in presenza di accumulo: Superstruttura con Unità Base



(b) Superstruttura con le possibili interazione dei sistemi di conversione e dei sistemi di accumulo con l'ambiente esterno

Figura 4.9: Possibili traiettorie di conversione per sistemi di conversione in presenza di accumulo

litio Sanyo DCB-102 integrata ad un sistema fotovoltaico; in [65] è individuato un modello dinamico per valutare lo stato di carica e lo stato di vita di una batteria ricaricabile.

In [66] viene descritto un modello dinamico di un sistema CAES che sfrutta una caverna di sale come serbatoio di stoccaggio dell'aria in pressione. In [67] sono analizzati diversi modelli dinamici per descrivere un serbatoio di accumulo dell'energia termica, in relazione ai fenomeni di stratificazione. Questi articoli studiano esclusivamente il modello del sistema di accumulo e quindi utilizzano un grado di dettaglio superiore a quello tipico di questo lavoro di tesi. Da questi modelli però è possibile ricavare le informazioni utili per individuare il modello dell'accumulo con un grado di dettaglio inferiore. In quest'ottica si possono sfruttare anche altri lavori presenti in letteratura, i quali si concentrano maggiormente sul modello di sistemi di conversione in presenza di sistemi di accumulo. In [68] viene analizzato il modello di un sistema di conversione composto da campo fotovoltaico, una turbina eolica e una microturbina idraulica; il sistema di accumulo in questo caso è rappresentato da un accumulo di idrogeno compresso, prodotto mediante elettrolisi e "bruciato" in una cella a combustibile. In [61] è presentato il modello di un sistema composto da un motore a gas, un boiler, due gruppi ad assorbimento e un radiatore in combinazione con un serbatoio per l'accumulo termico.

4.5.1 Modello della generica unità di accumulo

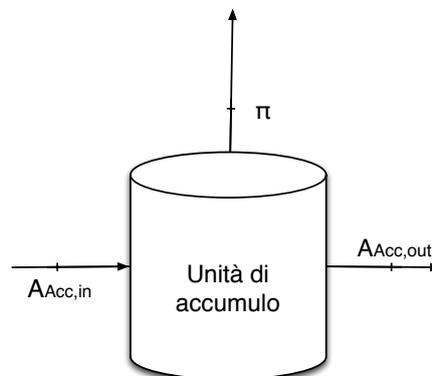


Figura 4.10: Schema generale di un'unità di accumulo di flussi appartenenti alla generica categoria A

In questa trattazione, come già visto nel capitolo 4.1, i sistemi di accumulo saranno descritti, e conseguentemente modellati, con la struttura della black-box. Un generico sistema di accumulo è rappresentato in Fig. 4.10. Tale sistema presenta la possibilità di immagazzinare flussi appartenenti alla generica CATEGORIA A (vedi 1.2). Il flusso $A_{Acc,in}$ identifica il generico flusso in ingresso al sistema di accumulo. Allo stesso modo $A_{Acc,out}$ identifica un flusso, appartenente alla stessa categoria A del flusso in ingresso, in uscita dal componente. La categoria A come detto in precedenza può rappresentare sia flussi di energia sia flussi di massa, ed è quindi utilizzato per comprendere sia i flussi E, F, Q sia i flussi M, W . Il Flusso π identifica il flusso di perdita, esso può rappresentare un flusso di energia [W] o un flusso di massa [kg/s] a seconda dei flussi accumulati nell'unità.

Numero e Tipologia di relazioni matematiche

In questo paragrafo si andranno ad esprimere le equazioni che identificano il modello del sistema di accumulo, e che dovranno essere inserite nel modello generale del sistema di conversione. La modellazione di un'unità di accumulo, come è facilmente immaginabile, è analoga alla modellazione dell'unità di trasformazione. Infatti sono necessarie:

- *Un bilancio dei Flussi*: esso rappresenterà un bilancio di massa nei casi in cui i flussi identifichino dei flussi di massa, oppure un bilancio di energia se viceversa i flussi sono flussi di energia. Nel caso in cui l'unità interagisca sia con flussi di energia che con flussi di massa, cioè quando sia richiesto esprimere oltre ai flussi di energia anche i flussi di massa ad essi associati (vedi par. 1.3), saranno richiesti entrambi i bilanci.
- *Una Mappa caratteristiche*: che permette di descrivere il funzionamento del componente e in particolar modo di ricavare le perdite in funzione del tempo.
- *Equazioni e disequazioni ausiliarie*: necessarie per esprimere vincoli, o altri aspetti che caratterizzano l'unità di Accumulo e il suo funzionamento.

Prima di passare a prendere in esame le diverse equazioni che descrivono l'unità di accumulo, è utile descrivere le relazioni che caratterizzano i flussi in ingresso e in uscita. Tali relazioni descrivono le interazioni che il generico sistema di accumulo può avere con l'ambiente esterno o con le altre unità del sistema.

Bilancio dei flussi in ingresso

$$\sum_i^n A_{i,out}(t) = A_{Acc,in}(t) \quad (4.1)$$

Tale bilancio rappresenta un bilancio di energia nel caso in cui la categoria A identifichi un flusso di energia, oppure un bilancio di massa nel caso in cui A identifichi un bilancio di massa. Il pedice i può rappresentare sia le unità di trasformazione ($i = P_i$), in questo caso la relazione 4.1 esprime la presenza di un nodo nel sistema ,caratterizzato da n ingressi e un uscita (confronto con la 2.14), sia una sorgente ($i = s$),in questo la relazione 4.1 descrive l'interazione diretta del sistema con una sorgente di flussi A (confronto con 2.4). Nel secondo caso il termine di sommatoria perde di significato.

Bilancio dei flussi in uscita

$$A_{Acc,out}(t) = \sum_j^m A_{j,in}(t) \quad (4.2)$$

Tale bilancio rappresenta, come per il caso precedente un bilancio di energia nel caso in cui la categoria A identifichi un flusso di energia, oppure un bilancio di massa nel caso in cui A identifichi un bilancio di massa. Il pedice j può rappresentare sia le unità di trasformazione ($j = P_i$), in questo caso la relazione 4.1 esprime la presenza di un nodo nel sistema, caratterizzato da un ingresso e m uscite (confronto con la 2.14), sia un'utenza ($j = u$),in questo la relazione 4.1 descrive l'interazione diretta del sistema con un'utenza di flussi A (confronto con 2.6). Nel secondo caso il termine di sommatoria perde di significato.

Bilancio dei Flussi

Nella gran parte delle trattazioni, come visto nel capitolo 1, si utilizzeranno flussi di energia. Per questo motivo quasi tutti i Bilanci di Flussi identificheranno principalmente dei bilanci di energia. Per completezza si vuole comunque evidenziare e descrivere sia i bilanci di massa che i bilanci di energia.

Bilancio di massa:

$$\dot{m}_{Acc,in}(t) - \dot{m}_{Acc,out}(t) - \pi_m(t) = \frac{dMa_{Acc}(t)}{dt} \quad (4.3)$$

in cui il termine $\frac{dMa_{Acc}(t)}{dt}$ rappresenta la variazione della massa contenuta all'interno dell'unità, i termini $\dot{m}_{Acc,in}(t)$ e $\dot{m}_{Acc,out}(t)$ identificano rispettivamente i flussi di massa entranti e uscenti dall'unità di accumulo. A differenza del sistema dell'unità di trasformazione tale termine non può venir trascurato, anzi rappresenta il termine fondamentale per descrivere la possibilità di immagazzinamento. Nel paragrafo 1.3.1 si è visto come molto spesso nell'analisi si possa considerare l'andamento del tempo non in modo continuo, ma come una successione di intervalli finiti entro i quali considerare costanti tutte le grandezze. Con questa ipotesi si può riscrivere l'equazione 4.3 non più in termini infinitesimi ma finiti:

$$\dot{m}_{Acc,in}(t) \cdot \Delta t - \dot{m}_{Acc,out}(t) \cdot \Delta t - \pi_m(t) \cdot \Delta t = Ma_{Acc}(t + \Delta t) - Ma_{Acc}(t) \quad (4.4)$$

Solitamente nelle analisi come intervallo temporale si considera 1 ora. In questo modo si vede come la variazione di massa contenuta all'interno del sistema di accumulo tra l'istante t e $t + \Delta t$, $(Ma_{Acc}(t + \Delta t) - Ma_{Acc}(t))$ sia data dalla differenza tra la massa entra nel componente nel tempo Δt ($\dot{m}_{Acc,in}(t) \cdot \Delta t$) e la massa che esce dal componente nello stesso intervallo ($\dot{m}_{Acc,out}(t) \cdot \Delta t$) meno la massa persa sempre nel tempo Δt ($\pi_m(t) \cdot \Delta t$).

Bilancio di energia: Il bilancio di energia presenta un'equazione analoga al bilancio di massa, dove però sono descritte le relazioni tra i flussi di energia che entrano ed escono dal sistema e l'energia contenuta all'interno del componente:

$$A_{Acc,in}(t) - A_{Acc,out}(t) - \pi_p(t) = \frac{dU_{Acc}(t)}{dt} \quad (4.5)$$

in cui il termine $\frac{dU(t)}{dt}$ rappresenta la variazione di energia contenuta all'interno dell'unità. Come per il bilancio di massa la relazione 4.5 può venir descritta in termini discreti tramite la:

$$A_{Acc,in}(t) \cdot \Delta t - A_{Acc,out}(t) \cdot \Delta t - U_{l,Acc}(t) = U_{Acc}(t + \Delta t) - U_{Acc}(t) \quad (4.6)$$

Il termine $U_{l,Acc}(t)$ coincide con il termine $\pi_p(t) \cdot \Delta t$ e rappresenta l'energia persa in nell'intervallo Δt . Si è deciso di esprimere così tale termini poiché nella sezione successiva si vedrà come le mappe caratteristiche mettano in relazione le perdite di energia con gli altri flussi che interagiscono con l'unità e con l'energia che in essa è contenuta. La relazione 4.6 afferma che la variazione dell'energia contenuta all'interno di un sistema di accumulo tra gli istanti t e $t + \Delta t$ ($U_{Acc}(t + \Delta t) - U_{Acc}(t)$) è calcolata come differenza tra l'energia che entra nel sistema, per mezzo del flusso $A_{Acc,in}$, nel tempo Δt e l'energia che nello stesso intervallo di tempo esce dal componente a causa del flusso $A_{Acc,out}$; a cui viene ulteriormente sottratto il termine di energia relativo alle perdite nell'intervallo Δt .

Mappe caratteristiche

Nel paragrafo 2.3.2 si è visto come le mappe caratteristiche per le unità di conversione rappresentavano le relazioni matematiche, in molti casi espresse in forma grafica o tabulare,

che definivano i reciproci legami tra i diversi flussi in ingresso e in uscita all'unità. Definire delle mappe simili per i sistemi di accumulo risulta un'impresa abbastanza difficile. L'utilità dei sistemi di accumulo, infatti, è quella di poter svincolare l'andamento temporale dei flussi in ingresso dall'andamento dei flussi in uscita. Ciò significa non avere una corrispondenza biunivoca tra il flusso in ingresso e il flusso in uscita. Per questo motivo non sono necessarie mappe che descrivano il rapporto che il flusso di massa o di energia in ingresso ha con il flusso di massa o di energia in uscita. Le mappe caratteristiche dei sistemi d'accumulo, quindi, descrivono solitamente la relazione che lega i fenomeni di perdita ai flussi in ingresso, in uscita e all'energia(massa) contenuta all'interno del sistema. In generale quindi la mappa potrà essere espressa in forma matematica tramite:

$$U_{l,Acc}(t) = f(U_{Acc}(t), A_{Acc,in}(t), A_{Acc,out}(t), cc) \quad (4.7)$$

La 4.7 rappresenta la formulazione generica di una mappa caratteristica per un sistema di accumulo di flussi di energia o di flussi di massa appartenenti alla categoria A . Per spiegare la dipendenza delle perdite di energia dai tre termini ($U_{Acc}(t)$, $A_{Acc,in}(t)$, $A_{Acc,out}(t)$) si fa riferimento alle tre fasi caratteristiche di tutti i sistemi di accumulo (nel seguito le relazioni verranno sempre espresse in termini finiti):

- La fase di carica è strettamente correlata al flusso in ingresso al sistema di accumulo $A_{Acc,in}(t)$. Si ricorda che in molti sistemi di accumulo (CAES, PHES, batterie) la fase di carica è contraddistinta da un processo di trasformazione del flusso in ingresso al sistema d'accumulo ($A_{Acc,in}$) in un flusso, che presenta caratteristiche differenti ($A_{stoc,in}$). Come è ben noto dalla termodinamica i processi di trasformazione reali difficilmente sono esenti da perdite. Ad esempio si consideri un sistema CAES in cui la fase di carica è rappresentata dal prelievo e dalla compressione di un flusso d'aria sfruttando un flusso in ingresso di energia elettrica E . La fase di compressione in particolare presenta fenomeni di perdita di energia legate al rendimento elettrico del motore e al rendimento meccanico del compressore. Le perdite di energia che hanno luogo in fase di carica possono essere espresse per un qualsiasi sistema di accumulo dalla relazione:

$$U_{l,Acc,car}(t) = (1 - \eta_{car}(c.c)) \cdot A_{Acc,in}(t) \cdot \Delta t \quad (4.8)$$

In cui $U_{l,Acc,car}(t)$ rappresenta l'energia persa in fase di carica nel tempo Δt , η_{car} identifica il rendimento del processo di carica (il rapporto tra il flusso che ha subito il processo di trasformazione e viene immagazzinato e il flusso in ingresso al sistema di accumulo $\eta_{car}(c.c) = A_{stock,in}/A_{Acc,in}$). Il rendimento può essere funzione delle condizioni al contorno, come ad esempio temperatura e pressione ambientale, un discorso analogo a quanto detto in relazione alle mappe caratteristiche delle unità di conversione. In riferimento al sistema CAES il flusso $A_{Acc,in}(t)$ è rappresentato dal flusso d'aria in ingresso al sistema di accumulo alla pressione p_0 , mentre η_{car} rappresenta il rendimento del processo di compressione. Ovviamente anche i sistemi di accumulo che non presentano una trasformazione dei flussi possono essere soggetti ai fenomeni di perdita in fase di carica. Ad esempio negli accumuli di flussi Q le perdite sono associate alle dispersioni termiche che hanno luogo nelle tubazioni in ingresso al serbatoio.

- La fase di stoccaggio è strettamente correlata all'energia $U_{Acc}(t)$ contenuta all'interno dell'accumulo. Le perdite che hanno luogo in questa fase descrivono la quantità di

energia che viene persa durante l'immagazzinamento dei flussi di energia. Si pensi ad esempio ad un serbatoio per l'accumulo di acqua ad una certa temperatura T_1 . In questo caso parte dell'energia contenuta all'interno del serbatoio sarà dissipata verso l'ambiente esterno a causa del gradiente di temperatura ($\Delta T = T_1 - T_0$, con T_0 temperatura dell'ambiente esterno) e del non perfetto isolamento termico del serbatoio (identificato dal coefficiente di trasmissione globale K). La formulazione generale per le perdite che caratterizzano la fase di stoccaggio può essere espressa dalla relazione:

$$U_{l,Acc,stoc}(t) = (1 - \eta_{stoc}(c.c)) \cdot U_{Acc}(t) + U_{l,Acc,stoc0}(t) \quad (4.9)$$

Dove $U_{l,Acc,stoc}(t)$ rappresentano le perdite di energia nella fase di stoccaggio, η_{stoc} identifica il rendimento di tale fase, $U(t)$ rappresenta l'energia contenuta all'interno del serbatoio al tempo t (intervallo temporale di ampiezza Δt) e $U_{l,Acc,stoc0}$ identifica le perdite che avvengono in tale fase e che sono indipendenti dalla quantità di energia contenuta all'interno dell'accumulo.

- La fase di scarica è strettamente collegata al flusso in uscita dal sistema $A_{Acc,out}(t)$. Le considerazioni fatte possono essere analoghe a quelle enunciate nella fase di carica. Anche qui gran parte dei fenomeni di perdita sono relazionabili ai processi di riconversione dei flussi dalla forma di energia accumulata alla forma iniziale. In riferimento al solito sistema CAES, la fase di scarica è rappresentata dall'espansione in turbina a gas del flusso d'aria prelevato dalla caverna con la produzione di un flusso di energia elettrica E . Le perdite qui sono tenute in considerazione nel rendimento meccanico della turbina e nel rendimento elettrico del generatore. Un forma generale per il calcolo delle perdite in questa fase può essere espresso dalla:

$$U_{l,Acc,scar}(t) = (1 - \eta_{scar}(c.c)) \cdot A_{Acc,out}(t) \cdot \Delta t \quad (4.10)$$

In cui $U_{l,Acc,scar}(t)$ rappresenta l'energia persa in fase di carica nel tempo t , η_{scar} identifica il rendimento del processo di scarica.

Tenendo presente le tre fasi l'energia persa $U_{l,Acc}(t)$ può essere espressa come composizione dei termini 4.8, 4.9, 4.10:

$$\begin{aligned} U_{l,Acc}(t) &= U_{l,Acc,car}(t) + U_{l,Acc,stoc}(t) + U_{l,Acc,scar}(t) \\ &= (1 - \eta_{car}(c.c)) \cdot A_{Acc,in}(t) \cdot \Delta t + (1 - \eta_{stoc}(c.c)) \cdot U_{Acc}(t) + \\ &+ U_{l,Acc,stoc0}(t) + (1 - \eta_{scar}(c.c)) \cdot A_{Acc,out}(t) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (4.11)$$

Per poter descrivere il funzionamento dell'unità di accumulo è quindi necessario conoscere i rendimenti della fase di carica, della fase di scarica e della fase di stoccaggio. In generale tali rendimenti sono ricavabili da:

- Dati sperimentali: si effettuano delle prove sui sistemi esistenti per decretare le perdite nelle diverse fasi di accumulo.
- Simulazioni: viene identificato il modello del sistema di accumulo caratterizzato da un grado di dettaglio maggiore, e su di esso si effettuano svariate prove per determinare le perdite relative alle tre fasi in diverse condizioni operative.

- Letteratura: i valori dei rendimenti possono essere stati ricavati da lavori svolti da terzi e/o essere forniti dai costruttori dei sistemi di accumulo.

In questa trattazione verrà sfruttata in particolar modo la terza strada. È da premettere che spesso in letteratura sono riscontrabili valori che identificano il rendimento totale del sistema di accumulo espresso in relazione all'energia immagazzinata. Il rendimento totale o efficienza del sistema di accumulo è funzione del rendimento di carica, di scarica e di stoccaggio e identifica in pratica la quantità di energia che deve essere immessa nel sistema di accumulo per poter disporre dell'unità di energia in uscita. Così ad esempio se un particolare sistema di accumulo presenta un'efficienza del 90% significa che per poter prelevare dal sistema 1 kWh di energia è stato necessario fornire precedentemente una quantità di energia pari a 1,1 kWh. Questo fatto fa sì che la relazione 4.11 possa essere riscritta tenendo in considerazione l'efficienza totale del sistema di accumulo come:

$$U_{l,Acc}(t) = (1 - \eta_{Acc}(c.c)) \cdot U_{Acc}(t) + U_{l,Acc,stoc0}(t, c.c) \quad (4.12)$$

dove η_{Acc} identifica l'efficienza del sistema di accumulo, $U_{Acc}(t)$ l'energia interna e $U_{l,Acc,stoc0}(t)$ il termine di perdita non influenzato dalla quantità di energia contenuta nell'accumulo. In forma generale la 4.12 può essere scritta come:

$$U_{l,Acc}(t) = f(U_{Acc}(t), c.c) \quad (4.13)$$

Come nel caso delle mappe caratteristiche per le unità di trasformazione, l'acronimo *c.c* identifica le condizioni al contorno. Questo rappresentano parametri o grandezze, esterni al sistema di accumulo, che ne condizionano il funzionamento, e in particolar modo influiscono sull'efficienza del processo di stoccaggio. Ad esempio il caso più tipico è rappresentato dall'influenza della temperatura dell'ambiente che circonda un sistema di accumulo termico. La variazione di tale temperatura, ed in particolar modo del gradiente termico tra interno ed esterno del serbatoio, provoca, a parità di altre condizioni, una variazione delle perdite di energia. Questo fatto sarà meglio evidenziato nel paragrafo 5.2.2 in cui sarà spiegato il processo per definire la mappa caratteristica per un serbatoio di accumulo termico a temperatura costante. Nel processo di determinazione delle mappe caratteristiche è quindi necessario porre molta attenzione all'influenza delle condizioni al contorno. In questa trattazione per descrivere le mappe caratteristiche per i sistemi di accumulo si utilizzerà sempre la relazione 4.13, che pur presentando una semplificazione è in linea con le ipotesi svolte nel resto del lavoro.

Equazioni ausiliarie

Come per le unità di trasformazione le equazioni ausiliarie comprendono un set di relazioni di diversa tipologia. La composizione e la gamma di queste equazioni sono fortemente influenzate dal grado di dettaglio scelto e dal tipo di analisi a cui si vuol sottoporre il sistema. In questa categoria si possono far ricadere tutte le relazioni matematiche che sono utili a descrivere il comportamento dell'unità o alcuni aspetti a cui essa è collegata e che non ricadono nei tipi di equazioni viste in precedenza. Ad esempio si hanno equazioni che esprimono:

- Il campo di esistenza dei flussi. In questo caso le equazioni determinano i valori massimi e minimi che possono assumere i flussi in ingresso e in uscita al sistema di accumulo. Sono disequazioni del tipo $A_{Acc,in,min} \leq A_{Acc,in}(t) \leq A_{Acc,in,max}$. Oppure possono decretare il massimo(o minimo) valore di energia contenuto all'interno del

componente : $U_{Acc,min} \leq U_{Acc}(t) \leq U_{Acc,max}$. $U_{Acc,max}$ identifica in pratica la taglia del sistema di accumulo.

- Relazioni tra parametri di stato. Queste relazioni caratterizzano gradi di dettaglio superiori a quelli utilizzati in questa trattazione. In generale, comunque, tali relazioni possono descrivere vari aspetti che riguardano l'andamento dei parametri di stato. Ad esempio sono utili per descrivere l'andamento della temperatura all'interno di un serbatoio per l'accumulo di flussi Q , o la pressione interna della caverna nei sistemi CAES.
- Particolari aspetti o operazioni. Sono delle relazioni supplementari che servono a descrivere aspetti particolari dell'unità di accumulo. Un tipico esempio è rappresentato dall'equazione che impedisce alle fasi di carica e scarica di coesistere nello stesso istante temporale. Molti sistemi di accumulo, infatti, non permettono di prelevare energia dal componente di accumulo mentre si sta immettendo energia nello stesso. Un tipico esempio sono i sistemi a pompaggio in cui si utilizza una pompa/turbina reversibile. In questo caso la macchina può svolgere in determinato istante temporale solo una delle due fasi: o pompare una portata d'acqua dal bacino inferiore al bacino superiore o turbinare una portata d'acqua dal bacino superiore a quello inferiore. In questi casi è necessario imporre una condizione che impedisca al flusso in ingresso e al flusso in uscita di assumere contemporaneamente un valore positivo. Tale condizione può essere espressa dalla: $A_{Acc,in}(t) \cdot A_{Acc,out}(t) = 0$ che esprime il fatto che in un generico istante t almeno uno dei due flussi dovrà essere pari a zero.

4.5.2 Esempio di modellazione di un sistema di conversione in presenza di unità di accumulo

In questo paragrafo sarà analizzato come sia possibile costruire il modello di un sistema di conversione in presenza di unità di accumulo. Alle informazioni relative al modello di un sistema in assenza di accumulo, trattate nel capitolo 2, si aggiungeranno le indicazioni appena descritte per definire le unità di accumulo. Nel capitolo 2 si era osservato come per creare il modello di un sistema di conversione erano necessarie:

- n_s Bilanci di Flussi per descrivere le interazioni del sistema di conversione con le n_s sorgenti. Tali bilanci sono espressi dall'equazione 2.4.
- n_u Bilanci di Flussi per descrivere le interazioni del sistema di conversione con le n_u utenze. Tali bilanci sono espressi dall'equazione 2.6.
- n_{nodi} Bilanci di Flussi per descrivere gli n_{nodi} nodi che sono presenti all'interno del sistema. Equazione 2.14.
- Per ogni unità di trasformazione:
 - Un bilancio di Flussi: Bilancio di massa (equazione 2.17) o di Energia (equazione 2.19) a seconda dei flussi coinvolti, se sono presenti entrambi le tipologie di flussi sono richiesti entrambi.
 - $(k - 1)$ Mappa caratteristiche (relazione 2.20): con $k = n + m$, somma del numero dei flussi in ingresso n e del numero dei flussi in uscita m all'unità.

- Equazioni ausiliarie: il numero e la tipologia dipende dallo specifico aspetto o analisi che si vuole evidenziare. Sicuramente saranno espressi i vincoli sui flussi relativi alle mappe caratteristiche.

A queste relazioni si aggiungono quelle viste nel paragrafo 4.5.1, che permettono di descrivere le diverse unità di accumulo eventualmente presenti nel sistema. Per ogni unità di accumulo sarà necessario:

- Un bilancio di Flussi: Bilancio di massa (equazione 2.17) o di Energia (equazione 2.19) a seconda dei flussi coinvolti, se sono presenti entrambi le tipologie di flussi sono richiesti entrambi.
- Una Mappa caratteristica per considerare l'efficienza dell'unità
- Equazioni Ausiliarie: il numero e la tipologia dipende dallo specifico aspetto o analisi che si vuole evidenziare.

Le equazioni descritte nel paragrafo 4.5.1 relative ai bilanci di flussi in ingresso e in uscita al sistema di accumulo, come già detto, ricadono nei bilanci che descrivono le interazioni tra sistema ed ambiente e i nodi del sistema (equazioni 2.4,2.6,2.14). Nel seguito sarà

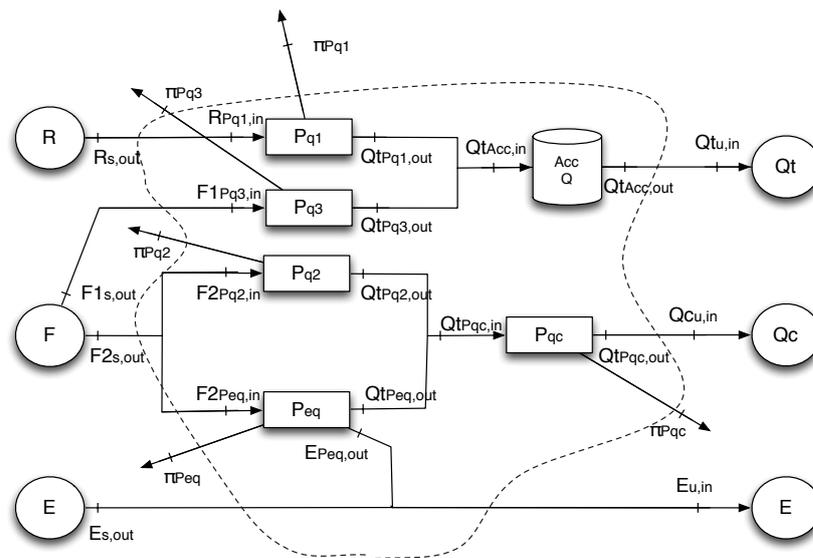


Figura 4.11: Schema di un sistema di conversione composto da diverse unità di trasformazione adibito al soddisfacimento di tre utenze con la presenza di un'unità di accumulo termico

identificato il modello di uno specifico sistema di conversione in presenza di accumulo. Il sistema è rappresentato in figura 4.11 e rappresenta il sistema analizzato nel paragrafo 2.5 dove si è inserita un'unità di accumulo di flussi Q . Il modello del sistema verrà riassunto solo brevemente, poiché già ampiamente descritto in 2.5. L'analisi si concentrerà maggiormente sulle relazioni che descrivono il sistema di accumulo e le sue interazioni con gli altri componenti del sistema. Il serbatoio di accumulo di flussi Q è stato collegato in uscita con l'utenza di energia termica, mentre in ingresso è alimentato dall'impianto solare termico e dalla caldaia a gasolio. L'utilizzo di un sistema di accumulo posto in questa posizione

permette di svincolare temporalmente la richiesta di flussi Q_t da parte dell'utenza termica dalla fase di produzione dei flussi stessi. In particolar modo permette di sfruttare al meglio sia l'impianto P_{q1} sia l'impianto P_{q2} .

Nel sistema in esame sono presenti esclusivamente flussi di energia, per cui non saranno necessari i bilanci di massa ed equazioni di congruenza relative ai flussi di massa. Si ipotizza che i flussi di energia abbiano un andamento variabile nel tempo e che l'espressione di tale andamento sia descritto in termini discreti (ciò in intervalli fini di ampiezza Δt entro cui considerare costanti le grandezze).

Per definire il modello di tale sistema è quindi necessario determinare le relazioni matematiche che descrivono il funzionamento dello stesso. Nella tabella 4.2 sono riassunte il numero e la tipologia di equazioni che devono essere presenti nel modello

Tabella 4.2: Tabella riassuntiva del numero e della tipologia di equazioni necessarie per il modello del sistema di conversione descritto in figura 4.11

| | Numero di interazioni o unità | Tipologia di Equazioni |
|---|-------------------------------|---|
| Interazioni Sorgenti-Unità | $n_s = 4$ | 4 × Bilanci di Energia |
| Interazioni Unità-Utenza | $n_u = 3$ | 3 × Bilanci di Energia |
| Unità di trasformazione 1 input-1 output | numero unità = 4 | 4 × Bilanci di Energia 4 × Mappe Caratteristiche Equazioni Ausiliarie |
| Unità di trasformazione 1 input-2 output | numero unità = 1 | 1 × Bilanci di Energia 2 × Mappe Caratteristiche Equazioni Ausiliarie |
| Unità di accumulo | numero unità = 1 | 1 × Bilanci di Energia 1 × Mappe Caratteristiche Equazioni Ausiliarie |
| Nodi | $n_{nodi} = 2$ | 2 × Bilancio di Energia |

Interazioni ambiente-sistema.

Si può facilmente vedere come i flussi che rappresentano le interazione tra ambiente e sistema siano 3 sul lato delle utenze e 4 sul lato sorgenti e perciò sono richieste 3 equazioni di bilancio del tipo 2.6 e 4 equazioni del tipo 2.4.

$$\text{Bilanci di Energia Unità - Utenze} \quad Qt_{Acc,out}(t) = Qt_{u,in}(t) \quad (4.14)$$

$$E_{s,out}(t) + E_{Peq,out}(t) = E_{u,in}(t) \quad (4.15)$$

$$Qc_{Pqc,out}(t) = Qc_{u,in}(t) \quad (4.16)$$

$$\text{Bilanci di Energia Sorgenti - Unità} \quad R_{s,out}(t) = R_{Pq1,in}(t) \quad (4.17)$$

$$F1_{s,out}(t) = F1_{Pq3,in}(t) \quad (4.18)$$

$$E_{s,out}(t) = E_{u,in}(t) - E_{Peq,out}(t) \quad (4.19)$$

$$F2_{s,out}(t) = F2_{Pq2,in}(t) + F2_{Peq,in}(t) \quad (4.20)$$

Dove si può vedere che l'equazione 2.49 sia stata sostituita dalla 4.14 a causa del interazione diretta tra il componente di accumulo e l'utenza termica. Come per il caso analizzato nel capitolo 2, l'equazione 4.19 è analoga all'equazione 4.15 a causa del collegamento diretto tra sorgente e utenza.

Collegamenti

Rispetto al sistema in assenza di accumulo in questo sistema si ha l'introduzione di un ulteriore nodo per i flussi di energia. Il nodo in questo caso rappresenta identifica la relazione tra i flussi in uscita dai componenti P_{q1} e P_{q3} e il flusso in ingresso al sistema di accumulo. Questo nodo può essere modellato mediante una relazione del tipo 2.14. I due nodi sono descritti tramite le relazioni:

$$\text{Bilancio di Energia:} \quad Qt_{Peq,out}(t) + Qt_{Pq2,out}(t) = Qt_{Pqc,in}(t) \quad (4.21)$$

$$Qt_{Pq1,out}(t) + Qt_{Pq3,out}(t) = Qt_{Acc,in}(t) \quad (4.22)$$

Unità di trasformazione

Le modellazione delle unità di trasformazione non subisce alcuna modifica a causa dell'inserimento del componente di accumulo. Per questo motivo e per non appesantire la trattazione non vengono riportate le equazioni del modello relative a tali unità. Per vedere tali equazioni si rimanda al paragrafo 2.5.

Unità di accumulo

La modellazione dell'unità di accumulo passa attraverso la determinazione del bilancio dei flussi, della mappa caratteristica e delle eventuali equazioni ausiliarie.

Unità AccQ

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input (n=1), 1 Flusso in output (m=1), 1 Flusso di perdita

$$\text{Bilancio di energia:} \quad U_{Acc}(t + \Delta t) - U_{Acc}(t) = Qt_{Acc,in}(t) \cdot \Delta t - Qt_{Acc,out}(t) \cdot \Delta t - U_{l,Acc}(t) \cdot \Delta t \quad (4.23)$$

$$\text{Mappa caratteristica:} \quad U_{l,Acc}(t) = (1 - \eta_{Acc}) \cdot U_{Acc}(t) + U_{l,Acc,sto0}(t) \quad (4.24)$$

$$\text{Vincoli:} \quad U_{Acc}(t) \leq U_{Acc,max} \quad (4.25)$$

In cui il bilancio è stato espresso in termini discreti del tempo.

Nel modello del sistema sono quindi presenti in totale 21 equazioni:

- 6 equazioni relative gli scambi tra ambiente e sistema.
- 2 equazione relativa al nodo
- 5 bilanci di energia per le di trasformazione (1 bilancio ogni unità)
- 6 mappe caratteristiche per le unità di trasformazione
- 1 bilancio di energia per le unità di accumulo
- 1 mappa caratteristica per le unità di accumulo

Si ipotizza di conoscere il valore delle utenze e che i parametri di prestazione delle diverse unità siano noti, cioè si ipotizza di effettuare un'analisi del funzionamento del sistema. Per cui $Q^{t_{u,in}}(t)$, $Q^{c_{u,in}}(t)$, $E_{u,in}(t)$ sono assunti a parametro così come m_{Pi} , m_{1Pi} , q_{Pi} , q_{1Pi} , η_{Acc} e $U_{l,Acc,stoc0}$. Le variabili del modello sono rappresentate dai restanti flussi e dalle variabili binarie:

- 23 variabili relative ai flussi
- 1 variabile relativa all'energia contenuta nel serbatoio
- 5 variabili binarie

Il modello in definitiva è formato da 21 equazioni e 29 variabili, ciò significa che saranno necessarie 8 variabili indipendenti per descrivere completamente il sistema. Rispetto al caso in assenza di accumulo sono state introdotte 3 equazioni in più e 4 variabili in più.

4.6 Conclusioni

In questo capitolo si sono descritti i sistemi di accumulo. Si è visto che essi possono essere rappresentati come dei componenti del sistema in grado di immagazzinare flussi di energia e/o di massa. Le finalità per cui tali componenti possono venir inseriti all'interno di un sistema di conversione possono essere sostanzialmente tre: ridurre la taglia di una o più unità di trasformazione presenti all'interno del sistema (progetto), migliorare l'operatività di una o più unità (funzionamento), rendere fattibile la messa in opera di sistemi che altrimenti non potrebbe soddisfare le utenze (fattibilità). La possibilità di un sistema di accumulo di immagazzinare esclusivamente flussi appartenenti ad una stessa categoria ha suggerito di classificare i diversi sistemi di accumulo in relazione alla categoria di flusso immagazzinato. In questo modo, nel paragrafo 4.3, sono stati descritti per ogni categoria di flussi accumulabili (F , E , Q , M e W) le principali tecnologie disponibili in commercio. Si è potuto osservare come in alcuni casi l'immagazzinamento di una determinata quantità di energia possa avvenire esclusivamente grazie ad una conversione in un'altra forma di energia, lo stoccaggio di quest'ultima e una successiva riconversione nella forma di energia iniziale. Nel paragrafo 4.4 si è analizzato come i sistemi di accumulo possano interagire con i restanti componenti del sistema e con l'ambiente esterno. Si è utilizzato lo schema introdotto nel capitolo 1 (superstruttura) per analizzare le possibili interazioni che l'accumulo ha con le sorgenti e con le risorse. Il collegamento diretto tra l'accumulo e l'ambiente esterno permette di sostituire i vincoli che riguardano il valore temporale dei flussi (potenze) con dei vincoli che limitino le quantità di energie scambiate in un determinato intervallo temporale. L'analisi dei sistemi di accumulo passa attraverso la definizione del modello matematico che li descrive. Nel paragrafo 4.5 si è visto come le relazioni matematiche necessarie alla descrizione di un sistema di accumulo siano analoghe a quelle delle unità di trasformazione. In particolare ogni sistema di accumulo richiede che sia definito un bilancio di energia (o massa, a seconda dei flussi interessati), una mappa caratteristica per il calcolo delle perdite e delle equazioni ausiliarie per definire vincoli, relazioni tra parametri di stato ecc. Nel paragrafo 4.5.1 si è infine osservato come il modello del sistema di accumulo possa essere integrato nel modello del sistema di conversione definito nel capitolo 2.

Capitolo 5

Modellazione ed ottimizzazione dei Macro-Sistemi: Applicazioni

In questo capitolo vengono presentati e discussi alcuni esempi di sistemi di conversione in presenza di componenti di accumulo. Per ogni sistema viene mostrato il modello che ne descrive la configurazione e il funzionamento in relazione ai concetti esposti nei capitoli 2 e 4. I diversi sistemi saranno in seguito sottoposti a un processo di ottimizzazione per determinare le caratteristiche di progetto e/o funzionamento migliori. Gli esempi sono stati scelti appositamente per sottolineare le principali finalità dei sistemi di accumulo, in particolar modo in fase di funzionamento e di progetto. Nel primo esempio si analizza un problema di ottimizzazione di design e off-design in cui deve essere determinata la taglia del sistema di accumulo e il funzionamento globale del sistema (funzionamento). Inoltre si espone un particolare criterio atto alla semplificazione di questi specifici problemi dinamici (criterio TSO-STO). Nel secondo esempio si presenterà un problema di ottimizzazione completa di un sistema per il soddisfacimento di un'utenza termica in due casi: in assenza e in presenza di un sistema di accumulo termico (progetto).

5.1 Introduzione

Nel capitolo 1 si è visto come un qualsiasi sistema di conversione possa essere schematizzato in modo semplice individuando le interazioni che possiede con l'ambiente esterno (utenze e sorgenti), i componenti che lo costituiscono e le reciproche interazioni tra essi. Le interazioni tra ambiente e sistema e quelle tra i componenti del sistema sono rappresentate dalle quantità di massa o di energia che sono scambiate, e che in questa trattazione sono state espresse in termini di flussi di massa e flussi di energia. Nel paragrafo 1.2 sono stati classificati i diversi flussi di massa e di energia in relazione alle caratteristiche simili che li contraddistinguono. Nei paragrafi 1.3 e 1.4 si è sfruttata tale classificazione per identificare i diversi tipi di interazione tra ambiente e sistema e i diversi componenti presenti all'interno del sistema stesso. In particolar modo si è potuto osservare come i principali componenti di un sistema di conversione siano le unità di trasformazione. Tutto queste nozioni sono state riassunte in uno schema, definito superstruttura, il quale permette di individuare tutte le possibili traiettorie di conversione che coinvolgono il sistema di conversione e l'ambiente esterno. Nel capitolo 2 si è descritto una metodologia per determinare il modello matematico del sistema di conversione schematizzato con i dettami individuati

nel capitolo 1. Si è potuto notare come le interazioni tra ambiente e sistema siano descritte tramite le equazioni di congruenza tra i flussi prelevati (ceduti) dall'(all')ambiente e i flussi in ingresso (uscita) al(dal) sistema. Per ciò che concerne le unità di trasformazione esse sono descritte dal bilancio di massa, dal bilancio di energia, dalle mappe caratteristiche e dalle equazioni ausiliarie. Nel capitolo 3 si sono introdotti i problemi di ottimizzazione e si è visto come la formulazione di un generico problema di ottimizzazione possa essere distinto in quattro fasi: definizione dei confini del sistema, scelta delle variabili di decisione, scelta del criterio di ottimizzazione (funzione obiettivo), individuazione del modello del sistema. Si è inoltre visto come i problemi di ottimizzazione che riguardano i sistemi di conversione siano problemi di ottimizzazione vincolata, in cui i vincoli, a cui sono soggette le variabili di decisioni presenti nella funzione obiettivo, sono rappresentati dalle relazioni matematiche che costituiscono il modello del sistema. Solitamente i problemi di ottimizzazione riguardanti i sistemi di conversione sono risolvibili mediante la programmazione (non)lineare mista intera, e dove in molte situazioni è possibile sfruttare la programmazione dinamica. Nel capitolo 4 infine si sono descritti le unità di accumulo, le quali sono state classificate in relazione alla categoria di flusso che immagazzinano. Si è potuto osservare come la modellazione dei sistemi di accumulo sia del tutto analoga alla modellazione delle unità di trasformazione, dove però i bilanci di massa e di energia sono caratterizzati da equazioni differenziali nel tempo. Questo aspetto rende il modello del sistema fortemente dinamico, e conseguentemente anche il problema di ottimizzazione correlato deve essere considerato dinamico. Questo capitolo è stato introdotto per riassumere tutti i concetti visti fino ad ora applicandoli a degli esempi di sistemi di conversione caratterizzati dalla presenza di componenti di accumulo. In particolar modo si è deciso di descrivere due esempi con lo scopo di evidenziare le principali finalità dei sistemi di accumulo. Nel paragrafo 5.2 viene descritto un sistema di conversione composto da un unità di trasformazione P_q , un unità P_{eq} e un sistema di accumulo termico. In questo esempio si metterà in luce l'influenza che il componente di accumulo ha sul funzionamento del sistema. Tale sistema viene ottimizzato per determinare la taglia ottima del sistema di accumulo e l'ottima operatività del sistema complessivo. La determinazione della taglia dell'accumulo rende la funzione obiettivo non separabile, condizione necessaria per poter applicare la programmazione dinamica (paragrafo 3.4.4). Nel paragrafo 5.2.1 viene introdotto il criterio TSO-STO che permette in specifici casi di scomporre la funzione obiettivo in due funzioni obiettivo entrambe separabili. Nel paragrafo 5.2.2 si focalizza l'attenzione su due aspetti: i vincoli sulla massima variazione di carico, e la determinazione della mappa caratteristica per il sistema di accumulo. Il secondo esempio analizzato nel paragrafo 5.3 prenderà in esame l'ottimizzazione della sintesi, e del design e del funzionamento di un sistema di conversione atta al soddisfacimento di un'utenza termica. Verranno analizzate due situazioni. Nella prima sarà determinata la topologia (numero e taglia dei componenti) del sistema in assenza di componenti di accumulo. Nella seconda è sempre determinata la topologia del sistema, ma in questo caso è previsto un componente di accumulo. Si noterà come in questo secondo caso il componente di accumulo permetta di ridurre il numero e le dimensioni delle unità di trasformazioni presenti. Gli esempi verranno schematizzati con i dettami del capitolo 1, e per ognuno di essi sarà individuato con precisione il modello che li descrive in relazione alle considerazioni svolte nel capitolo 2 e 4. Inoltre per ciascuno sarà formulato il problema di ottimizzazione, individuando la funzione obiettivo e le variabili di decisione. Tutti gli esempi vengono risolti utilizzando il software *GAMS*[®] utilizzando il solutore CPLEX, il quale permette di gestire la programmazione dinamica.

5.2 Ottimizzazione del design e del funzionamento di un sistema di conversione per la produzione di energia elettrica e termica

Il primo esempio presentato riguarda l'ottimizzazione del progetto e del funzionamento di un sistema di conversione in presenza di un componente di accumulo termico durante un giorno tipo invernale suddiviso in intervalli di un'ora. Di conseguenza tutti i flussi di energia e tutte le grandezze che sono funzione del tempo saranno descritti in termini discreti in intervalli Δt pari a un'ora. Lo scopo di questa analisi (ottimizzazione) è di determinare le ottime dimensioni del sistema di accumulo. Il sistema è visibile in figura 5.1. ed è composto da un'unità cogenerativa P_{eq} , un'unità per la produzione di flussi termici P_q e un sistema di accumulo di flussi di energia termica.

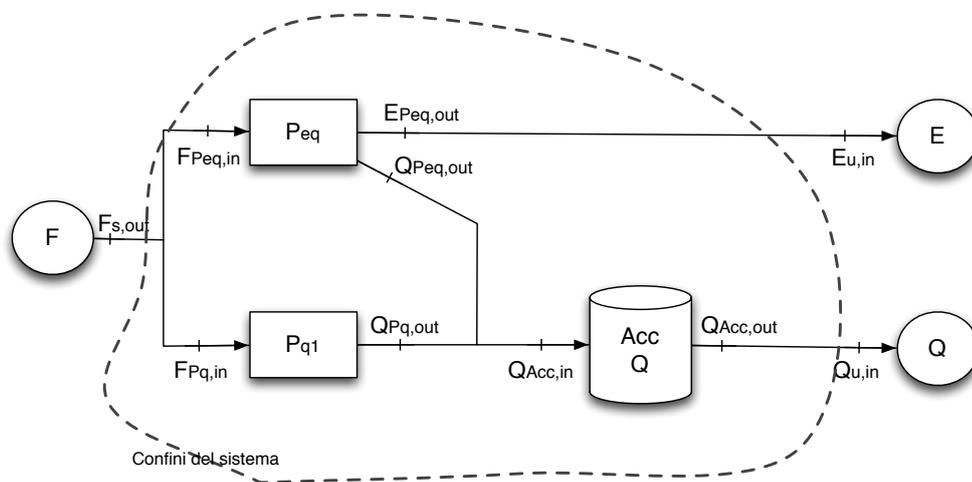
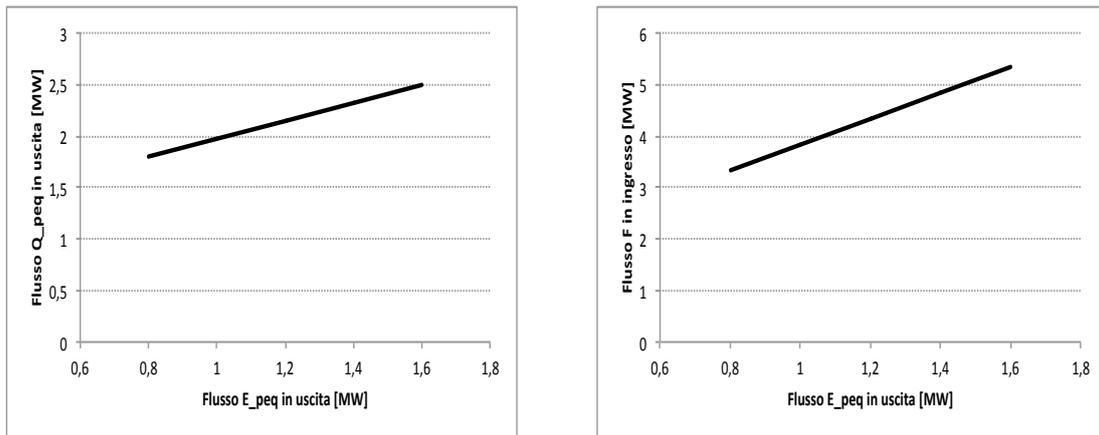


Figura 5.1: Schema di un sistema di conversione composto da un'unità P_q , un'unità P_{eq} e un sistema di accumulo di flussi Q

Per ciò che concerne l'ambiente esterno si possono riscontrare: un'utenza termica, rappresentata dalla richiesta di calore di una rete di riscaldamento, un'utenza elettrica (in realtà si tratta di un'uscita del sistema, ma per le ipotesi fatte nel paragrafo 1.3.1 si è visto che può essere considerata come una particolare utenza) e una sorgente di flussi di energia accumulabile, che rappresenta l'energia chimica associata ad un combustibile. Nel seguito verranno descritti brevemente le caratteristiche dei diversi componenti, delle utenze e della sorgente. Prima è però utile fare una premessa: nel paragrafo 1.2 si è visto come i flussi di energia termica associati alla variazione di temperatura di un fluido potevano essere espressi come $Q_i = \dot{m}_i \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{rif})$, in cui T_{rif} è la temperatura di riferimento su cui calcolare il valore del flusso di energia. In questo esempio si assume come valore della temperatura di riferimento 60°C , che rappresenta la temperatura del fluido che ritorna dall'utenza. Con questa ipotesi è possibile trascurare dall'analisi i flussi di energia che vengono prelevati dal circuito di ritorno dall'utenza in quanto presentano un valore di potenza pari a zero (poiché $\Delta T = 0$). L'unità P_{eq} identifica una turbina a gas cogenerativa nella quale i gas esausti all'uscita della turbina entrano in uno scambiatore a recupero e riscaldano una portata d'acqua (prelevata dal circuito di ritorno dall'utenza) fino ad una temperatura di 100°C . I flussi di energia elettrica ($E_{Peq,max}$) e termica ($Q_{Peq,max}$) prodotti dall'unità di

trasformazione P_{eq} , in condizioni di progetto (massimi), sono rispettivamente pari a 1600 [kW] e 2500 [kW], ai quali corrisponde un rendimento elettrico di progetto $\eta_{el,P_{eq,max}}$ del 30 %. In tali condizioni in ingresso è richiesto, quindi, un flusso di energia chimica ($F_{P_{eq,in}}$) di 5300 [kW]. Il flusso di energia elettrica $E_{P_{eq,out}}$ (t) può essere ridotto in modo continuo fino al valore minimo $E_{P_{eq,min}}$ di 800 [kW] (50 %del carico massimo), al quale corrisponde una potenza termica $Q_{P_{eq,min}}$ di 1800 [kW] e un rendimento elettrico $\eta_{el,P_{eq,min}}$ del 24%. In Fig.5.2 sono riportate le mappe caratteristiche del Sistema P_{eq} appena descritte.



(a) Mappa caratteristica E-Q linearizzata dell'unità P_{eq}

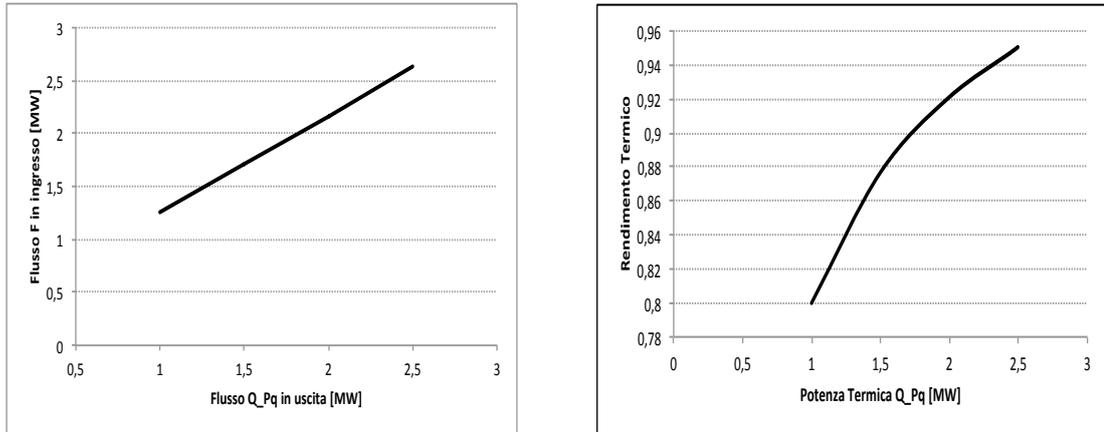
(b) Mappa caratteristica E-F linearizzata dell'unità P_{eq}

Figura 5.2: Mappa caratteristiche linearizzate dell'unità P_{eq}

Il coefficiente C, che determina per un impianto cogenerativo il rapporto tra il prodotto di maggior pregio ($E_{P_{eq,out}}$) e quello di minor pregio ($Q_{P_{eq,out}}$), vale in condizioni di progetto 0,64 e in condizioni di minimo carico 0,44. I gas esausti non possono by-passare lo scambiatore di calore a recupero, quindi il valore della flusso di energia elettrica $E_{P_{eq,out}}$ (t) e termica $Q_{P_{eq,out}}$ (t) sono legati da una relazione biunivoca in tutto il campo di variazione di carico possibile. Il flusso di energia elettrica $E_{P_{eq,out}}$ (t) è collegato direttamente con un'utenza elettrica, che identifica la rete di distribuzione. Viene assunto che l'unità P_{eq} in questo primo esempio non presenti vincoli sulle massime rampe di variazione di carico; tali vincoli saranno analizzati nel paragrafo 5.2.2.

L'unità P_q è una caldaia industriale che riscalda una portata d'acqua (prelevata dal circuito di ritorno dall'utenza) fino ad una temperatura di 100°C. Tale unità dà un flusso di energia termica a pieno carico $Q_{P_q,out,max}$ pari a 2500 [kW]. Il carico termico $Q_{P_q,out}$ (t) può essere ridotto in modo continuo fino al valore minimo $Q_{P_q,min}$ di 1000 [kW] (40%del carico massimo). L'efficienza termica η_{P_q} decresce linearmente da un valore massimo di 95%a pieno carico a un valore di 80%a minimo carico. Analogamente a quanto fatto per l'unità P_{eq} in fig. 5.3a è mostrata la mappa caratteristica $F_{P_q,in}-Q_{P_q,out}$ e in fig. 5.3b è mostrato l'andamento dell'efficienza termica al variare del carico.

Il sistema di accumulo Acc_q è un serbatoio di accumulo di acqua calda in pressione alla temperatura di 100%. Uno degli scopi dell'ottimizzazione è quello di determinare la taglia del sistema di accumulo identificata con $U_{acc,max}$ [kWh].In questo primo esempio si fa l'ipotesi di trascurare le perdite di energia, il che equivale a supporre un coefficiente di trasmissione globale del calore pari a zero, ossia isolamento perfetto. Con questa ipotesi come si vedrà nel seguito non è necessario esprimere la mappa caratteristica per descrivere



(a) Mappa caratteristica Q-F linearizzata dell'unità P_q

(b) Andamento del rendimento termico ai carichi parziali per l'unità P_q

Figura 5.3: Mappa caratteristiche dell'unità P_q

il componente di accumulo. Le perdite saranno considerate successivamente nella sezione 5.2.2. Il sistema di accumulo presenta in ingresso un flusso di energia termica dato dalla somma dei flussi proveniente dalle due unità di trasformazione ($Q_{acc,in}(t)$) e in uscita un flusso di energia termica che sarà collegato direttamente con l'utenza termica ($Q_{u,in}(t)$). Il flusso di energia termica richiesto dall'utenza ($Q_{u,in}(t)$) viene ricostruito in accordo con le ipotesi fatte nello studio [63] sulle previsioni dei carichi termici. La domanda termica $Q_{u,in}(t)$ viene suddivisa in due componenti:

- $Q_{u,T}(t)$ che è funzione della temperatura esterna e rappresenta la quota della domanda relativa al riscaldamento degli ambienti;
- $Q_{u,soc}(t)$ che è funzione del comportamento sociale degli utenti e tende ad essere indipendente dalla temperatura esterna. $Q_{u,soc}(t)$ rappresenta la quota della domanda relativa alla produzione di acqua calda sanitaria.

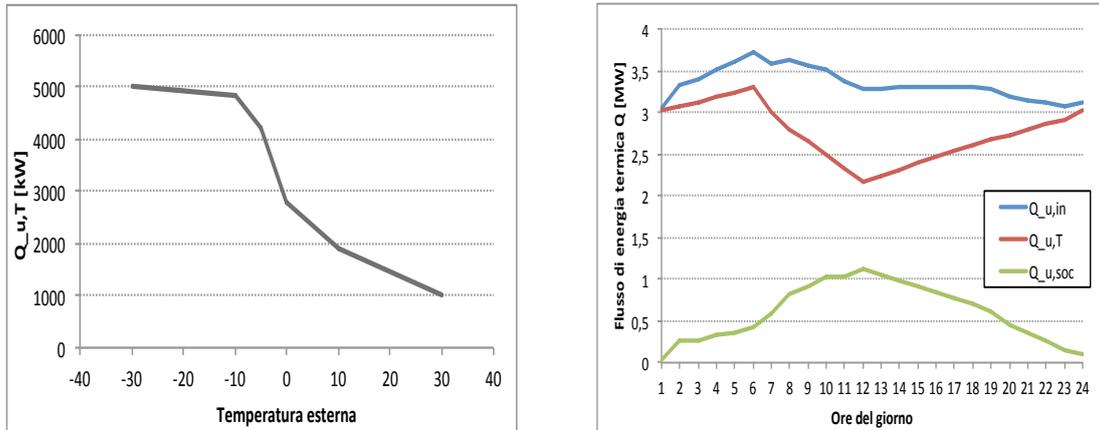
In Fig.5.4a sono riportati la relazione che lega $Q_{u,T}(t)$ alla temperatura esterna e mentre i profili di $Q_{u,in}(t)$, $Q_{u,T}(t)$ e $Q_{u,soc}(t)$ durante il giorno tipo considerato si evincono da Fig. 5.4b.

L'utenza elettrica $E_{u,in}$ come si diceva in precedenza non presenta una richiesta vera e propria di flussi E ma identifica una sezione dell'ambiente che può ricevere i flussi in questione. Essa rappresenta la rete di distribuzione elettrica alla quale il flusso di energia elettrica $E_{P_{eq},out}(t)$ viene venduto ad un prezzo variabile nel tempo con andamento descritto in figura 5.5.

L'unica sorgente presente identifica un flusso di energia accumulabile $F_{s,out}(t)$ che rappresenta una portata di gas naturale in ingresso al sistema. Tale portata di gas alimenta sia l'unità P_{eq} sia l'unità P_q . Il gas naturale presenta un potere calorifero pari a 50 [MJ] e un costo di 0,55 [€/kg]. Questo permette di ricavare un costo per il flusso di combustibile pari a $c_F = 39,6$ [€/MWh].

Modello del Sistema

Come ampiamente descritto nel capitolo 2 la determinazione del modello di un sistema e quindi del numero e della tipologia di equazioni che lo compongono è direttamente

(a) Influenza della temperatura esterna sulla richiesta di flussi $Q_{u,T}$ (b) Andamento giornaliero della richiesta di calore ($Q_{u,T}$, $Q_{u,soc}$, $Q_{u,in}$)**Figura 5.4:** Andamento giornaliero della richiesta di calore e influenza della temperatura**Figura 5.5:** Andamento giornaliero del prezzo di vendita dell'energia elettrica

collegata alla configurazione del sistema di conversione e alle sue interazioni con le sorgenti e con le utenze. Nella tabella 5.1 vengono riassunte il numero e la tipologia delle equazioni necessarie che saranno descritte nel seguito. Dalla figura 5.1 si può vedere come non siano stati considerati i flussi di perdita nelle unità di trasformazione. Questo è stato fatto poiché ai fini di questa analisi essi i flussi di perdita non hanno influenza sul modello o sul problema di ottimizzazione. Ciò implica che non sia richiesto il bilancio di energia per le unità di trasformazione.

Interazioni ambiente-sistema.

Si può facilmente vedere come i flussi che rappresentano le interazione tra ambiente e sistema siano 2 sul lato delle utenze e 1 sul lato sorgenti e perciò sono richieste 2 equazioni di bilancio del tipo 2.6 e 1 equazioni del tipo 2.4.

$$\text{Bilanci di Energia Unità - Utente} \quad Q_{Acc,out}(t) = Q_{u,in}(t) \quad (5.1)$$

$$E_{Peq,out}(t) = E_{u,in}(t) \quad (5.2)$$

Tabella 5.1: Tabella riassuntiva del numero e della tipologia di equazioni necessarie per il modello del sistema di conversione descritto in figura 5.1

| | Numero di interazioni o unità | Tipologia di Equazioni |
|---|-------------------------------|--|
| Interazioni Sorgenti-Unità | $n_s = 1$ | 1 × Bilanci di Energia |
| Interazioni Unità-Utenza | $n_u = 2$ | 2 × Bilanci di Energia |
| Unità di trasformazione 1 input-1 output | numero unità = 1 | 1 × Mappa Caratteristica Equazioni Ausiliarie |
| Unità di trasformazione 1 input-2 output | numero unità = 1 | 2 × Mappe Caratteristiche Equazioni Ausiliarie |
| Unità di accumulo | numero unità = 1 | 1 × Bilancio di Energia 1 × Mappe Caratteristiche (analizzata nel paragrafo 5.2.2) Equazioni Ausiliarie |
| Nodi | $n_{nodi} = 1$ | 1 × Bilancio di Energia |

$$\text{Bilanci di Energia Sorgenti - Unità} \quad F_{s,out}(t) = F_{Pq,in}(t) + F_{Peq,in}(t) \quad (5.3)$$

$$(5.4)$$

Collegamenti

La modellazione dei collegamenti si è visto dipende dai nodi che sono presenti nel sistema, poiché i collegamenti diretti possono essere trascurati. Nel sistema si ha la presenza di un solo nodo $n_{nodi} = 1$. Il bilancio di energia per tale nodo è espresso dalla:

$$\text{Bilancio di Energia:} \quad Q_{Peq}(t) + Q_{Pq}(t) = Q_{Acc,in}(t) \quad (5.5)$$

Unità

Unità P_q

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input (n=1), 1 Flusso in output (m=1)

$$\text{Mappa caratteristica:} \quad F_{q,in}(t) = m_{Pq} \cdot Q_{Pq,out}(t) + q_{Pq} \cdot \delta_{Pq}(t) \quad (5.6)$$

$$\text{Equazioni Ausiliarie:} \quad Q_{Pq,min} \cdot \delta_{Pq}(t) \leq Q_{Pq,out}(t) \leq Q_{Pq,max} \cdot \delta_{Pq}(t) \quad (5.7)$$

$$n_{Pq}(t) \geq \delta_{Pq}(t+1) - \delta_{Pq}(t) \quad (5.8)$$

$$N_{Pq} = \sum_t n_{Pq}(t) \quad (5.9)$$

Si può notare come a differenza dei casi discussi in precedenza tra le equazioni che descrivono il funzionamento della caldaia si sono introdotte due equazioni ausiliarie 5.8 e 5.9. Esse sono utilizzate per calcolare il numero di accensioni della caldaia. Come si vedrà di seguito nella funzione obiettivo sarà presente un termine di costo per ogni accensione. La disequazione 5.8 permette di determinare una variabile $n_{Pq}(t)$ che identifica il cambio di stato da acceso a spento dell'unità P_q . L'equazione 5.9 permette di determinare il numero totale di accensione nel tempo $T = 24$ pari alla giornata. I parametri m_{Pq} e q_{Pq} utilizzati per descrivere la mappa caratteristica (espressa in figura 5.3a) assumono rispettivamente il valore di 0,921 e 0,329 [MW].

Unità P_{eq}

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input (n=1), 2 Flusso in output (m=2)

$$\text{Mappa caratteristica: } F_{P_{eq},in}(t) = m_{P_{eq}} \cdot E_{P_{eq},out}(t) + q_{P_{eq}} \cdot \delta_{P_{eq}}(t) \quad (5.10)$$

$$Q_{P_{eq},out}(t) = m1_{P_{eq}} \cdot E_{P_{eq},out}(t) + q1_{P_{eq}} \cdot \delta_{P_{eq}}(t) \quad (5.11)$$

$$\text{Equazioni Ausiliarie: } E_{P_{eq},min} \cdot \delta_{P_{eq}}(t) \leq E_{P_{eq},out}(t) \leq E_{P_{eq},max} \cdot \delta_{P_{eq}}(t) \quad (5.12)$$

In questo caso per descrivere le mappe caratteristiche (espresse in figura 5.2b e 5.2a) sono stati utilizzati i parametri $m_{P_{eq}} = 2,5$ e $q_{P_{eq}} = 1,33$ [MW] per la mappa 5.2b e $m1_{P_{eq}} = 0,875$ e $q1_{P_{eq}} = 1,1$ [MW] per la mappa 5.2a.

Unità di Accumulo

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input (n=1), 1 Flusso in output (m=1)

$$\text{Bilancio di energia: } U_{Acc}(t+1) - U_{Acc}(t) = Q_{Acc,in}(t) \cdot 1 - Q_{Acc,out}(t) \cdot 1 \quad (5.13)$$

$$\text{Equazioni Ausiliarie: } U_{Acc}(t) \leq U_{Acc,max} \quad (5.14)$$

Nell'equazione 5.13 si vede come il termine $\Delta t = 1$ h e il fatto di considerare la potenza costante all'interno di detto intervallo permetta di considerare le potenze al pari delle energie, ovviamente solo in termini di valori.

Problema di ottimizzazione

Definizione della funzione obiettivo

La taglia del sistema di accumulo termico viene determinata in accordo con l'obiettivo della massimizzazione del profitto nel periodo considerato (equazione 3.21) ed imponendo che l'energia termica totale generata dalle unità di trasformazione sia uguale alla totale richiesta di energia termica dell'utenza. Questo rappresenta il vincolo sull'energia che impone l'utenza, e che prende il posto del vincolo sulla potenza che caratterizza i sistemi in assenza di accumulo. Il profitto, include i ricavi derivati dalla vendita dell'energia elettrica e termica prodotte, il costo del consumo di combustibile e gli ammortamenti dei costi di investimento per l'acquisto delle unità P_{eq} e P_q e del sistema di accumulo termico e il termine di costo concentrato $c_{N,Pq}$ per ciascun avviamento dell'unità P_q . Questo costo concentrato può essere inteso come somma del costo di combustibile addizionale dovuto all'avviamento dell'unità e del costo addizionale di manutenzione dovuto alla sua gestione intermittente. All'interno della funzione obiettivo sono presenti alcuni termini costanti, cioè non influenzati da una variazione delle variabili di decisione che come visto nel paragrafo 3.1 non variano il punto di ottimo, ma solo il valore della funzione obiettivo in quel punto. Questi termini quindi possono essere trascurati dalla funzione obiettivo e sono: gli ammortamenti delle unità di trasformazione (poiché sia la taglia delle due unità che la quota di ammortamento specifica giornaliera è nota), e il profitto derivato dalla vendita di potenza termica (poiché sia il prezzo di vendita sia la potenza ceduta all'utenza sono dati del problema). In definitiva la funzione obiettivo sarà espressa dalla:

$$z = f(x) = \sum_{t=1}^{24} (E_{u,in}(t) \cdot p_{E,u,in}(t) \cdot 1 - F_{Pq,in}(t) \cdot c_{FPq,in}(t) \cdot 1 - F_{P_{eq},in}(t) \cdot c_{FP_{eq},in}(t) \cdot 1) - (U_{Acc,max} \cdot a_{Acc}) - c_{N,Pq} \cdot N_{Pq} \quad (5.15)$$

Dove, avendo posto un andamento discreto per i flussi di energia e avendo considerato l'intervallo di tempo Δt pari a un'ora, è stato possibile sostituire l'integrale in funzione del tempo con la sommatoria dei 24 intervalli temporali. Il valore del costo giornaliero specifico di ammortamento dell'unità di accumulo nel problema considerato ammonta a $0,06$ [€/giorno m^3] e il costo $c_{N,Pq}$ per ciascun avviamento della caldaia viene fissato pari a 6 [€/avviamento]. Il costo specifico di ammortamento deve essere espresso in termini di energia per come è stato inserito nella (5.13). Se si considera che un metro cubo d'acqua alla temperatura di 100°C con una temperatura di riferimento di 60°C possiede un'energia pari a $0,0465$ MWh il costo dell'ammortamento sarà pari a $1,29$ [€/MWh giorno]. La 5.15 è soggetta al vincolo che la totale energia termica prodotta in un giorno sia uguale alla totale richiesta, in formula:

$$\int_{\text{giorno}} (Q_{Pq,out}(t) + Q_{Peq,out}(t)) dt = \int_{\text{giorno}} Q_{u,in}(t) dt \quad (5.16)$$

$$\sum_{t=1}^{24} (Q_{Pq,out}(t) + Q_{Peq,out}(t)) dt = \sum_{t=1}^{24} Q_{u,in}(t) dt \quad (5.17)$$

I termini anche nella 5.16 sono espressi in termini di sommatoria al posto che in termini integrali 5.17 per delle considerazioni analoghe a quanto visto sopra.

Scelte delle variabili di decisione

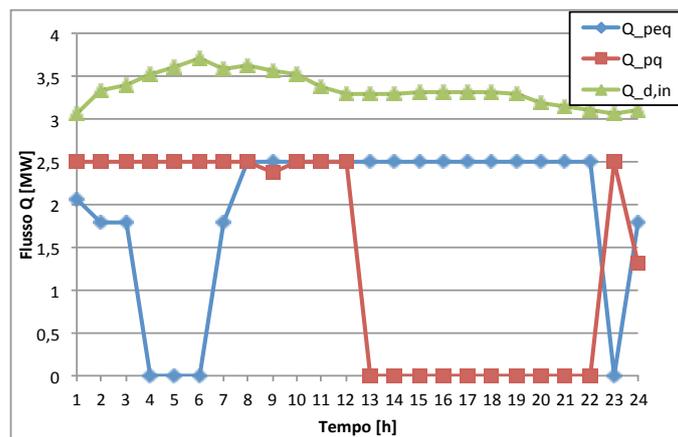
Le variabili di decisione del problema di ottimizzazione, definito dalla funzione obiettivo 5.15, sono i 48 ($24 + 24$) valori dei flussi di calore in uscita dalle unità di trasformazione $Q_{Pq,out}(t)$ e $Q_{Peq,out}(t)$, le variabili binarie che decretano l'accensione e spegnimento dell'impianto e una variabile che definisca la condizione iniziale e/o finale del serbatoio. Ciò deriva dalla volontà di considerare il giorno tipo e di conseguenza un andamento periodico delle grandezze di periodo pari a $T = 24$. Per permettere ciò è necessario imporre la condizione che l'energia posseduta dall'accumulo nell'istante iniziale e nell'istante finale sia la stessa. Si è ritenuto opportuno considerare il serbatoio inizialmente vuoto e quindi $U_{Acc}(1) = 0$. Sono stati scelti come variabili di decisioni i flussi Q in uscita dalle unità solo per una miglior comprensione dei risultati, infatti, si sarebbe potuti benissimo assumere i flussi in ingresso, in quanto vi è una relazione biunivoca che lega flussi in ingresso ai flussi in uscita.

In ultima analisi considerando l'interno problema di ottimizzazione e quindi: modello, funzione obiettivo e variabili di decisione si posso svolgere le seguenti considerazione. Il problema risulta di ottimizzazione vincolata per la presenza di vincoli identificati dal modello del sistema. Per due variabili di decisione è richiesto di determinare un set di valori nella variabile del tempo, inoltre la presenza del componente di accumulo fa intuire come sia necessario considerare il problema dinamico. Non è però possibile semplificare il problema mediante la programmazione dinamica a causa della non separabilità della funzione obiettivo. Si ha la presenza di due termini che dipendono dal funzionamento del sistema in tutti e 24 gli istanti temporali ($a_{Acc} \cdot U_{Acc,max}$) e ($c_{N,Pq} \cdot N_{Pq}$). La relazione espresse nel modello e la funzione obiettivo sono tutte lineari, e si ha la presenza di variabili binarie per considerare le accensioni e spegnimenti degli impianti. Per questo il problema di ottimizzazione sarà un problema *MILP* (*Mixed Integer Linear Programming*).

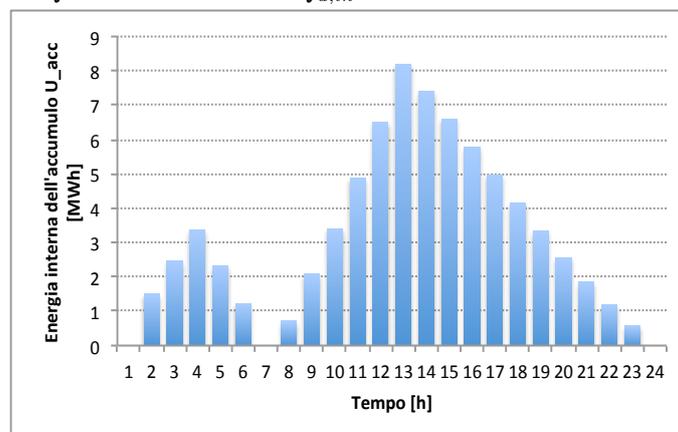
Risultati dell'ottimizzazione

Implementando il sistema nel software *GAMS*[®] utilizzando il solutore *CPLEX* si è stata

definita la taglia del sistema di accumulo U_{max} pari a 8,20 MWh oppure, considerando l'energia contenuta in un metro cubo d'acqua soggetto ad un ΔT di 40°C, in termini di volume 176,3 m^3 . Il profitto totale, valore della funzione obiettivo 5.15 presenta un valore negativo pari a -3242,66 €. Si può quindi facilmente capire come sia necessario considerare la vendita dell'energia termica all'utenza per ottenere un profitto positivo. La richiesta giornaliera complessiva dell'utenza termica è pari a 80,47 MWh che al prezzo di vendita di 107 €/MWh apporta un beneficio di 8610,29 € portando il profitto in attivo. In figura 5.6a sono riportati gli andamenti dei flussi di calore in uscita dalle unità di trasformazione. La presenza del sistema di accumulo permette di svincolare l'andamento delle unità dall'andamento dell'utenza. In particolare si nota come il funzionamento dell'unità cogenerativa sia fortemente influenzata dall'andamento del prezzo dell'energia elettrica. Si può inoltre osservare come la presenza del componente di accumulo permetta alla unità di funzionare per la gran parte del tempo in prossimità del carico massimo. La richiesta di energia termica è distribuita abbastanza equamente tra le due unità, infatti, per il 58% l'utenza viene soddisfatta dalla turbina a gas e per il resto 42% dalla caldaia. L'unità P_{eq} per il 70% del tempo in cui è in funzione lavora al carico nominale, tale percentuale si alza al 86% per l'unità P_q .



(a) Andamento giornaliero dei flussi $Q_{P_{eq},out}$, $Q_{P_q,out}$ e del flusso Q richiesto dall'utenza $Q_{u,in}$



(b) Andamento giornaliero della livello di energia all'interno del serbatoio di accumulo U_{Acc}

Figura 5.6: Risultati dell'ottimizzazione del sistema in figura 5.1

In figura 5.6b è riportato l'andamento dell'energia all'interno del serbatoio, si può notare come il picco massimo sia in corrispondenza delle ore 13. Il costo di installazione del componente di accumulo e il costo relativo al numero di avvii della caldaia rappresentano una quota marginale del profitto, dove la gran parte dei costi è connessa al consumo di combustibile. Questo fa supporre che in alcuni casi si può pensare di trascurarli qualora quest'ipotesi possa rendere l'analisi più semplice.

Si può notare inoltre come il funzionamento dell'unità P_{eq} sia in stretta relazione con l'andamento del prezzo di vendita dell'energia elettrica. Ciò dipende dal fatto che il processo di ottimizzazione può essere relazionato all'analisi dei costi di generazione dell'energia. In questo caso essendo entrambe le unità di trasformazione produttrici di flussi Q , si può analizzare il costo di generazione dell'energia elettrica. Il costo di una unità di energia termica generata dall'unità P_{eq} è determinato dal costo del combustibile consumato meno i proventi derivanti dalla vendita dell'energia elettrica (i proventi della vendita dell'energia termica non sono considerati essendo il loro prezzo unitario, in questa analisi, costante nel tempo). In formula matematica :

$$c_{MWh,P_{eq}}(t) = \frac{c_{F,P_{eq},in} \cdot F_{P_{eq},in}(t) \cdot 1 - p_{E,P_{eq},out}(t) \cdot E_{P_{eq},out}(t) \cdot 1}{Q_{P_{eq},out}(t) \cdot 1} \quad (5.18)$$

Si possono notare alcuni aspetti fondamentali:

- Il costo del MWh_t non è costante ma varia nel tempo in funzione dei valori dei flussi che interagiscono con l'unità e del valore del prezzo di vendita dell'energia elettrica.
- I flussi $F_{P_{eq},in}(t)$, $E_{P_{eq},out}(t)$ e $Q_{P_{eq},out}(t)$ sono legati tra loro da relazione univoche espresse dalle due mappe caratteristiche; perciò è possibile esprimere il costo del MWh_t in funzione di uno solo di questi flussi.

Dall'espressione 5.18 si può notare come a parità del valore dei flussi un prezzo di vendita dell'energia elettrica diverso porta ad un diverso costo di produzione dell'energia termica. Il costo di una unità di energia termica generata dall'unità P_q è invece determinato esclusivamente dal costo del combustibile consumato (anche in questo caso non sono considerati i proventi della vendita dell'energia termica). Il costo dell'unità di energia termica prodotta dall'unità P_q può essere espressa dalla:

$$c_{MWh,P_q}(t) = \frac{c_{F,P_q,in} \cdot F_{P_q,in}(t) \cdot 1}{Q_{P_q,out}(t) \cdot 1} \quad (5.19)$$

Dal confronto tra i due costi di generazione dell'energia termica (5.18 e 5.19) per ogni istante temporale è possibile determinare quale sia l'unità di trasformazione più adatta in termini economici alla produzione di energia termica. A vantaggio dell'unità P_q c'è sicuramente il fatto che essa presenta un rendimento maggiore rispetto all'unità P_{eq} . Ciò determina che, a parità di flusso di calore prodotto in uscita, il flusso di energia chimica in ingresso sia inferiore per l'unità P_q rispetto all'unità P_{eq} . Da parte sua l'unità P_{eq} presenta il vantaggio di poter ridurre il costo di generazione dell'energia termica grazie alla vendita dell'energia elettrica. Proprio quest'ultimo aspetto è quello che influenza maggiormente il funzionamento del sistema. In presenza di prezzi dell'energia elevati si sfrutterà maggiormente l'unità P_{eq} , viceversa quando il prezzo dell'energia diminuisce aumenta il costo di generazione dell'energia termica prodotta dall'unità P_{eq} e può risultare conveniente utilizzare l'unità P_q . In figura 5.6a sono riportati l'andamento di costi di generazione dell'energia

termica per le due unità al variare del flusso di energia termica prodotto. Con la linea nera di evidenza il costo di generazione per l'unità P_q , mentre in rosso il costo di generazione per l'unità P_{eq} . Questa è stata ricavata per diversi valori del prezzo di vendita dell'energia elettrica (da 50 a 85 con passo di 5). Si vede che la fascia di prezzo individuata dai valori 65-70 €/MWh determina un limite sopra il quale risulta più conveniente l'utilizzo dell'unità P_q mentre al di sotto del quale l'unità P_{eq} è economicamente favorevole.

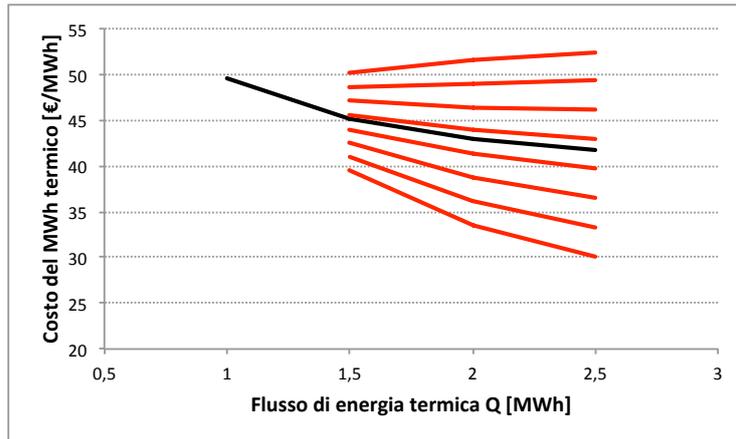


Figura 5.7: Costo del MWh_t per le diverse unità al variare del carico e del prezzo di vendita dell'energia elettrica

5.2.1 Criterio TSO-STO per la semplificazione dell'ottimizzazione dinamica

In questo paragrafo si utilizzerà il criterio TSO-STO (Two Step Optimization of STOrage) introdotto e studiato in [13], [14] per semplificare il problema di ottimizzazione visto nel paragrafo precedente in relazione alla non separabilità della funzione obiettivo. Il criterio TSO-STO consiste nel separare il problema dinamico in due problemi più semplici, in cui sia permesso l'utilizzo della programmazione dinamica. I due problemi devono essere risolti sequenzialmente e cioè il risultato del primo sottoproblema è utilizzato nel secondo. La decomposizione del problema di ottimizzazione sfrutta una considerazione fatta nel paragrafo 5.2. Il valore del costo giornaliero specifico di ammortamento del serbatoio di accumulo nel problema considerato ammonta a 0,06 [€/giorno m^3] e il costo di ogni avvio è pari a 6 €[69]. Si noti che questi valori sono di due ordini di grandezza inferiori rispetto agli altri termini inclusi nella funzione obiettivo 5.15, e quindi possono essere trascurati. Quindi il problema di ottimizzazione può essere decomposto in due sottoproblemi da risolversi separatamente:

- Il primo sottoproblema consiste nella ricerca della strategia di generazione di energia termica ($Q_{P_{eq},out}(t)$ e $Q_{P_q,out}(t)$) che massimizza il primo componente della 5.15:

$$z = f'(x) = \sum_{t=1}^{24} (E_{u,in}(t) \cdot p_{E,u,in}(t) \cdot 1 - F_{P_q,in}(t) \cdot c_{FP_q,in}(t) \cdot 1 - F_{P_{eq},in}(t) \cdot c_{FP_{eq},in}(t) \cdot 1) \quad (5.20)$$

Questa ricerca è eseguita indipendentemente dal risultante andamento di $U_{Acc}(t)$ (e quindi del risultante valore di $U_{Acc,max}$). Si noti che l'ottimo andamento della produzione $Q_{Pq,out}(t)$ dell'unità P_q ha due caratteristiche peculiari:

1. Mentre l'ottimo andamento della generazione $Q_{Pq,out}(t)$ è fortemente influenzato dalle variazioni temporali del prezzo di vendita dell'energia elettrica $p_{E,u,in}(t)$, la funzione obiettivo 5.20 non è sensibile a permutazioni temporali dell'andamento della generazione $Q_{Pq,out}(t)$. Quindi, per quanto riguarda l'unità P_q , la soluzione del primo sottoproblema di ottimizzazione consiste solamente nei 24 valori che descrivono la generazione termica senza un ordine temporale definito. Infatti, la definizione di un andamento preciso di $Q_{Pq,out}(t)$ ha significato solamente se viene considerato il Sistema di accumulo, in particolare la sua taglia $U_{Acc,max}$;
2. L'andamento della generazione $Q_{Pq,out}(t)$ può essere ricavato in modo diretto dall'andamento di $Q_{Pq,out}(t)$. Infatti, quando l'andamento di $Q_{Pq,out}(t)$ è noto lo è anche il suo integrale giornaliero (la totale energia elettrica generata dal CHP nell'intero periodo) e l'integrale giornaliero di $Q_{Pq,out}(t)$ può essere facilmente ricavato dalla 5.16 (essendo chiaramente noto l'integrale giornaliero della domanda $Q_{u,in}(t)$). Al fine di ottimizzare il funzionamento dell'unità P_q essa deve generare l'energia termica al minimo costo unitario. Questa condizione è ottenuta in condizioni di pieno carico che corrispondono alle condizioni di massimo rendimento η_{Pq} . Quindi, il carico dell'unità P_q in ogni intervallo di tempo (ora) può essere valutato cercando la massima efficienza media nell'intero giorno tipo.

In accordo con queste due caratteristiche, quindi, la generazione $Q_{Pq,out}(t)$ dell'unità P_q è dipendente. Di conseguenza le variabili di decisione del primo sottoproblema sono solamente i 24 valori che definiscono l'andamento dell'ottima generazione $Q_{Pq,out}(t)$ dell'unità P_{eq} e i rispettivi valori della variabile binaria;

- Il secondo sottoproblema consiste nella massimizzazione dei due termini rimanenti della funzione obiettivo 5.15. La funzione obiettivo di questo secondo sottoproblema è quindi:

$$z = f(x)'' = -(U_{Acc,max} \cdot a_{Acc}) - c_{N,Pq} \cdot N_{Pq} \quad (5.21)$$

per l'ottimo andamento della generazione $Q_{Pq,out}(t)$ dell'unità P_{eq} ottenuto risolvendo il primo sottoproblema. Due aspetti indipendenti sono coinvolti nella massimizzazione della 5.21:

1. L'andamento del contenuto di energia $U_{Acc}(t)$ dell'acqua all'interno del sistema di accumulo, che influenza la sua dimensione $U_{Acc,max}$ e quindi il suo costo $a_{Acc} \cdot U_{Acc,max}$;
2. La gestione dell'unità P_q , che definisce il numero N_{Pq} di avviamenti e, quindi, il costo totale giornaliero $c_{N,Pq} \cdot N_{Pq}$ di queste operazioni.

Le variabili di decisione di questo secondo sottoproblema di ottimizzazione sono le posizioni temporali dei 24 valori ottimi di $Q_{Pq,out}(t)$ ottenuti, come variabili dipendenti, risolvendo il primo sottoproblema, i 24 valori della variabile binaria $\delta_{Pq}(t)$ e, il valore iniziale dell'energia interna del sistema di accumulo.

La decomposizione genera due sottoproblemi di ottimizzazione di natura diversa rispetto al problema di ottimizzazione originario. Né il primo sottoproblema né il secondo sono problemi dinamici. Infatti, per quanto riguarda il primo sottoproblema, se venisse compiuta una permutazione dei dati tempovarianti ($Q_{u,in}(t)$ e $p_{E,u,in}(t)$), la stessa permutazione sarebbe riscontrata nella soluzione del primo sottoproblema (l'andamento di $Q_{P_{eq}}(t)$), e tale permutazione non influenzerebbe ovviamente i 24 valori ottimi di $Q_{P_{q,out}}(t)$ poiché il loro ordine temporale deve ancora essere valutato. Per quanto riguarda il secondo sottoproblema, nel quale viene cercata l'ottima posizione temporale dei 24 valori di $Q_{P_{q,out}}(t)$, esso ha semplicemente una natura compilatoria, essendo il profilo di $U_{Acc}(t)$ dipendenti solamente dall'andamento di $Q_{P_{q,out}}(t)$.

Primo Sottoproblema

Il primo sottoproblema viene risolto grazie al software GAMS® utilizzando il solutore CPLEX. L'obiettivo di questo primo sottoproblema è quello di individuare l'ottimo andamento del flusso $Q_{P_{eq,out}}(t)$ che sarà poi utilizzato come dato di input nel secondo problema. L'andamento di tale flusso è descritto in figura 5.8. Nella stessa figura è riportato anche

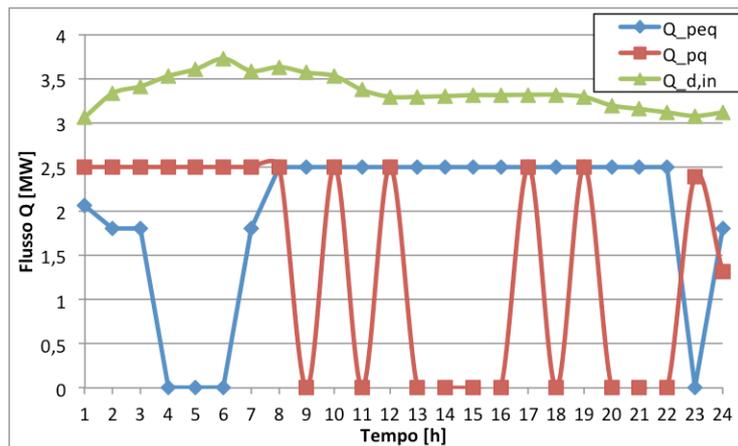


Figura 5.8: Andamento giornaliero dei flussi $Q_{P_{eq,out}}$, $Q_{P_{q,out}}$ e del flusso Q richiesto dall'utenza $Q_{u,in}$ risultante dal primo sottoproblema

l'andamento del flusso $Q_{P_{q,out}}(t)$. Si può subito osservare, confrontando con gli andamenti descritti in figura 5.6a, come l'andamento del sistema CHP sia uguale nei due casi mentre la caldaia presenta un andamento molto più intermittente nel caso ora in esame. Ciò è ovviamente connesso al fatto di non considerare nella funzione obiettivo il termine di costo relativo alle accensioni e spegnimenti della caldaia. Come per il caso precedente l'andamento del flusso di energia termica, e conseguentemente del flusso di energia elettrica $E_{P_{eq,out}}(t)$ è fortemente influenzato dalle variazioni del prezzo dell'energia elettrica. In queste condizioni la funzione obiettivo assume un valore pari a $f' = -3226,07$ €. Se si considerano le dimensioni dell'accumulo in questo caso si nota una riduzione della taglia ($U_{Acc,max} = 3,36$ [MWh]) rispetto all'ottimizzazione del problema completo. Ciò è in relazione al funzionamento intermittente della caldaia. Se con i dati ricavati da questo primo sottoproblema si andasse a calcolare il profitto espresso dalla 5.15 si ricaverebbe un valore pari a $-3260,41$ €, che è ovviamente minore di quello ricavato nel caso generale. Da questo problema si ricavano i 24 valori temporali del flusso $Q_{P_{q,out}}(t)$.

Secondo Sottoproblema

Il secondo Sottoproblema è stato implementato sempre nel software GAMS®. L'andamento temporale del flusso $Q_{P_{eq},out}(t)$ ricavato nel primo sottoproblema è posto come un dato di input per questo secondo sottoproblema. Si è visto come l'obbiettivo del secondo sottoproblema è quello di determinare l'ordine temporale dei 24 valori del flusso $Q_{P_q,out}(t)$ che massimizzano la funzione (5.16) (minimizzazione dei costi). In pratica i valori del flusso $Q_{P_q,out}(t)$ devono essere permutati per determinare l'ordine ottimale. Gestire le permutazioni con il software GAMS richiede un utilizzo massiccio di variabili binarie, il che porta ad un complicazione dell'analisi e quindi ad un allontanamento dagli obbiettivi del criterio TSO-STO. Per ovviare a questo problema si sono ipotizzate diverse strade basate su considerazioni di tipo ingegneristico.

La prima strada è stata quella di eseguire una semplice ottimizzazione della funzione obbiettivo (5.16). Non si è posto nessun vincolo sui valori che può assumere il flusso di energia termica prodotta dall'unità P_q , in pratica è stato lasciato all'ottimizzatore la scelta dei valori di $Q_{P_q,out}(t)$. Le variabili di decisione in questo caso sono rappresentate dal livello energetico nel serbatoio $U_{Acc}(t)$ (o analogamente la taglia $U_{Acc,max}$), la variabile binarie che determina l'accensione e lo spegnimento della caldaia e la variabile che fornisce l'impostazione delle condizioni iniziali. Questa strada ovviamente è errata poiché nella funzione 5.21 non è presente alcun termine che tenga in considerazione le prestazioni di tale unità. I valori così ricavati per il flusso in uscita dalla caldaia $Q_{P_q,out}(t)$ descritti in figura 5.9 sono completamente diversi da quelli ricavati nel primo sottoproblema. Il funzionamento è

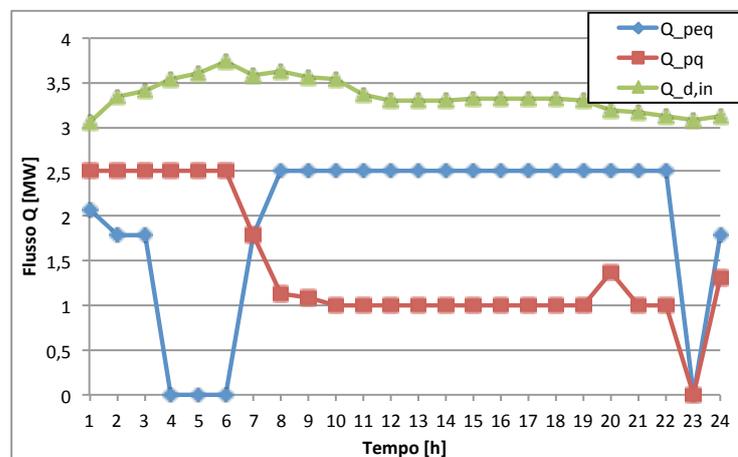


Figura 5.9: Andamento giornaliero dei flussi $Q_{P_{eq},out}$, $Q_{P_q,out}$ e del flusso Q richiesto dall'utenza $Q_{u,in}$ risultante dal secondo sottoproblema

più continuativo (derivato dalla minimizzazione del costo relativo al numero di avvii), ma l'unità si trova a lavorare per gran parte del tempo a carico ridotto e conseguentemente a rendimenti minori (o alternativamente con consumi specifici di combustibili maggiori). La funzione obbiettivo $f'' = -10,33 \text{ €}$ è minore (minor costi) rispetto al calcolo della stessa funzione f'' con i dati relativi al primo sottoproblema o al caso generale, ciò farebbe presupporre una soluzione migliore rispetto ai casi precedenti. Tuttavia se con i dati ricavati in questa strada si calcola il profitto totale 5.15 si nota un notevole peggioramento sia rispetto ai casi precedenti ($f = -3353,65 \text{ €}$). Ciò è ovviamente dovuto al maggior consumo di combustibile relativo al funzionamento a carico parziale dell'unità P_q . La seconda strada ipotizzata è stata quella di considera il termine relativo al consumo di combustibile

all'interno della funzione obiettivo f'' :

$$z = f'''(x) = \sum_{t=1}^{24} (-F_{Pq,in}(t) \cdot c_{FPq,in}(t) \cdot 1 - F_{Peq,in}(t) \cdot c_{FPeq,in}(t) \cdot 1) - (U_{Acc,max} \cdot a_{Acc}) - cN, Pq \cdot N_{Pq} \quad (5.22)$$

In questo caso i risultati ottenuti a seguito del processo di ottimizzazione sono gli stessi del caso generale, sia in termini di andamento dei flussi di energia, di contenuto energetico nel serbatoio e di dimensioni di quest'ultimo. Questa strada però porta a considerare una funzione obiettivo che non è più separabile, poiché si è introdotto il termine relativo al consumo di combustibile nel t-esimo istante. Anche questa strada quindi è stata scartata, poiché, se pur corretta, non consente di applicare il criterio TSO-STO.

La terza strada è partita dalle stesse considerazioni fatte nella prima in cui però si è inserito un vincolo che imponga all'unità P_q di operare in considerazioni prossime al valore nominale in tutti gli intervalli temporali tranne uno. Questa considerazione è nata dai risultati ricavati dal primo problema di ottimizzazione in cui si è potuto osservare che il funzionamento della caldaia fosse per il 93% a valori prossimi al valore nominale. In definitiva in questa strada si sono lasciati liberi i valori del flusso $Q_{Pq,out}(t)$, ma si è imposto un range di variazione possibile tra 2,3 – 2,5 MW per tutti gli intervalli eccetto l'ultimo, in cui si non sono stati imposti vincoli. Le variabili di decisione anche in questo caso sono l'energia contenuta nel serbatoio $U_{Acc}(t)$ e la variabile binaria relativa al funzionamento di P_q . I risultati del processo di ottimizzazioni sono analoghi a quelli ricavati nel paragrafo 5.2 per il caso generale. Dimensioni del sistema di accumulo, numero di avvii, andamento temporale dei flussi termici per le due unità di trasformazione e andamento temporale dell'energia contenuta all'interno dell'accumulo presentano valori uguali al caso generale. Di conseguenza anche il profitto globale z è pari a -3242,66€.

5.2.2 Perdite di energia del sistema d'accumulo

Come detto in precedenza negli esempi considerati nei paragrafi 5.2 e 5.2.1 il sistema di accumulo è stato assunto privo di perdite. In questo paragrafo si analizzerà lo stesso sistema in cui non saranno trascurati i fenomeni di perdita, e dove inoltre saranno imposti dei vincoli sulle massime variazioni di carico per il sistema CHP. Per non appesantire troppo la trattazione non verranno riproposte tutte le considerazioni svolte nel paragrafo 5.2 in merito alla configurazione del sistema, il modello matematico e il problema di ottimizzazione. Si analizzerà esclusivamente le variazioni che i fenomeni di perdita del sistema di accumulo e il vincolo sulla massima rampa di carico dell'unità Peq hanno sul modello del sistema e sui risultati dell'ottimizzazione.

Rampe di carico per l'unità Peq .

Nel paragrafo 2.3.2 sono state introdotte le rampe di carico e si è visto come il vincolo sulla massima variazione del carico per un generico flusso di energia A_i possa essere espresso dalla:

$$\frac{dA_{Pi}(t)}{dt} \leq \Delta A_{Pi,max} \quad (5.23)$$

Le rampe di carico come descritto in precedenza sono vincoli che impongono una caratteristica dinamica al problema. Si può vedere, infatti, come nella 5.23 sia presente un

termine differenziale in funzione del tempo che ha la caratteristica di legare tra loro i diversi istanti temporali. Questo in realtà non comportata grandi modifiche al tipo di problema analizzato, in quanto il problema era già stato considerato dinamico per la presenza del componente di accumulo.

In questo esempio si assume una massima variazione di carico per il flusso di energia elettrica E dell'unità P_{eq} pari a 0,2 [MW/h], pari cioè ad un quarto del range di funzionamento di tale unità. La 5.23 è espressa in termini differenziali del tempo per poter esprimere tale vincolo in termini discreti è necessario introdurre un'ulteriore variabile $E_{P_{eq}}(t)$ che rappresenta il valore istantaneo della potenza. Il vincolo quindi prenderà in considerazione tale variabile. Il flusso di energia elettrica $E_{P_{eq},out}(t)$ in questo caso rappresenta la potenza media nel periodo t e potrà essere calcolato relazione alla variabile $E_{P_{eq}}(t)$ tramite la:

$$E_{P_{eq},out}(t) = \frac{E_{P_{eq}}(t+1) - E_{P_{eq}}(t)}{2} \quad (5.24)$$

Mentre la 5.23 può essere espressa in termini discreti grazie alla:

$$|E_{P_{eq}}(t+1) - E_{P_{eq}}(t)| \leq \Delta E_{P_{eq},max} \cdot 1 \quad (5.25)$$

Dove il valore 1 rappresenta l'ampiezza dell'intervallo Δt , e deve essere espresso per conformità con le unità di misura usate. Avendo posto questa condizione si modifica il modello del sistema in quanto devono essere inserite le relazioni 5.23 e 5.25. In questo caso il numero delle variabili aumenta di un'unità a causa dell'introduzione della variabile $E_{P_{eq}}(t)$ ma si aumenta anche il numero delle equazioni, introduzione della 5.23. La modifica del modello del sistema è relativa all'unità P_{eq} , per cui nel seguito verrà osservata solo la parte di modello relativo a tale unità.

Unità P_{eq}

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input (n=1), 2 Flusso in output (m=2)

Mappa caratteristica: $F_{P_{eq},in}(t) = m_{P_{eq}} \cdot E_{P_{eq},out}(t) + q_{P_{eq}} \cdot \delta_{P_{eq}}(t) \quad (5.26)$

$$Q_{P_{eq},out}(t) = m_{1P_{eq}} \cdot E_{P_{eq},out}(t) + q_{1P_{eq}} \cdot \delta_{P_{eq}}(t) \quad (5.27)$$

Equazioni Ausiliarie: $E_{P_{eq},min} \cdot \delta_{P_{eq}}(t) \leq E_{P_{eq},out}(t) \leq E_{P_{eq},max} \cdot \delta_{P_{eq}}(t) \quad (5.28)$

$$E_{P_{eq},out}(t) = \frac{E_{P_{eq}}(t+1) - E_{P_{eq}}(t)}{2} \quad (5.29)$$

$$-\Delta E_{P_{eq},max} \cdot 1 \leq E_{P_{eq}}(t+1) - E_{P_{eq}}(t) \leq \Delta E_{P_{eq},max} \quad (5.30)$$

La 5.25 è stata espressa con la 5.30 poiché l'utilizzo dell'operatore valore assoluto rende il problema non lineare.

Perdite di energia per il sistema di accumulo

Nel paragrafo 4.5.1 si è analizzato la modellazione del componente di accumulo. Si è osservato come un componente di accumulo di flussi di energia sia descritto oltre che dal bilancio di energia anche da una mappa caratteristica che permette di determinare il valore del flusso di perdita. Il componente di accumulo visto in figura 5.1 sarà sostituito da quello descritto nella figura 5.10, in cui si è inserito anche il flusso di perdita.

Nel paragrafo 4.5.1 si è visto come la mappa caratteristica sia rappresentata da una relazione che lega il flusso di perdita all'energia contenuta all'interno dell'accumulo e alle condizioni al contorno.

$$U_{l,Acc}(t) = f(U_{Acc}(t), cc) \quad (5.31)$$

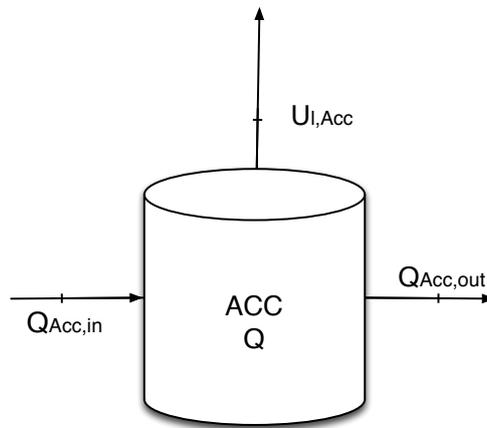


Figura 5.10: Unità di accumulo di flussi Q in presenza di perdite di energia $U_{l,Acc}$

Nel seguito si andrà ad analizzare brevemente come sia possibile ricavare una curva caratteristica per il particolare sistema di accumulo preso in esame in questo esempio. Il sistema di accumulo in questione è rappresentato da un serbatoio di acqua alla temperatura costante di 100°C in cui la variazione di energia interna è posta in relazione alla variazione della massa d'acqua in esso contenuta. In questo sistema le perdite di energia sono associate alle dispersioni termiche che si hanno a causa del gradiente termico presente tra l'acqua presente all'interno del serbatoio e l'aria che circonda l'esterno del serbatoio. Il calcolo della potenza termica persa può essere ricavato grazie alla relazione [70]:

$$\pi_p = K \cdot A \cdot \Delta T \quad (5.32)$$

In cui π_p rappresenta la potenza termica persa espressa in [W], K identifica il coefficiente di scambio globale [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]; A è la superficie del sistema di accumulo e $\Delta T = T_{int} - T_{amb}$ identifica il gradiente termico tra l'interno e l'esterno dell'accumulo. Per poter ricavare la mappa caratteristica vengono fatte alcune ipotesi semplificative:

- Si ipotizza che la T_{amb} si mantenga costante durante tutto il periodo dell'analisi e pari a 15°C . Questo comporta che il termine ΔT possa essere considerato costante e pari a 85 K .
- Si ipotizza che il coefficiente di scambio termico globale sia rappresentato esclusivamente dalla resistenza termica posta dallo strato di isolante termico. Questa ipotesi è stata assunta in vantaggio di sicurezza. Lo strato di isolante è composto da schiuma di poliuretano dello spessore di 2 cm che presenta una conduttività termica pari a $0,07\text{ W}/\text{mK}$ (fonte in excel). Di conseguenza il valore di K risulta pari a $3,5\text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.
- Si ipotizza che l'area di scambio sia proporzionale alla massa (o alternativamente volume) di acqua presente nel serbatoio. In [61] è stato ipotizzato che l'area di scambio sia pari a 6 volte il volume d'acqua contenuto nel serbatoio elevato alla $0,66$.

L'energia persa nell'intervallo Δt può dunque essere espressa tramite la:

$$U_{l,Acc}(t) = K \cdot A(t) \cdot \Delta T \cdot t \quad (5.33)$$

L'area $A(t)$ può essere calcolata come : $A(t) = 6 \cdot (V(t))^{0,66}$ e ricordando che l'energia contenuta in un metro cubo di acqua per questo sistema di accumulo è pari $0,0465 MWh/m^3$ è possibile ricavare l'andamento delle perdite in relazione all'energia contenuta nel serbatoio di accumulo. $U_{l,Acc}(t) = K \cdot 6 \cdot ((U_{Acc}(t))/0,0465)^{0,66} \cdot \Delta T \cdot 1$ con K espresso in MW/m^2K . Tale relazione presenta un andamento non lineare a causa dell'elevazione a potenza, ma in linea con le approssimazione fatte nel resto della trattazione è possibile approssimare tale andamento con una funzione lineare. In definitiva la mappa caratteristica per questo sistema può essere descritta dalla:

$$U_{l,Acc}(t) = m_{Acc} \cdot U_{Acc}(t) + q_{Acc} \quad (5.34)$$

in cui i termini m_{Acc} e q_{Acc} sono assunti rispettivamente pari a 0,0038 e 0,029 [MWh]. La mappa caratteristica è visibile in figura 5.11.

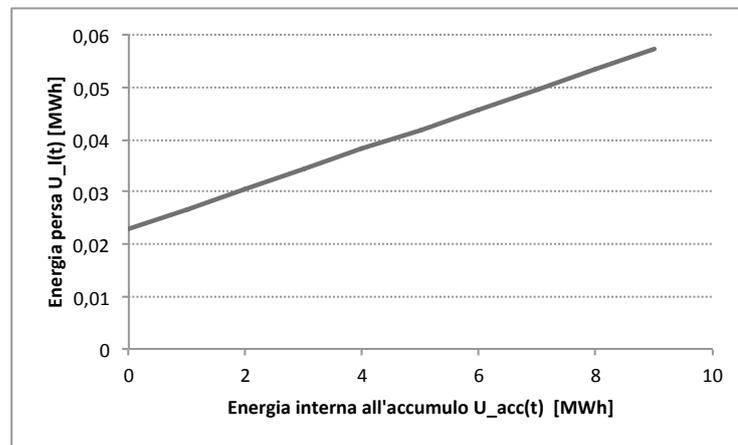


Figura 5.11: Mappa caratteristica per il sistema di accumulo di flussi Q

Le perdite connesse a questo sistema di accumulo sono molto basse, ciò è dovuto al buon isolamento di tale sistema e soprattutto al basso gradiente termico. L'efficienza media dell'accumulo presenta valori del 97%. Se ora si passa al modello del sistema si vede come sia necessario inserire la 5.34 tra le relazioni che descrivono il componente di accumulo. Inoltre la variabile $U_{l,Acc}(t)$ dovrà essere inserito all'interno del bilancio di energia. In particolar modo la modellazione del componente di accumulo sarà:

Unità di Accumulo

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input ($n=1$), 1 Flusso in output ($m=1$)

$$\text{Bilancio di energia: } U_{Acc}(t + 1) - U_{Acc}(t) = Q_{Acc,in}(t) \cdot 1 - Q_{Acc,out}(t) \quad (5.35)$$

$$\text{Mappa caratteristica : } U_{l,Acc}(t) = m_{Acc} \cdot U_{Acc}(t) + q_{Acc} \quad (5.36)$$

$$\text{Equazioni Ausiliarie: } U_{Acc}(t) \leq U_{Acc,max} \quad (5.37)$$

La definizione del problema di ottimizzazione non subisce variazioni rispetto al caso analizzato nel paragrafo 5.2. Si utilizzerà la stessa funzione obiettivo 5.15 e le stesse variabili di decisione. Pur essendo aumentato il numero delle variabili del problema, (a seguito dell'introduzione delle variabile per descrivere le rampe di carico e i fenomeni di perdita) il numero delle variabili indipendenti non è aumentato in relazione al contestuale aumento del numero di equazioni. L'unica differenza riscontrabile si ha nella variazione del vincolo 5.16

e 5.17. In esso deve essere inserito il termini di perdita per rendere valida l'uguaglianza.

$$\sum_{t=1}^{24} (Q_{Pq,out}(t) + Q_{Peq,out}(t))dt = \sum_{t=1}^{24} (Q_{u,in}(t)dt \cdot 1 + U_{l,Acc}(t)) \quad (5.38)$$

In questo caso non sono stati espressi i termini $\Delta t = 1$.

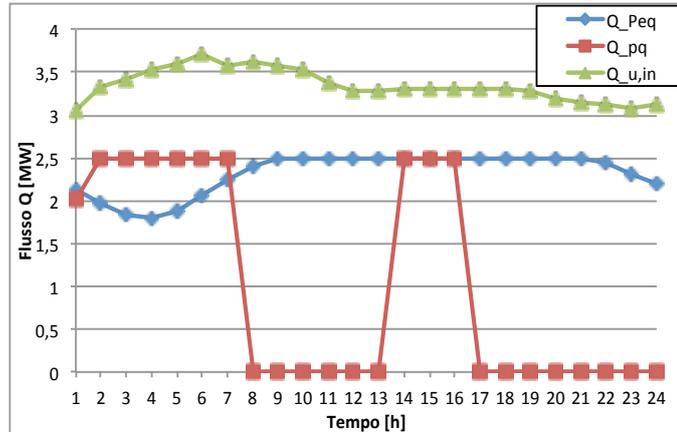
Risultati

Il problema è stato implementato in GAMS ed è stato utilizzato il solutore CPLEX. La soluzione ottimale in questo caso presenta un sistema di accumulo di taglia minore rispetto al caso analizzato nel paragrafo 5.2, infatti, $U_{max} = 6,47$ MWh, in termini di volume $139 m^3$. Il profitto totale, valore della funzione obiettivo 5.15 presenta un valore negativo pari a $-3337,73$ €. In figura 5.12a sono riportati gli andamenti dei flussi di calore in uscita dalle unità di trasformazione. Si può notare rispetto al caso precedente come il funzionamento dell'unità Peq riesca a seguire meno le variazioni del prezzo dell'energia elettrica. Ciò è dovuto al vincolo imposto sulle massime rampe di carico. L'unità Peq a differenza del caso precedente ha un funzionamento più continuativo; questo fa sì che il soddisfacimento dell'utenza avvenga per circa il 70% con l'utilizzo dell'energia prodotta da tale unità. L'unità Pq in questo esempio viene sfruttata meno rispetto al caso precedente, infatti, si ha un fattore di carico del 45,8% contro il 58% del caso precedente.

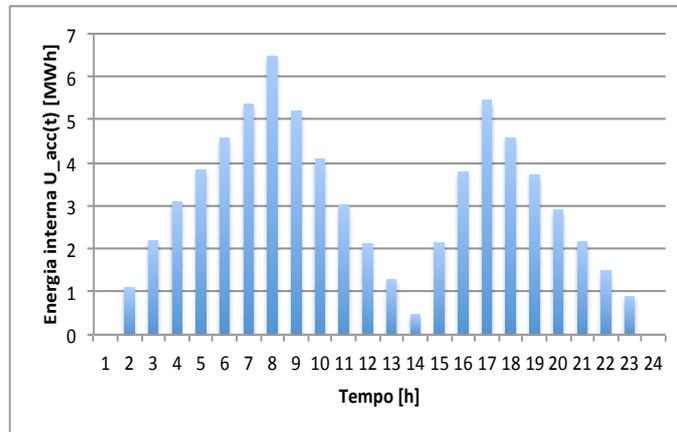
Questo è una diretta conseguenza del fatto che venga sfruttata maggiormente l'unità Peq e che debba essere rispettato il vincolo 5.16. Sempre considerando tale vincolo si può osservare che l'energia prodotta complessivamente dal sistema nel giorno tipo (81,23 MWh) sia superiore all'energia richiesta dall'utenza (80,47 MWh) per il fatto di dover compensare l'energia persa nel serbatoio di accumulo (0,76 MWh). Si nota come l'energia persa sia di due ordini di grandezza inferiore all'energia complessivamente prodotta dal sistema. Questo come già detto in precedenza è dovuto al fatto di avere gradienti termici relativamente bassi e un buono strato d'isolante. L'andamento dell'energia all'interno del serbatoio presenta l'andamento visibile in figura 5.12b. Si può osservare dal confronto con la figura 5.6b che l'andamento dell'energia all'interno del sistema di accumulo sia molto diverso. Questo è spiegabile dal diverso funzionamento che presentano le unità nei due casi. In definitiva si vede tra gli aspetti introdotti in questo paragrafo quello che influenza maggiormente il funzionamento del sistema di conversione sia rappresentato dal vincolo imposto sulle rampe di carico.

5.3 Ottimizzazione completa di un sistema di conversione che soddisfa un'utenza termica

Il secondo esempio presentato prende in considerazione l'ottimizzazione completa di un sistema di conversione adibito al soddisfacimento di un'utenza termica di riscaldamento di un complesso di edifici durante un anno. L'utenza è stata concepita come la ripetizione di cinque giorni tipici suddivisi in intervalli di un'ora. Come per l'esempio precedente anche in questo caso è possibile esprimere tutti i flussi di energia e tutte le grandezze come una successione di intervalli finiti di ampiezza pari a un'ora in cui considerare il valore del flusso o della grandezza costante. Come descritto nel paragrafo 3.3 un problema di ottimizzazione completa considera tutti i tre livelli tipici dell'ottimizzazione di sistemi (sintesi, progetto, e funzionamento). Gli scopi di questa analisi, infatti sono quelli di:



(a) Andamento giornaliero dei flussi $Q_{P_{eq,out}}$, $Q_{Pq,out}$ e del flusso Q richiesto dall'utenza $Q_{u,in}$



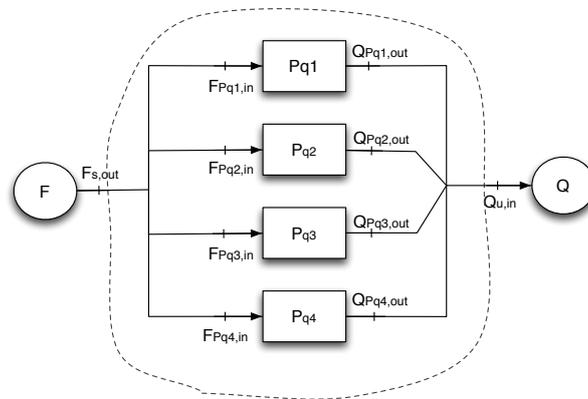
(b) Andamento giornaliero della livello di energia all'interno del serbatoio di accumulo U_{Acc}

Figura 5.12: Risultati dell'ottimizzazione del sistema in figura 5.1 con fenomeni di perdita e vincolo sulla massima rampa di carico

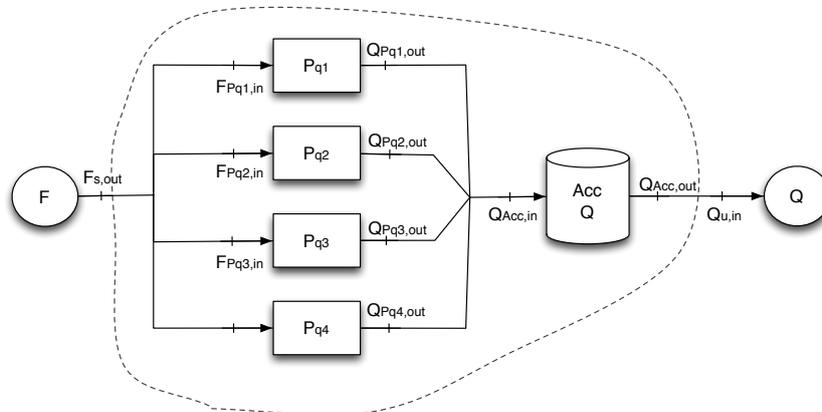
- Determinare la topologia del sistema di conversione, cioè scegliere tra un set di diversi componenti quelli che devono far parte del sistema e come devono essere connessi tra loro.
- Determinare la taglia che questi componenti devono possedere.
- Determinare il funzionamento di ogni componente in relazione alle richieste espresse dall'utenza.

In questa sezione verranno prese in considerazioni due possibili casi. Nel paragrafo 5.3.1 sarà analizzato un sistema in cui l'utenza termica possa essere soddisfatta mediante l'uso di caldaie a gas scelte da un opportuno set, formato da quattro caldaie. Nel paragrafo 5.3.2 sarà analizzato un sistema che presenta le stesse caratteristiche in termini di utenza, sorgenti e unità di trasformazione del caso descritto in 5.3.1, ma con la possibilità di utilizzare un sistema di accumulo per immagazzinare i flussi termici prima di inviarli all'utenza stessa. In figura 5.13a è mostrata la configurazione del sistema analizzato nel paragrafo 5.3.1. Si può vedere come sia presente un'unica utenza, richiesta di flussi Q e un'unica

sorgente, flussi di energia chimica cumulabile F_s, in . Si sono riportate, in figura, tutte le possibili caldaie che possono far parte sistema, sarà l'ottimizzatore in seguito a decretare la configurazione finale di tutto il sistema. In figura 5.13b è invece riportata la configurazione per il sistema analizzato nel paragrafo 5.3.2. Il sistema è molto simile a quello in figura 5.13a, dove però si può evidenziare la presenza del sistema di accumulo. In questo caso si vede che l'unità di accumulo può essere alimentata da tutti i flussi Q prodotti dalle diverse unità di trasformazione, mentre in uscita è collegata direttamente con l'utenza termica. Come per il caso precedente sarà l'ottimizzatore a decidere quali unità di trasformazione faranno parte del sistema e conseguentemente quali collegamenti con il sistema di accumulo considerare.



(a) Schema generale del sistema in assenza di accumulo

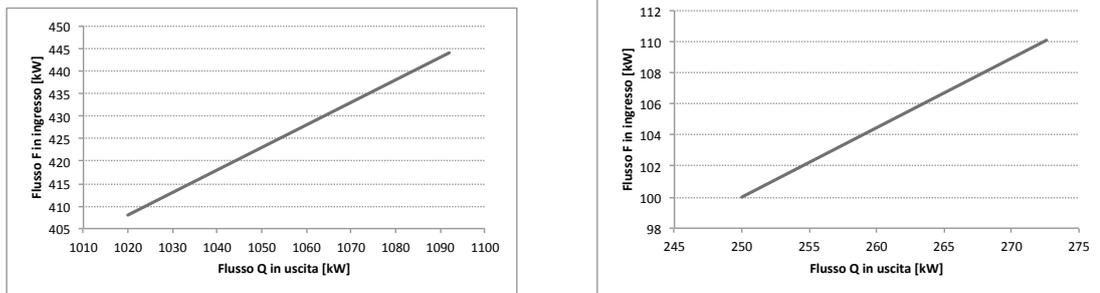


(b) Schema generale del sistema in presenza di accumulo

Figura 5.13: Schema con tutte le possibili unità e interazioni del sistema di conversione adibito al soddisfacimento di un'utenza termica

Nel seguito si andranno a descrivere brevemente le principali caratteristiche delle caldaie (unità P_q) che determinano il set delle possibili scelte. Nel set sono riscontrabili due diverse tipologie di caldaie. Tali tipologie si differenziano per il range di potenza entro cui la taglia (espressa in termini di flusso termico massimo $Q_{Pq,max}$) può variare. Inoltre le due tipologie si contraddistinguono anche per una serie di altri aspetti quali rendimenti (nominali e ai carichi parziali) e costi d'installazione che variano al variare di tale range. All'interno del set sono presenti due unità P_q per ogni tipologia, ognuna di queste unità sarà dimensionata nei limiti imposti dal range di taglie tipico per la tipologia di apparte-

enza. La tipologia 1 identifica una caldaia pressurizzata REX K F in acciaio con focolare a inversione di fiamma completamente bagnato (fonte). La potenza nominale di ciascuna delle due unità appartenenti a questa tipologia può variare da un valore massimo di 1200 kW ad un valore minimo 950 kW. L'unità ha la possibilità di lavorare fino al raggiungimento del 40% del carico nominale, al di sotto di tale soglia la caldaia deve essere spenta. Così se dal processo di ottimizzazione si è ricavato una taglia ottima ($Q_{Pqi,max}$) pari a 1000 kW la potenza minima sfruttabile è pari a $Q_{Pqi,min} = 400$ kW. Per ciò che concerne il rendimento si fa l'ipotesi che all'interno della stessa tipologia il rendimento nominale e i rendimenti ai carichi parziali siano indipendenti dalla taglia. Tale ipotesi può essere ritenuta valida sia in relazione agli intervalli relativamente piccoli entro cui la potenza nominale può variare, ma soprattutto in riferimento al fatto che anche nella realtà la taglia di una caldaia non influisce molto sul valore del rendimento. Il rendimento termico al carico nominale per questa tipologia è pari a 0,934 mentre al carico minimo è pari al 0,910. In figura 5.14a è rappresentata la mappa caratteristica che identifica un'unità appartenente alla tipologia 1 ($Q_{Pi1,max} = 1020$ kW). Si è fatto l'ipotesi di poter descrivere il funzionamento dell'unità



(a) Mappa caratteristica linearizzata per un'unità appartenente alla tipologia 1 (b) Mappa caratteristica linearizzata per un'unità appartenente alla tipologia 2

Figura 5.14: Mappa caratteristiche per due unità appartenenti alla tipologia 1 e 2

con una mappa lineare. L'ottimizzazione che si andrà ad effettuare ha come obiettivo la minimizzazione dei costi. Per questo motivo è necessario introdurre i costi relativi all'acquisto dell'unità. La tipologia 1 presenta un costo di acquisto specifico pari a $c_{s,Pqi} = 8,95$ €/kW. Nella funzione obiettivo il termine di costo dovrà essere espresso come costo di ammortamento specifico annuo. Si è ipotizzato quindi di assumere un tempo di ammortamento dell'investimento pari a $n = 20$ anni e un tasso periodico di interesse $I = 0,1$. Con queste ipotesi e ricordando la formula introdotta nel paragrafo 3.5 si può calcolare il costo di ammortamento specifico annuo come:

$$a_{Pi} = c_{s,Pqi} \cdot \frac{I + (I + 1)^n}{(I + 1)^n - 1} = 0,533 \quad [\text{euro}/kW\text{anno}] \quad (5.39)$$

La tipologia 2 identifica sempre una caldaia pressurizzata in acciaio ma di tipo REX che presenta prestazioni inferiori rispetto alla precedente. La potenza nominale di ciascuna delle due unità appartenenti a questa tipologia può variare da un valore massimo di 300 kW ad un valore minimo 200 kW. Come per la tipologia 1 anche queste unità hanno la possibilità di lavorare fino al 40% del carico nominale. Per ciò che riguarda i rendimenti si fa la stessa ipotesi assunta nel caso precedente di considerarli indipendenti dalla taglia. I rendimenti sono leggermente inferiori al caso precedente; il rendimento al carico nominale è pari a 0,917, mentre al carico minimo assume un valore di 0,904. In figura 5.14b è

rappresentata la mappa caratteristica che identifica il funzionamento di un'ipotetica unità appartenente alla tipologia 2 ($Q_{Pi2,max} = 250$ kW). In termini economici l'acquisto dell'unità 2 presenta un costo specifico di $c_{s,Pqi2} = 13,44$ €/kW. Da questo si può passare al costo di ammortamento specifico annuo, sfruttando la 5.39, e quindi $a_{Pi2} = 0,801$ [€/ kW anno].

Oltre alle unità di trasformazione, nel paragrafo 5.3.1, si analizzerà un sistema di accumulo. Tale sistema rappresenta un serbatoio di accumulo di acqua calda in pressione simile a quello analizzato nell'esempio descritto nel paragrafo 5.2. Il serbatoio è isolato mediante uno strato di schiuma di poliuretano dello spessore di 2 cm, che presenta una conduttività termica pari a 0,07 W/mK (fonte in excel). Di conseguenza il valore di K risulta pari a $3,5$ W/m²K. Il costo specifico di ammortamento annuo è pari a $a_{Acc} = 0,3708$ [€/kWh anno]. Per ciò che riguarda l'utenza si è visto che è identificata da una richiesta di flussi di energia termica Q variabile nel tempo. L'andamento di tale richiesta è descritta nella figura 5.15a. Come detto in precedenza l'utenza annuale è stata assunta come una ripetizione continua dell'andamento dei cinque giorni descritti in figura. In figura 5.15b è rappresentata la curva di durata dell'utenza su base annuale¹. Si riesce facilmente ad osservare come l'utenza sia stata scelta ad hoc per presentare un andamento a "gradoni". La massima richiesta è presente per circa 730 ore all'anno e assume valori nell'intorno di 1600 kWh. Il secondo gradino rappresenta una richiesta oraria di circa 1050 kWh ed ha un ampiezza di 4015 ore, pari circa al 45,8% della durata dell'intero annuo. L'ultimo gradino identifica il periodo di minor richiesta e si attesta su valori orari nell'intorno di 250 kWh. Tale richiesta è fatta per 4015 ore in un anno (45,8%). In questo caso non è previsto un prezzo di vendita dei flussi all'utenza.

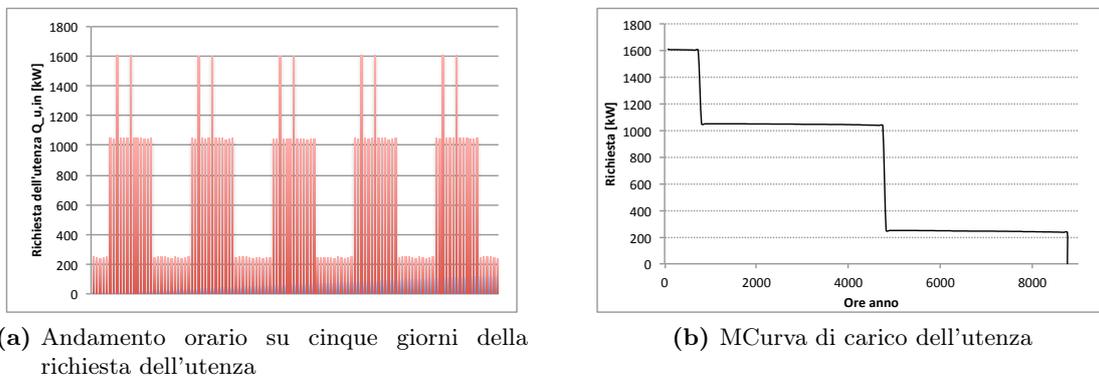


Figura 5.15: Andamento orario e curva di carico dell'utenza

L'unica sorgente presente identifica un flusso di energia accumulabile $F_{s,out}(t)$ che rappresenta una portata di gas naturale in ingresso al sistema. Tale portata di gas alimenta, almeno nella configurazione generale, alimenta tutte e quattro le caldaie. In fase di ottimizzazione verranno ricavati i collegamenti effettivamente attivi. Il gas naturale presenta un potere calorifero pari a 50 [MJ] e un costo di 0,55 [€/kg]. Questo permette di ricavare un costo per il flusso di combustibile pari a $c_F = 39,6$ [€/MWh].

¹**Curva di durata** è una curva che riporta in ascissa la durata annua, espressa in ore, per la quale il carico si mantiene maggiore o uguale al valore indicato in ordinata

5.3.1 Configurazione senza il sistema d'accumulo

In questo paragrafo si analizzerà l'ottimizzazione completa del sistema evidenziato in figura 5.13a. Per far questo sarà seguito lo schema logico che caratterizza tutto questo lavoro di tesi e già presentato anche nel paragrafo 5.2 in merito al primo esempio. Si descriverà prima il modello del sistema, sempre seguendo i precetti introdotti nel capitolo 2, successivamente si presenterà il problema di ottimizzazione e infine i risultati dell'ottimizzazione. Come si era facilmente intuito in questa analisi sono trattati esclusivamente flussi di energia. Non sono stati espressi i flussi di massa associati a tali flussi in relazione alle ipotesi fatte in questa tesi. Non sono presenti nemmeno relazioni che identificano parametri di stato motivo per cui si è certi che nel modello non saranno presenti relazioni tra tali parametri.

Modello del sistema

Come visto nel paragrafo 5.2 la determinazione del modello di un sistema e quindi del numero e della tipologia di equazioni che lo compongono è direttamente collegata alla configurazione del sistema di conversione e alle sue interazioni con le sorgenti e con le utenze. Nella tabella 5.2 vengono riassunte il numero e la tipologia delle equazioni necessarie che saranno descritte nel seguito. Dalla figura 5.13a si può vedere come non siano stati considerati i flussi di perdita nelle unità di trasformazione. Questo è stato fatto poiché ai fini di questa analisi essi i flussi di perdita non hanno influenza sul modello o sul problema di ottimizzazione. Ciò implica che non sia richiesto il bilancio di energia per le unità di trasformazione.

Tabella 5.2: Tabella riassuntiva del numero e della tipologia di equazioni necessarie per il modello del sistema di conversione descritto in figura 5.13a

| | Numero di interazioni o unità | Tipologia di Equazioni |
|---|-------------------------------|---|
| Interazioni Sorgenti-Unità | $n_s = 1$ | 1 × Bilanci di Energia |
| Interazioni Unità-Utenza | $n_u = 1$ | 1 × Bilanci di Energia |
| Unità di trasformazione 1 input-1 output | numero unità = 4 | 4 × Mappe Caratteristiche Equazioni Ausiliarie |
| Nodi | $n_{modi} = 0$ | 0 × Bilancio di Energia |

Interazioni ambiente-sistema.

Si può facilmente vedere come i flussi che rappresentano le interazione tra ambiente e sistema siano 1 sul lato delle utenze e 1 sul lato sorgenti e perciò sono richieste 1 equazioni di bilancio del tipo 2.6 e 1 equazioni del tipo 2.4.

$$\text{Bilanci di Energia Unità - Utenze } Q_{Pq1,out}(t) + Q_{Pq2,out}(t) + Q_{Pq3,out}(t) + Q_{Pq4,out}(t) = Q_{u,in}(t) \quad (5.40)$$

$$\text{Bilanci di Energia Sorgenti - Unità } F_{s,out}(t) = F_{Pq1,in}(t) + F_{Pq2,in}(t) + F_{Pq3,in}(t) + F_{Pq4,in}(t) \quad (5.41)$$

Collegamenti

Non sono presenti nodi all'interno del sistema per cui questa sezione non richiede nessun equazione.

Unità di trasformazione

In questo esempio non sono stati considerati i flussi di perdita per le unità di trasformazione. Questo è stato fatto poiché ai fini di questa analisi i flussi di perdita non hanno influenza sul modello o sul problema di ottimizzazione. Con queste premesse si può capire come per determinare il funzionamento delle unità di trasformazione sia richiesto esclusivamente la definizione delle mappe caratteristiche. Prima di mostrare la modellazione delle unità di trasformazione si ritiene doveroso fare una precisazione. Si è detto nell'introduzione a questo esempio come sia possibile considerare il rendimento nominale e l'andamento dei rendimenti ai carichi parziali indipendente dalla taglia per le unità che appartengono alla stessa tipologia. Questo fatto implica una modifica nell'espressione matematica della mappa caratteristica della generica unità. Si ricorda che la generica mappa caratteristica linearizzata per un'unità ad un ingresso (flusso di energia accumulabile $F_{P_i,in}(t)$) e un'uscita ($Q_{P_i,out}(t)$) può essere definita come:

$$F_{P_i,in}(t) = m_{P_i} \cdot Q_{P_i,out}(t) + q_{P_i} \cdot \delta_{P_i} \quad (5.42)$$

Da questa è possibile ricavare l'espressione del rendimento termico:

$$\eta_t(t) = \frac{Q_{P_i,out}(t)}{F_{P_i,in}(t)} = \frac{Q_{P_i,out}(t)}{m_{P_i} \cdot Q_{P_i,out}(t) + q_{P_i}} = \frac{x(t) \cdot Q_{P_i,max}}{m_{P_i} \cdot x(t) \cdot Q_{P_i,max} + q_{P_i}} \quad (5.43)$$

Dove si è espresso il termine $x(t)$ come rapporto tra il carico e il carico nominale. Per considerare il rendimento indipendente dalla taglia è necessario che nella 5.43 non sia presente il termine $Q_{P_i,max}$. Per risolvere questo problema nel seguito si introdurrà il parametro adimensionale d_{P_i} , che è posto in relazione con il parametro q [W] tramite la:

$$d_{P_i} \cdot Q_{P_i,max} = q_{P_i} \quad (5.44)$$

Considerare il rendimento indipendente dalla taglia per una detta tipologia significa considerare per quella tipologia i parametri m e d uguali per tutte le unità. Se si combinano l'espressione 5.44 con la 5.43 si ricava un andamento del rendimento termico indipendente dalla taglia ($Q_{P_i,max}$) come si può vedere dalla :

$$\eta_t(t) = \frac{Q_{P_i,out}(t)}{F_{P_i,in}(t)} = \frac{x(t) \cdot Q_{P_i,max}}{m_{P_i} \cdot x(t) \cdot Q_{P_i,max} + d_{P_i} \cdot Q_{P_i,max}} = \frac{x(t)}{m_{P_i} \cdot x(t) + d_{P_i}} \quad (5.45)$$

Di conseguenza la generica mappa caratteristica sarà espressa dalla :

$$F_{P_i,in}(t) = m_{P_i} \cdot Q_{P_i,out}(t) + d_{P_i} \cdot Q_{P_i,max} \cdot \delta_{P_i} \quad (5.46)$$

Nella tabella sotto sono riportati i principali parametri per entrambe le tipologie. Con questi accorgimenti il modello delle unità di trasformazione può essere descritto con le seguenti relazioni.

Unità P_{q1}

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input ($n=1$), 1 Flusso in output ($m=1$)

$$\begin{aligned} \text{Mappa caratteristica:} & \quad F_{q1,in}(t) = m_{1,Pq1} \cdot Q_{Pq1,out}(t) + d_{1,Pq1} \cdot Q_{Pq1,max} \cdot \delta_{Pq1}(t) \\ \text{Equazioni Ausiliarie:} & \quad 0,4 \cdot Q_{Pq1,min} \cdot \delta_{Pq1}(t) \leq Q_{Pq1,out}(t) \leq Q_{Pq1,max} \cdot \delta_{Pq1}(t) \end{aligned} \quad (5.49)$$

Tabella 5.3: Tabella riassuntiva dei parametri caratteristici per la tipologia di caldaia 1 e per la tipologia 2

| Tipologia | Range di Taglie | η_n | $\eta_{P=0,4P_{max}}$ | Parametri curva caratteristica | |
|-----------|-----------------|----------|-----------------------|--------------------------------|--------|
| | [kW] | | | m | d |
| 1 | 1200-950 | 0,934 | 0,910 | 1,0586 | 0,0121 |
| 2 | 300-200 | 0,917 | 0,903 | 1,0837 | 0,0067 |

Unità P_{q2}

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input (n=1), 1 Flusso in output (m=1)

Mappa caratteristica: $F_{q2,in}(t) = m_{2,Pq2} \cdot Q_{Pq2,out}(t) + d_{2,Pq2} \cdot Q_{Pq2,max} \cdot \delta_{Pq2}(t)$ (5.50)
 Equazioni Ausiliarie: $0,4 \cdot Q_{Pq2,min} \cdot \delta_{Pq2}(t) \leq Q_{Pq2,out}(t) \leq Q_{Pq2,max} \cdot \delta_{Pq2}(t)$ (5.51)
(5.52)

Unità P_{q3}

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input (n=1), 1 Flusso in output (m=1)

Mappa caratteristica: $F_{q3,in}(t) = m_{2,Pq3} \cdot Q_{Pq3,out}(t) + d_{2,Pq3} \cdot Q_{Pq3,max} \cdot \delta_{Pq3}(t)$ (5.53)
 Equazioni Ausiliarie: $0,4 \cdot Q_{Pq3,min} \cdot \delta_{Pq3}(t) \leq Q_{Pq3,out}(t) \leq Q_{Pq3,max} \cdot \delta_{Pq3}(t)$ (5.54)
(5.55)

Unità P_{q4}

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input (n=1), 1 Flusso in output (m=1)

Mappa caratteristica: $F_{q4,in}(t) = m_{1,Pq4} \cdot Q_{Pq4,out}(t) + d_{1,Pq4} \cdot Q_{Pq4,max} \cdot \delta_{Pq4}(t)$ (5.56)
 Equazioni Ausiliarie: $0,4 \cdot Q_{Pq4,min} \cdot \delta_{Pq4}(t) \leq Q_{Pq4,out}(t) \leq Q_{Pq4,max} \cdot \delta_{Pq4}(t)$ (5.57)
(5.58)

Dove il termine 0,4 identifica il minimo carico possibile per ciascuna unità. I parametri $m_{1,Pqi}$ e $q_{1,Pqi}$ sono utilizzati per descrivere le curve caratteristiche della tipologia 1, mentre $m_{1,Pqi}$ e $q_{1,Pqi}$ sono utilizzati per la tipologia 2.

Problema di ottimizzazione

Definizione della funzione obiettivo

L'obbiettivo del problema di ottimizzazione è determinare quali unità devono essere utilizzate per il soddisfacimento dell'utenza: la tipologia di appartenenza, la taglia che devono possedere, e il loro funzionamento nell'arco dell'anno. Il criterio con cui determinare la soluzione ottima è stato identificato nella minimizzazione del costo di installazione e gestione del sistema. Tale costo può essere quindi facilmente distinto in due quote:

- Una quota annuale relativa alle spese fisse, che deriva dal numero, la tipologia e la taglia dell'unità.
- Una quota oraria relativa ai costi di funzionamento, cioè al consumo orario di combustibile del sistema.

La funzione di costo (obbiettivo) è espressa dalla :

$$z = f(x) = 73 \cdot \sum_{t=1}^{120} (F_{s,out}(t) \cdot c_{F_{s,out}}(t) \cdot 1) + \\ - (Q_{Pq1,max} \cdot a_{Pq1}) - (Q_{Pq2,max} \cdot a_{Pq2}) - (Q_{Pq3,max} \cdot a_{Pq3}) - (Q_{Pq4,max} \cdot a_{Pq4}) \quad (5.59)$$

La 5.59 al pari della 5.15 descritta nell'esempio precedente è stata espressa in termini discreti in intervalli di tempo Δt pari ad un ora. La quota oraria è identificata dal termine compreso nella funzione sommatória, e rappresenta il costo totale dovuto all'acquisto del combustibile dalla sorgente. La sommatória tiene in considerazione le 120 ore che delineano i 5 giorni tipici assunti. Il numero 73 identifica il numero di periodi di 5 giorni presente in un anno. Il flusso di energia in uscita dalle sorgenti $F_{s,out}$ può essere anche espresso tramite la 5.41 come somma dei flussi in ingresso alle quattro unità. Se dal processo di ottimizzazione si ricaverà che una determinata unità non debba essere considerata all'interno del sistema, il flusso di combustibile in ingresso a tale unità non sarà considerato nella funzione obiettivo. La quota annuale, che è identificata dai restanti termini della 5.59, rappresenta i costi di ammortamento delle unità di trasformazione. Qualora dal processo di ottimizzazione risultasse che una specifica unità non faccia parte del sistema il termine di ammortamento relativo scomparirebbe.

Scelta delle variabili di decisione

Nel problema di ottimizzazione completa del sistema di conversione, come visto nel paragrafo 3.5, una scelta opportuna delle variabili di decisione è identificata:

- Dai 480 valori delle variabili binarie δ_{Pqi} che definiscono l'accensione/spegnimento e la presenza/assenza, della i -esima unità P_q . Utili all'ottimizzazione di funzionamento e sintesi del sistema
- Dai 4 valori delle variabili $(Q_{Pqi,max})$ che definiscono il valore massimo per il flusso in uscita e quindi la taglia (carico massimo) di ciascun unità. Utili per l'ottimizzazione di progetto e di sintesi del sistema.
- Dai 480 valori delle variabili $Q_{Pqi,out}(t)$ che definiscono i flussi di energia che collegano i vari componenti del sistema all'utenza. Ovviamente in relazione al modello che descrive il sistema non sarà necessario assumere tutti i flussi come variabili di decisione. Tali flussi, infatti, come visto nel modello sono legati da relazioni biunivoche con i flussi in ingresso all'unità, per cui sarà possibile scegliere alternativamente i flussi in ingresso come variabili di decisione.

In ultima analisi considerando l'interno problema di ottimizzazione e quindi: modello, funzione obiettivo e variabili di decisione si possono svolgere le seguenti considerazioni. Il problema risulta di ottimizzazione vincolata per la presenza di vincoli identificati dal modello del sistema. Il problema prevede di determinare un set di valori per le otto variabili di decisioni in funzione del tempo, ciò farebbe pensare ad un problema dinamico. In realtà non vi sono particolari componenti o vincoli che leghino uno specifico istante temporale ai precedenti o ai successivi. Il problema può essere considerato come quasi stazionario, cioè come una successione temporale di stati stazionari. Non tutte le relazioni espresse nel modello sono lineari. Le mappe caratteristiche che descrivono il comportamento delle

unità di trasformazione pur presentando un andamento lineare non possono essere considerate lineari a causa del prodotto tra due variabili di decisione (la variabile binaria e la variabile che determina la taglia). Inoltre tale prodotto è anche presente nelle relazioni che decretano il range di operatività dell'unità. Questo porta a dover trattare il problema come non lineare. Per evitare di utilizzare la programmazione non lineare è possibile sfruttare la tecnica di Glover che permette di linearizzare equazioni e disequazioni che includono variabili binarie.

Formulazione generale della tecnica di Glover

Si considerino una generica variabile w e una variabile binaria δ relazionate tra loro mediante le condizioni:

$$U_0 \geq w \geq L_0 \quad \text{quando} \quad \delta = 0 \quad (5.60)$$

$$U_1 \geq w \geq L_1 \quad \text{quando} \quad \delta = 1 \quad (5.61)$$

Un modo per modellare le relazioni 5.60 e 5.61 tra w e δ è mediante le seguenti due disequazioni:

$$U_0 + (U_1 - U_0) \cdot \delta \geq w \geq L_0 + (L_1 - L_0) \cdot \delta \quad (5.62)$$

Se le U e le L dipendono da altre variabili del problema, cioè non sono costanti, i termini $(U_1 - U_0) \cdot \delta$ e $(L_1 - L_0) \cdot \delta$ nella 5.62 sono non lineari. Per trattare questi "prodotti incrociati" senza inserire nuove variabili, ma introducendo solamente nuovi vincoli, si identificano le costanti $\overline{U}_0, \underline{U}_0, \overline{U}_1, \underline{U}_1, \overline{L}_0, \underline{L}_0, \overline{L}_1, \underline{L}_1$ tali che:

$$\overline{U}_0 \geq U_0 \geq \underline{U}_0, \quad \overline{U}_1 \geq U_1 \geq \underline{U}_1, \quad \overline{L}_0 \geq L_0 \geq \underline{L}_0, \quad \overline{L}_1 \geq L_1 \geq \underline{L}_1 \quad (5.63)$$

dove la sottolineatura e la linea superiore indicano, rispettivamente, i limiti inferiori e superiori delle U e delle L . Quindi, la relazione iniziale 5.62 può essere sostituita dalle seguenti quattro disequazioni:

$$U_0 + (\overline{U}_1 - \underline{U}_0) \cdot \delta \geq w \geq L_0 + (\underline{L}_1 - \overline{L}_0) \cdot \delta \quad (5.64)$$

$$U_1 + (\overline{U}_0 - \underline{U}_1) \cdot (1 - \delta) \geq w \geq L_1 + (\underline{L}_0 - \overline{L}_1) \cdot (1 - \delta) \quad (5.65)$$

Quando $\delta = 0$ la prima delle 5.64 diventa: $U_0 \geq w \geq L_0$ come desiderato, mentre la seconda, dopo riordino dei termini, diventa:

$$U_0 + (\overline{U}_1 - \underline{U}_1) \geq w \geq L_0 + (\underline{L}_1 - \overline{L}_1) \quad (5.66)$$

che è ridondante rispetto alla prima essendo $\overline{U}_0 \geq \underline{U}_0$ e $\overline{L}_0 \geq \underline{L}_0$. Analogamente, quando $\delta = 1$ la prima della 5.64 diventa ridondante, mentre la seconda diventa:

$$U_1 \geq w \geq L_1 \quad (5.67)$$

Applicazione della tecnica di Glover alle mappe caratteristiche delle unità

Di seguito sarà descritto come linearizzare le relazioni relative alla mappa caratteristica dell'unità P_{q1} e al relativo campo di funzionamento. Ovviamente sarà necessario eseguire tale operazione anche sulle relazioni relative alle altre mappe. Le relazioni non lineari sono la 5.47 e la 5.48:

$$F_{q1,in}(t) = m_{1,Pq1} \cdot Q_{Pq1,out}(t) + d_{1,Pq1} \cdot Q_{Pq1,max} \cdot \delta_{Pq1}(t) \quad (5.68)$$

$$0,4 \cdot Q_{Pq1,min} \cdot \delta_{Pq1}(t) \leq Q_{Pq1,out}(t) \leq Q_{Pq1,max} \cdot \delta_{Pq1}(t) \quad (5.69)$$

$$(5.70)$$

Per la 5.47 si applicherà la tecnica di Glover esclusivamente al termine $d_{1,Pq} \cdot Q_{Pq1,max} \cdot \delta_{Pq1}(t)$. che può essere espresso dalla: $q_{1,Pq} = d_{1,Pq} \cdot Q_{Pq1,max} \cdot \delta_{Pq1}(t)$.

$$\begin{aligned} \underline{U}_0 \cdot \delta(t) &\geq q_{1,Pq}(t) \geq \overline{L}_0 \cdot \delta(t) & (5.71) \\ d_{1,Pq} \cdot Q_{Pq1,max} + (-\underline{U}_1) \cdot (1 - \delta(t)) &\geq q_{1,Pq}(t) \geq d_{1,Pq} \cdot Q_{Pq1,max} + (-\overline{L}_1) \cdot (1 - \delta(t)) & (5.72) \end{aligned}$$

La 5.48 può essere risolta:

$$\begin{aligned} \underline{U}_0 \cdot \delta(t) &\geq Q_{Pq1,out}(t) \geq \overline{L}_0 \cdot \delta(t) & (5.73) \\ 0,4 \cdot Q_{Pq1,max} + (-\underline{U}_1) \cdot (1 - \delta(t)) &\geq Q_{Pq1,out}(t) \geq Q_{Pq1,max} + (-\overline{L}_1) \cdot (1 - \delta(t)) & (5.74) \end{aligned}$$

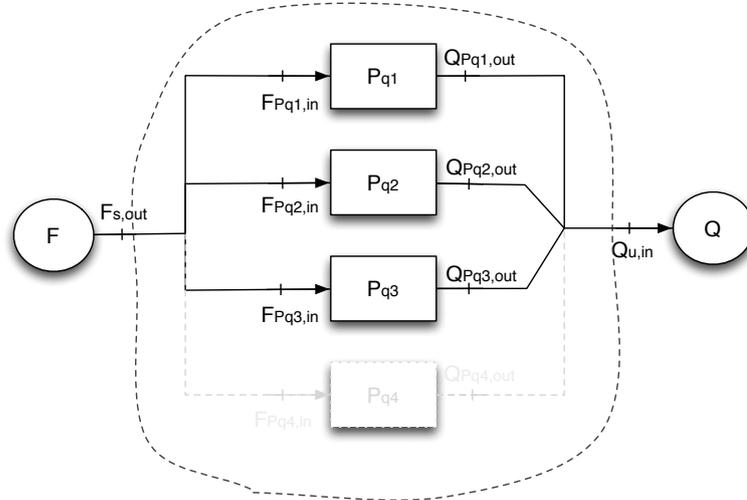
Tramite questi accorgimenti è possibile considerare il problema come un problema di ottimizzazione Lineare misto interno. (Mixed Interg Linear Programming)

Risultati

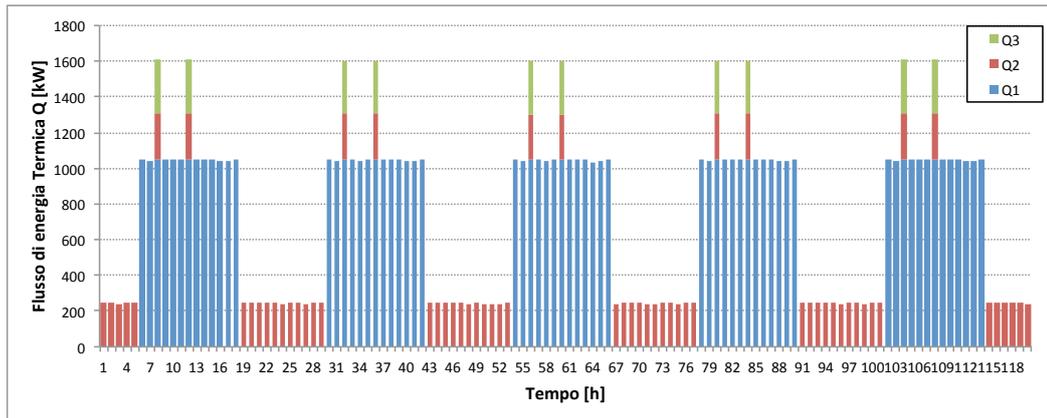
Implementando il sistema nel software GAMS utilizzando il solutore CPLEX si è potuto risolvere il problema arrivando a decretare che per soddisfare l'utenza termica al minimo costo siano necessarie tre unità P_q : due appartenenti alla tipologia 2, quindi di taglia minore e una appartenete alla tipologia 1. Il sistema definitivo assume quindi la configurazione presentata in figura 5.16a che risolve il problema della sintesi del sistema. Le taglie delle tre unità sono $Q_{Pq1,max} = 1050$ kW, $Q_{Pq2,max} = 256$ kW, $Q_{Pq3,max} = 300$ kW, queste rappresentano la risoluzione dell'ottimizzazione del design del sistema. L'ottimizzazione del funzionamento delle tre unità è descritto in figura 5.16b.

Si può osservare come l'utenza sia soddisfatta nei periodi di minor richiesta dall'unità P_{q2} , nei periodi di richiesta media dall'unità P_{q1} , mentre nei periodi di picco sia soddisfatta da tutte e tre le unità. Questo fatto risulta ancora più palese se si osserva il funzionamento delle tre unità in relazione alla curva di durata figura 5.16c. Si vede come l'unità P_{q3} venga utilizzata solo per un breve periodo dell'anno, le 730 ore del picco. Le altre due unità invece presentano un funzionamento maggiore; entrambe, infatti lavorano per 4015 ore anno. Tutte e tre le unità lavorano per gran parte del tempo in cui sono in funzione al carico nominale o a valori prossimi a tale carico. In termini economici il costo totale annuale del sistema è $f(x) = 271556$ € e considerando che l'utenza richiede annualmente un'energia pari a 6356 MWh può essere visto come un costo medio del MWh termico di 42,7 €/MWh. Se nella funzione di costo si vanno ad analizzare la quota relativa ai costi di installazione e la quota relativa ai costi di funzionamento si nota come quest'ultimi rappresenti la gran parte del costo totale. Infatti, i costi annuali fissi assumono un valore pari a 1005 € mentre il funzionamento del sistema ha un costo di 270560 €, in pratica il 99% del costo totale. Se si analizza il costo del kWh prodotto dalle due unità, si nota che la tipologia 1, (come è ovvio aspettarsi) presenta un costo, se pur di poco inferiore rispetto alla tipologia 2 (0,0422 contro il 0,0432). Inoltre gli alti rendimenti che tali unità presentano ai carichi parziali potrebbe far supporre una configurazione con solo due unità della tipologia 1. Tale configurazione non è però permessa in quanto non esistono due valori di taglia per la tipologia uno che consentono il soddisfacimento di tutti i valori dell'utenza, in particolar modo quando l'utenza richiede il valore minimo del flusso. I risultati sono influenzati fortemente dai parametri di costo scelti nell'analisi, e dai valori dei flussi richiesti dall'utenza. Eseguendo simulazioni con dati leggermente diversi come la configurazione del sistema possa variare anche notevolmente, soprattutto in relazione alla tipologia e taglia delle unità presenti. Questo può essere spiegato in funzione di

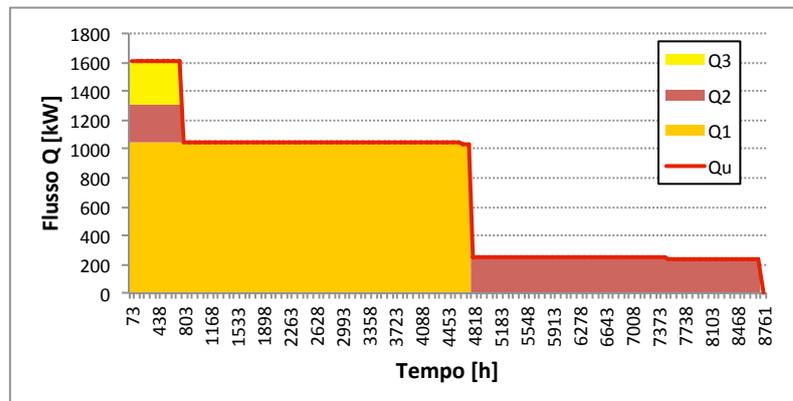
5.3 Ottimizzazione completa di un sistema di conversione che soddisfa un'utenza termica 173



(a) Configurazione del sistema di conversione a seguito del processo di ottimizzazione



(b) Andamento temporale dei flussi prodotti dalle diverse unità



(c) Curva di carico dell'utenza e del sistema di conversione

Figura 5.16: Risultati del processo di ottimizzazione

diversi fattori: un costo basso di acquisto delle unità e conseguentemente un'influenza bassa della taglia sulla funzione di costo, rendimenti elevati sia ai carichi nominali che parziali e molto simili tra le due tipologie che non permettono di stabilire facilmente quale delle due tipologie sia più performante.

5.3.2 Configurazione con il sistema d'accumulo

In questo paragrafo si analizzerà il sistema descritto in figura 5.13b. Si cercherà di dimostrare come un componente di accumulo permetta in fase di sintesi e di design di diminuire la potenza installata di un sistema di conversione, ed inoltre come la conversione dei flussi non debba essere più contestuale alla richiesta di flussi da parte dell'utenza. Essendo, però tale sistema molto simile a quello descritto nel paragrafo 5.3.1, e non volendo appesantire troppo la trattazione si considererà solamente le differenze che il sistema di accumulo porta in fase di modellazione e di ottimizzazione. Ovviamente anche per questo problema si suppongono valide tutte le ipotesi svolte in precedenza in riferimento all'esclusione di flussi di massa e variabili di stato e in relazione alla discretizzazione temporale delle grandezze.

Modello del sistema

Nella tabella 5.4 vengono riassunte il numero e la tipologia delle equazioni necessarie che saranno descritte nel seguito. Dalla figura 5.13b si può vedere come rispetto al caso precedente sia presenta un'unità in più, l'unità di accumulo, e come si viene a creare un nodo nel sistema in relazione al collegamento tra le varie unità di trasformazione e il serbatoio di accumulo.

Tabella 5.4: Tabella riassuntiva del numero e della tipologia di equazioni necessarie per il modello del sistema di conversione descritto in figura 5.13b

| | Numero di interazioni o unità | Tipologia di Equazioni |
|---|-------------------------------|---|
| Interazioni Sorgenti-Unità | $n_s = 1$ | 1 × Bilanci di Energia |
| Interazioni Unità-Utenza | $n_u = 1$ | 1 × Bilanci di Energia |
| Unità di trasformazione 1 input-1 output | numero unità = 4 | 4 × Mappe Caratteristiche Equazioni Ausiliarie |
| Unità di accumulo 1 input-1 output | numero unità = 1 | 1 × Bilancio di Energia 1 × Mappa Caratteristica Equazioni Ausiliarie |
| Nodi | $n_{nodi} = 1$ | 1 × Bilancio di Energia |

Interazioni ambiente-sistema.

La posizione dell'accumulo modifica le interazioni tra ambiente e sistema. In questo caso l'utenza sarà collegata direttamente al sistema di accumulo e non più alle unità di trasformazione. Ciò implica che la 5.40 sia sostituita dalla.

$$\text{Bilanci di Energia Unità - Utenze} \quad Q_{Acc,out}(t) = Q_{u,in}(t) \quad (5.75)$$

$$\text{Bilanci di Energia Sorgenti - Unità} \quad F_{s,out}(t) = F_{Pq1,in}(t) + F_{Pq2,in}(t) + F_{Pq3,in}(t) + F_{Pq4,in}(t) \quad (5.76)$$

Collegamenti

L'introduzione dell'unità di accumulo ha introdotto un nodo nel sistema, e di conseguenza la necessità di includere nel modello del sistema un bilancio di flussi di energia per descriverlo:

$$\text{Bilancio di Energia: } Q_{Pq1,out}(t) + Q_{Pq2,out}(t) + Q_{Pq3,out}(t) + Q_{Pq4,out}(t) = Q_{Acc,in}(t) \quad (5.77)$$

Unità di Trasformazione

Le unità di trasformazione sono le stesse del caso precedente, per cui non si attestano modifiche nel modello del sistema. È bene ricordare però che, come per il caso precedente, le mappe caratteristiche e i range di funzionamento sia opportuno esprimerle in forma linearizzata sfruttando la tecnica di Glover, per poter considerare il problema lineare.

Unità di Accumulo

Numero di flussi connessi all'unità: 1 Flusso in input (n=1), 1 Flusso in output (m=1)

$$\text{Bilancio di Energia: } U_{Acc}(t+1) - U_{Acc}(t) = Q_{Acc,in}(t) - Q_{Acc,out}(t) - U_{l,Acc}(t) \quad (5.78)$$

$$\text{Mappa caratteristica: } U_{l,Acc}(t) = m_{Acc} \cdot U_{Acc}(t) + q_{Acc} \quad (5.79)$$

$$\text{Equazioni Ausiliarie: } U_{Acc}(t) \leq U_{Acc,max} \quad (5.80)$$

Dove i parametri m_{Acc} e q_{Acc} che descrivono la mappa caratteristica sono pari a 0,0038 e 0,029 [kWh]. La variabile $U_{l,Acc}$ identifica l'energia persa nell'istante t di ampiezza $\Delta t = 1$. Anche in questo caso si è ipotizzato di considerare tale termine dipendente dall'energia contenuta all'interno del serbatoio.

Problema di ottimizzazione

Definizione della funzione obiettivo

L'obbiettivo del problema di ottimizzazione, in questo caso è sempre determinare quali unità devono essere utilizzate per il soddisfacimento dell'utenza, ma si richiede inoltre di determinare le dimensioni dell'accumulo. Il criterio con cui determinare la soluzione ottima è identificato sempre dalla minimizzazione del costo di installazione e gestione del sistema. La presenza del componente di accumulo e la conseguente ottimizzazione della taglia sono considerati nella quota annuale relativa alle spese fisse. Così la funzione obbiettivo espressa dalla 5.59 sarà modificata con la:

$$z = f(x) = 73 \cdot \sum_{t=1}^{120} (F_{s,out}(t) \cdot c_{F_{s,out}}(t) \cdot 1) - (Q_{Pq1,max} \cdot a_{Pq1}) + \\ - (Q_{Pq2,max} \cdot a_{Pq2}) - (Q_{Pq3,max} \cdot a_{Pq3}) - (Q_{Pq4,max} \cdot a_{Pq4}) - (U_{Acc,max} \cdot a_{Acc}) \quad (5.81)$$

Come per il problema introdotto nel paragrafo 5.2 è necessario imporre la condizione che l'energia prodotta nel tempo dell'analisi sia pari all'energia richiesta dall'utenza. Questa condizione rappresenta il passaggio dal vincolo di potenza espresso nel problema precedente al vincolo sull'energia che è connesso all'utilizzo di un sistema di accumulo.

$$\sum_{t=1}^{120} (Q_{Pq1,out}(t) + Q_{Pq2,out}(t) + Q_{Pq3,out}(t) + Q_{Pq4,out}(t)) dt = \sum_{t=1}^{102} (Q_{u,in}(t) - U_{l,Acc}(t)) dt$$

(5.82)

I termini nella 5.82 sono espressi in termini di sommatoria invece che in termini integrali in relazione alla discretizzazione dell'andamento dei flussi.

Scelta delle variabili di decisione

Nel problema di ottimizzazione completa del sistema di conversione, una scelta opportuna delle variabili di decisione considera sicuramente le variabili viste nel paragrafo 5.3.1 e quindi:

- Le variabili binarie δ_{Pqi} che definiscono l'accensione/spengimento e la presenza/assenza, della i -esima unità Pq .
- Le variabili ($Q_{Pqi,max}$) che definiscono il valore massimo per il flusso in uscita e quindi la taglia (carico massimo) di ciascun unità.
- Le variabili $Q_{Pqi,out}(t)$ che definiscono i flussi di energia che collegano i vari componenti del sistema all'accumulo.

A queste variabili vanno poi aggiunte le variabili relative al componente di accumulo. Cioè la massima energia contenuta all'interno del sistema di accumulo $U_{Acc,max}$; una variabile che definisce la condizione iniziale del serbatoio (in questo caso assunta pari a zero).

In ultima analisi considerando l'interno problema di ottimizzazione e quindi: modello, funzione obiettivo e variabili di decisione si possono svolgere le seguenti considerazioni. Il problema risulta di ottimizzazione vincolata per la presenza di vincoli identificati dal modello del sistema. A differenza del caso precedente in cui il problema poteva essere considerato come una successione temporale di stati stazionari in questo caso ciò non è permesso per la presenza del componente di accumulo. Si è visto precedentemente nell'analisi come un componente di accumulo legghi un particolare istante temporale agli istanti precedenti a agli istanti successivi. Questo fenomeno espresso dalla relazione 5.78 è un tipico fattore che caratterizza i problemi dinamici. Come si vedrà nei risultati il fatto di considerare il problema dinamico aumenta notevolmente lo sforzo computazionale in particolar modo nei tempi richiesti per ricavare la soluzione ottima.

L'utilizzo della tecnica di Glover anche in questo problema permette di considerare tutte le equazioni del modello e la funzione obiettivo come lineari. Il problema può essere quindi trattato come un problema di programmazione lineare mista intera. (MILP).

Risultati

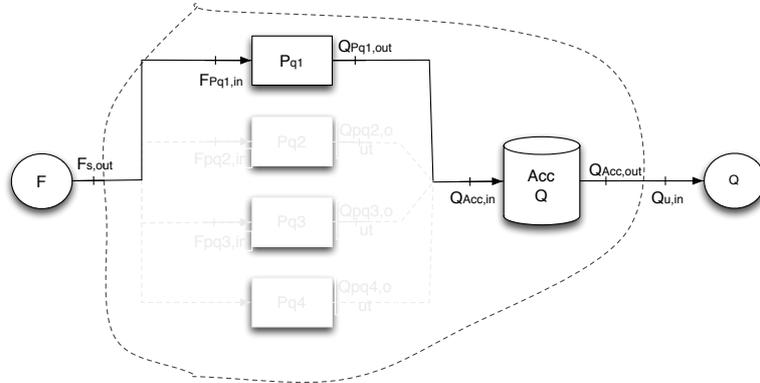
Come per il caso precedente l'implementazione del sistema è stata fatta utilizzando il software GAMS, e sfruttando come solutore l'algoritmo CPLEX. I risultati dell'ottimizzazione sono sostanzialmente diversi dal caso precedente. Il problema di sintesi è risolto determinando l'utilizzo di un'unica unità appartenente alla tipologia 1 (Fig. 5.13b). Il problema di design porta ad identificare una taglia per l'unità di trasformazione pari a 1100 kW e per il sistema di accumulo di 995 kWh. Il funzionamento del sistema durante i cinque giorni tipici è descritto in figura 5.17b. Nella figura è riportato l'andamento del flusso $Q_{Pq1,out}(t)$, l'andamento del flusso richiesto dall'utenza e l'andamento dell'energia contenuta all'interno del serbatoio di accumulo. Si può subito fare una prima osservazione, si nota già come l'andamento del flusso richiesto dall'utenza non abbia lo stesso andamento del flusso prodotto dall'unità di conversione. Questo fatto è spiegato dalla presenza del componente di accumulo che permette di svincolare temporalmente la fase di produzione dalla fase di

cessione all'utenza. L'unità P_{q1} lavora per la gran parte del tempo nell'intorno del carico massimo, durante il funzionamento il carico non scende mai al di sotto del 90% del carico nominale.

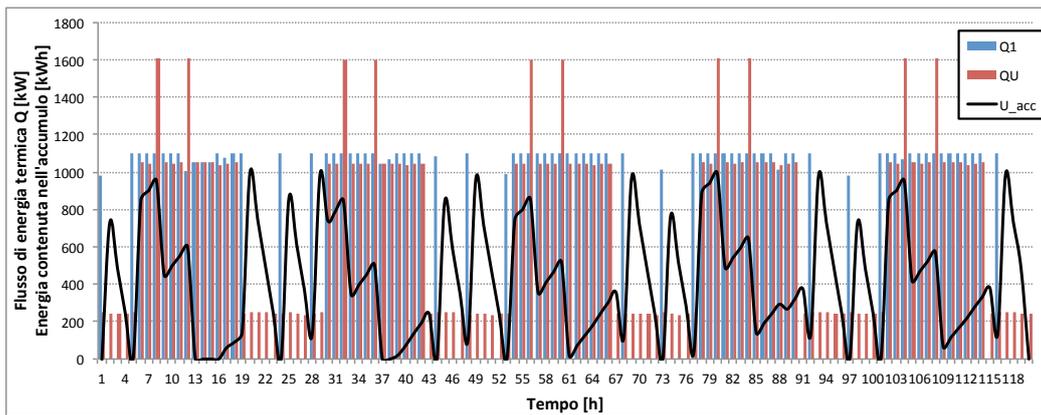
Ciò fa intendere come l'unità lavori quasi sempre in prossimità del rendimento nominale. Se ora si passa ad osservare la figura 5.17c in cui si è posta la curva di carico dell'utenza e la curva di carico dell'unità si può osservare come l'andamento sia completamente differente dal caso precedente. Nel caso precedente il sistema di conversione era in funzione, con una o più unità, per tutte le 8760 ore dell'anno. In questo sistema invece il funzionamento dell'unità di conversione copre il 66% delle ore annuali. Dal confronto tra questi due grafici si può notare anche il sostanziale beneficio che comporta l'installazione del sistema di accumulo. Nel caso precedente la potenza globalmente installata nel sistema era di 1606 kW (sommatoria delle potenze nominali dei tre impianti), mentre in questo è di 1100 kW, cioè si ha avuto una riduzione di circa il 31,5% della potenza installata. La capacità di produzione dei flussi nel primo caso doveva essere in grado di seguire l'utenza lungo tutto il suo andamento. Ciò implicava che non solo la potenza massima dovesse essere pari alla massima richiesta dell'utenza, ma anche le condizioni ai carichi parziali dovessero essere permesse. Quindi, come visto nel paragrafo 5.3.1 non tutte le configurazioni erano permesse. In questo caso tutto ciò non è più vero, poiché il sistema di accumulo permette sia di non dover dimensionare il sistema sulla massima richiesta dall'utenza, ma anche di non dover prevedere che l'unità di trasformazione sia in grado di seguire l'utenza ai carichi parziali. Il sistema di accumulo ha il compito di compensare gli eventuali squilibri che possono esserci tra la fase di produzione di flussi e di cessione all'utenza.

Dalla confronto tra la figura 5.17c e la figura 5.16c (le due curve di carico) si può notare anche un altro aspetto descritto nel capitolo 4: un sistema di accumulo trasforma il vincolo sulla potenza che richiede l'utenza ad un vincolo sull'energia. La figura 5.16c mostra come l'andamento dei flussi prodotti dal sistema (sommatoria di $Q_{Pq1,out}(t)$, $Q_{Pq2,out}(t)$, $Q_{Pq3,out}(t)$) sia in ogni istante uguale al flusso richiesto dall'utenza. Tale vincolo è espresso dalla relazione 5.40. Nella figura 5.17c ciò non è più vero poiché non esiste una relazione simile alla 5.40 che vincoli i flussi prodotti dal sistema ad assumere lo stesso valore di quello richiesto dall'utenza. Nel modello però è presente il vincolo 5.82 che impone all'energia totale prodotta dal sistema nel periodo in esame di essere uguale a quella richiesta dall'utenza nello stesso periodo. Questo nella figura 5.17c può essere descritto come l'uguaglianza tra l'area sottesa dalla curva di carico dell'utenza e l'area identificata dal funzionamento dell'unità P_{q1} . L'energia richiesta dall'utenza, e conseguentemente quella prodotta del sistema è pari a 6356 MWh annui.

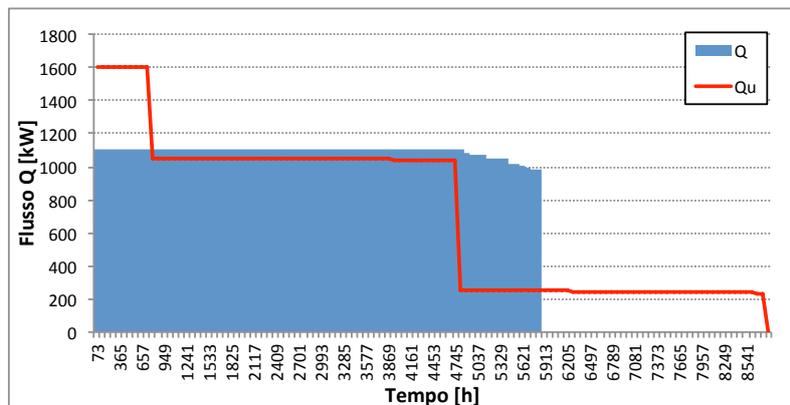
Se ora si passa ad osservare gli aspetti economici, la funzione obiettivo in presenza di accumulo si attesta sul valore di $f(x) = 270482$ €. Si ha un guadagno di circa 1083,18 € rispetto alla configurazione del caso precedente. Il beneficio del sistema di accumulo quindi se per pur positivo non assume valori notevoli. Questo fatto è spiegato in relazione al discorso già visto nel paragrafo 5.3.1, in questi due esempi i costi di installazione sono molto inferiori (quasi due ordini di grandezza) rispetto ai costi di funzionamento. Quindi una riduzione della potenza nominale installata globalmente nel sistema porta una riduzione sostanzialmente piccola del costo. La quota di costo relativa all'installazione dei componenti in questo esempio è di 955,72 €, pari cioè ad una diminuzione del 5% rispetto al caso precedente. I benefici si hanno anche in fase di funzionamento; in questo secondo caso i costi di funzionamento assumono un valore di 269526,8 €. Anche in questo caso il beneficio è minimo. Ciò può essere spiegato in funzione dell'operatività dei due sistemi in



(a) Configurazione del sistema di conversione a seguito del processo di ottimizzazione



(b) Andamento temporale dei flussi prodotti dalle diverse unità e del livello di energia all'interno dell'accumulo



(c) Curva di carico dell'utente e del sistema di conversione

Figura 5.17: Risultati del processo di ottimizzazione del sistema in presenza di accumulo

condizioni vicini alle condizioni di rendimento nominale. In pratica nel sistema in assenza di accumulo le unità lavorano già in condizioni prossime alle condizioni nominali, per cui è ovvio che il beneficio che ha comportato l'installazione di un sistema di accumulo sia minimo.

Per ciò che concerne l'ottimizzazione si vuol metter in evidenza un fattore che distingue i problemi dinamici dai problemi stazionari (o quasi stazionari). Si è detto nell'analisi come i problemi dinamici richiedano per la loro risoluzione maggiori sforzi computazionali. Questo può essere dimostrato dai tempi necessari all'ottimizzatore per risolvere il problema. Nel sistema analizzato nel paragrafo 5.3.1 l'assenza di sistemi di accumulo o di vincoli sulle massime variazioni di carico permette di considerare il problema come una successione di problemi stazionari. Il solutore CPLEX per decretare la soluzione ottimale impiega 7,516 secondi. Per la risoluzione del problema di ottimizzazione (questa volta dinamico) analizzato in questo paragrafo lo stesso solutore impiega 1002,437 secondi. Si ha un incremento di 132373% dei tempi computazionali.

5.4 Conclusioni

In questo capitolo sono stati presentati due esempi di ottimizzazione di sistemi di conversione in presenza di componenti di accumulo.

Nel primo esempio (paragrafo 5.2) si è analizzato un'ottimizzazione di progetto e funzionamento di un sistema composto da: un'unità cogenerativa P_{eq} , una caldaia P_q e un serbatoio di accumulo termico; atto a soddisfare un'utenza termica. In questo caso l'obbiettivo era quello di determinare l'ottimo funzionamento del sistema e l'ottima dimensione del sistema di accumulo. Si è visto come i componenti del sistema e le loro interazioni reciproche e con l'ambiente esterno possano essere modellate con le regole presentate nel capitolo 2 e nel capitolo 4. Il problema di ottimizzazione si basa su una funzione obbiettivo che identifica il profitto economico. Tale profitto è dato dal beneficio ottenuto dalla vendita dell'energia elettrica prodotta nell'unità P_{eq} sottratta dei costi connessi al consumo di combustibile e alla quota di ammortamento del sistema di accumulo. La funzione profitto così esposta non è separabile, per cui non è stato possibile applicare la programmazione dinamica. Il problema di ottimizzazione a causa della presenza di un componente di accumulo risulta dinamico ed è stato risolto mediante la programmazione lineare mista intera (MILP). I risultati dell'ottimizzazione hanno evidenziato l'utilità del sistema di accumulo in fase di funzionamento del sistema. Si è, infatti, potuto osservare come la presenza del componente di accumulo all'interno del sistema permetta di svincolare la produzione dei flussi termici nelle due unità dalla richiesta dell'utenza. Questo permette, in particolar modo, all'unità P_{eq} di essere gestita in funzione delle variazioni del prezzo dell'energia elettrica. Inoltre il sistema di accumulo consente ad entrambe le unità di operare per la maggior parte del tempo in prossimità del carico massimo, con notevole beneficio in termini di consumo di combustibile.

Nel paragrafo 5.2.1 si è presentata una particolare tecnica (TSO-STO), utilizzabile in specifici problemi di ottimizzazione di sistemi in presenza di accumulo, che permette di semplificare il problema di ottimizzazione. Tale criterio è stato applicato allo stesso problema descritto nel paragrafo 5.2. La tecnica consiste nel separare il problema dinamico di ottimizzazione originario in due sottoproblemi non dinamici più semplici, partendo dalla semplice osservazione che il termine della funzione obbiettivo (profitto) associato al costo del serbatoio è molto meno importante rispetto agli altri termini (ricavi derivati dalla ven-

dita dell'energia elettrica e termica, costo del consumo di combustibile e ammortamenti dei costi di acquisto dei sistemi di generazione):

- Il primo sottoproblema è la ricerca dell'ottima strategia di generazione di energia termica, indipendentemente dalla dimensione del sistema di accumulo;
- Il secondo sottoproblema è la ricerca della dimensione ottima del Sistema di accumulo, per l'ottima strategia di generazione di energia termica determinata risolvendo il primo sottoproblema.

Con tale semplificazione e con l'aiuto di alcune considerazioni di tipo ingegneristico si sono ottenuti gli stessi risultati ricavati dal problema originario.

Nel paragrafo 5.2.2. si sono analizzati due aspetti: il vincolo sulla massima rampa di carico per il sistema P_{eq} e la definizione della mappa caratteristica per il calcolo delle perdite nel sistema di accumulo. Si è visto come tali aspetti modifichino il modello del sistema, aumentando il numero di variabili e il numero di equazioni, e i risultati del processo di ottimizzazione. In particolar modo si è notato come il vincolo sulla massima rampa di carico impedisca all'unità P_{eq} di seguire efficacemente l'andamento del prezzo di vendita dell'energia elettrica.

Nel secondo esempio si è analizzato un'ottimizzazione completa di un sistema di conversione atto a soddisfare un'utenza termica, identificata da una curva di carico a tre gradini. Si sono distinti due casi: un sistema composto da quattro possibili unità P_q (analizzato nel paragrafo 5.3.1) e un sistema composto dalle stesse quattro unità ma in cui si è inserito un sistema di accumulo di flussi Q (analizzato nel paragrafo 5.3.2). L'obiettivo di entrambe le ottimizzazioni era decretare la miglior configurazione del sistema (tipologia di unità e taglia) e il miglior funzionamento. Il criterio scelto in entrambi i casi è stato quello della minimizzazione dei costi di funzionamento e di installazione del sistema. L'ottimizzazione del primo sistema ha portato a definire l'utilizzo di tre unità di trasformazione. La taglia delle tre unità è stata scelta in relazione ai "gradini" dell'utenza, cioè in modo tale che le unità di trasformazione operino per la maggior parte del tempo a pieno carico. L'ottimizzazione del secondo sistema ha portato all'utilizzo di un'unica unità P_q . Il funzionamento dalla quale non è più connesso temporalmente alla richiesta di flussi termici dell'utenza. Questo è dovuto alla possibilità del sistema di accumulo di colmare gli eventuali squilibri tra generazione e richiesta.

Dal confronto dei due sistemi si è potuto osservare come il sistema di accumulo permetta:

- In fase di sintesi e di progetto di dimensionare il sistema con un minor numero di componenti e con una potenza installata complessiva minore. Questo porta benefici in relazione alla quota fissa dei costi del sistema
- In fase di funzionamento di disaccoppiare la richiesta di flussi da parte dell'utenza dalla fase di generazione degli stessi. Questo porta benefici in relazioni alla quota variabile della funzione di costo poiché si ha un minor consumo di combustibile.

Conclusioni

In questa tesi è stato individuato uno strumento semplice per costruire modelli di macro-sistemi di varia complessità adibiti alla conversione di fonti energetiche in prodotti utili. Inoltre si è analizzato come tale modello possa essere utilizzato nel processo di ottimizzazione delle fasi di progetto e di funzionamento del macro-sistema stesso. Come si è visto tali sistemi devono soddisfare le richieste di energia e di materia proveniente dall'ambiente circostante, avendo la possibilità di sfruttare determinate quantità di energia e di materia che l'ambiente mette a disposizione.

Il generico sistema di conversione è rappresentato da una o più unità che possono interagire tra loro e con l'ambiente esterno. Le diverse unità sono state descritte come black-box (modello zero-D o a parametri concentrati), in cui quindi è necessario determinare esclusivamente le relazioni che legano gli ingressi e le uscite di ogni blocco. L'approccio individuato può essere suddiviso in tre fasi: fase di descrizione delle interconnessioni tra unità e ambiente, fase di modellazione e fase di ottimizzazione.

La parte fondamentale è rappresentata dalle semplificazioni fatte nella fase iniziale. In questa fase si è individuata una schematizzazione arbitraria, definita superstruttura che permette di individuare tutte le possibili traiettorie di conversione di fonti energetiche in prodotti utili.

La schematizzazione poggia le basi sulla distinzione delle diverse tipologie di energia e materia che le unità del sistema, e di conseguenza il sistema stesso, possono sfruttare e/o debbano produrre. Questa classificazione in diverse categorie è stata utilizzata per distinguere le interazioni tra le unità del sistema e tra il sistema e l'ambiente esterno, che sono state espresse in termini di flussi di massa e di energia. Per il grado di dettaglio utilizzato nel descrivere i sistemi di conversione si è visto che può essere conveniente esprimere le interazioni esclusivamente in termini di flussi di energia e limitare l'uso dei flussi di massa alla descrizione degli scambi di materie prime e prodotti finiti. Così facendo l'analisi risulta essere notevolmente semplificata in quanto è stato possibile escludere dall'analisi i parametri di stato, senza escludere dall'analisi informazioni importanti al grado di dettaglio considerato. Una volta classificati i possibili flussi di massa e di energia è stato possibile distinguere le possibili unità di trasformazione in relazione al numero e alla categoria di appartenenza dei flussi in uscita. Le unità di trasformazione e le interazioni che queste presentano con l'ambiente individuano le traiettorie di conversione. Per questo motivo nella superstruttura saranno comprese tutte le possibili unità di trasformazione e tutte le possibili interconnessioni con l'ambiente esterno.

L'utilizzo della schematizzazione proposta nella seconda fase, quella di modellazione, ha portato a poter considerare il modello del sistema distinto in due parti:

- La prima parte include le relazioni matematiche che descrivono le interazioni che

il sistema ha con l'ambiente esterno. Queste sono rappresentate dalle equazioni di bilancio del tipo $A_{s,out}(t) = \sum_{j=1}^n A_{Pij,in}(t)$ per i flussi in ingresso al sistema e $\sum_{j=1}^m B_{Pbj,out}(t) = B_{u,in}(t)$ per i flussi in uscita.

- La seconda parte include le relazioni che descrivono le diverse unità del sistema e i loro collegamenti. I collegamenti tra le diverse unità presentano una formulazione analoga alle interazioni tra l'ambiente e il sistema. Per descrivere ciascuna unità di trasformazione nel modello devono essere compresi: il bilancio di energia tra i flussi in ingresso e in uscita, $k-1$ mappe caratteristiche per determinare il funzionamento delle unità (con k il numero totale dei flussi che interagiscono con l'unità meno il flusso di perdita) ed una serie di equazioni ausiliari atte a descrivere particolari vincoli e/o aspetti caratteristici. Si è inoltre osservato l'importanza di determinare con correttezza le mappe caratteristiche per avere dei risultati validi, e come esse in molti casi possano essere approssimate da funzioni lineari.

Successivamente si è passati ad analizzare la fase di ottimizzazione del generico sistema di conversione. Si è osservato come per definire il problema di ottimizzazione sia necessario:

- Definire chiaramente i confini del sistema: si devono includere all'interno del sistema tutte e sole le unità che influenzano in modo significativo il suo comportamento e ciò permette di formulare problemi di ottimizzazione semplici.
- Costruzione del modello del sistema con l'approccio individuato.
- Definire gli obiettivi dell'ottimizzazione: deve essere definita una funzione (o più di una funzione) che permetta di descrivere in termini matematici il criterio che si è scelto per decretare la soluzione ottima tra tutte le soluzioni possibili.
- Definire le variabili di decisione: questa scelta è influenzata dalla tipologia di analisi che deve essere svolta. Si è visto come un grande differenza tra l'ottimizzazione della sintesi, del progetto e del funzionamento si ha in una diversa scelta delle variabili di decisione. Nell'analisi di sintesi di un sistema vengono scelte principalmente come variabili di decisione le variabili binarie che decretano la presenza o meno di un componente all'interno del sistema, nell'ottimizzazione di progetto quelle che determinano le taglie e le prestazioni dei componenti (limiti superiori dei vincoli, e i parametri delle mappe caratteristiche), mentre in fase di funzionamento le variabili binarie che decretano l'accensione e lo spegnimento di un impianto e i valori di alcuni flussi del sistema.

Nella fase di ottimizzazione l'aspetto fondamentale è definire con esattezza il tipo di problema di ottimizzazione che deve essere analizzato. Questo deve essere fatto per poter determinare l'algoritmo più adatto per la sua risoluzione. Si è visto che la maggior parte dei problemi di ottimizzazione che concernono i sistemi di conversione sono problemi di ottimizzazione dinamica risolvibili mediante la programmazione lineare e non lineare mista intera (MI(N)LP). Qualora, però non siano presenti nel sistema vincoli o unità che leghino tra loro i diversi istanti temporali il problema può essere considerato stazionario con un notevole beneficio in relazione agli sforzi computazionali, quindi risulta conveniente seguire approcci che permettano di eliminare le caratteristiche dinamiche del problema senza incidere troppo sulla validità del risultato. Lo sforzo computazionale richiesto può essere ridotto anche linearizzando tutte le relazioni del modello e la funzione obiettivo che non

sono lineari. È quindi necessario prevedere l'utilizzo di tecniche (ad esempio tecnica di Glover) per linearizzare le relazioni non lineari. Nell'ambito dei sistemi energetici sia le equazioni di bilancio sia, in particolare, le mappe caratteristiche dei componenti del sistema sono ben approssimate da funzioni lineari.

Una volta analizzate le tre fasi dell'approccio si è posta l'attenzione su particolari componenti presenti nei sistemi di conversione che possono portare sostanziali benefici nella fase di progettazione e di gestione dei sistemi. Questi componenti sono i sistemi di accumulo, i quali forniscono al sistema la possibilità di svincolare temporalmente, entro i limiti delle dimensioni del sistema di accumulo stesso, la fase di trasformazione dei flussi dalle fasi di acquisizione e di cessione di flussi dal/all'ambiente. La modellazione di tali componenti è analoga a quella delle unità di trasformazione. Per poterli descrivere, infatti, è necessario determinare il bilancio dei flussi, le mappe caratteristiche che descrivono l'efficienza al variare del carico, e alcune relazioni ausiliarie per descrivere particolari vincoli di funzionamento. Il bilancio dei flussi per questi componenti è dato in forma differenziale in funzione del tempo $A_{Acc,in}(t) - A_{Acc,out}(t) - \pi_p(t) = \frac{dU_{Acc}(t)}{dt}$. Questo comporta che un qualsiasi problema di ottimizzazione di un sistema di conversione in presenza di accumulo è un problema di ottimizzazione dinamica.

Da questo lavoro di tesi si è dunque ottenuto un approccio che permette di semplificare l'analisi e lo studio della progettazione e della gestione dei sistemi di conversione dell'energia e della materia in prodotti utili. In particolar modo le semplificazioni derivanti da tale approccio hanno permesso di semplificare notevolmente la fase di generazione del modello matematico che descrive il comportamento del sistema. Questo è stato permesso grazie all'individuazione delle relazioni matematiche che sono strettamente necessarie a descrivere le unità del sistema e le loro interazioni reciproche e con l'ambiente esterno. Ogni unità ed ogni interazione, infatti, è individuato da uno specifico set di equazioni, che, come visto, non sono in numero elevato e soprattutto appartengono a quattro categorie (bilanci di energia, bilanci di massa, mappe caratteristiche, equazioni ausiliarie). Il fatto di possedere un modello più semplice ha conseguentemente portato un rilevante beneficio alla fase di ottimizzazione, poiché ha permesso di ridurre i tempi e gli sforzi che devono essere dedicati a questa operazione. L'utilità di quest'approccio può dunque essere apprezzata in particolar modo nell'analisi di sistemi di dimensioni molte estese, composti da un gran numero di componenti e collegamenti, in cui un'analisi dettagliata risulterebbe molto complessa e richiederebbe elevate risorse computazionali ed economiche. Con le modalità descritte in questa tesi ad esempio si potrebbe descrivere con un buona precisione un sistema di conversione che identifichi una macro regione o un'intera nazione, in cui le interazioni con l'ambiente possono rappresentare le importazione e esportazione di materiali e di energia.

Grazie all'utilizzo di questo approccio è possibile costruire il modello di un sistema di qualunque dimensione individuando le traiettorie di conversione che le rappresentano, cioè accorpando un numero di possibili tipologie d'impianti (unità) e di interazioni con l'ambiente molto limitato. Tutti i principali impianti di conversione esistenti come si è visto possono essere rappresentati da 15 unità di trasformazione differenti, mentre i sistemi di accumulo possono essere identificati da 4 tipologie di unità di immagazzinamento. Le possibili interazioni invece possono essere 5 in uscita dal sistema (4 utenza e le perdite) e 5 in ingresso. Questo è posto in diretta relazione con la classificazione utilizzata per distinguere le diverse categorie di flussi. Avere un numero limitato di unità e interazioni fa sì che anche il numero e le tipologie di equazioni necessarie a descriverli sia limitato. Ciò conduce a semplificare molto la fase di costruzione del modello e inoltre a renderla un

procedimento meccanico di semplice assemblaggio di equazioni di tipologia e numero noto. Infatti, per costruire il modello del sistema basta semplicemente seguire questi passi:

- Individuare il numero n_s di sorgenti di flussi, la categoria di appartenenza di ciascuna sorgente e le unità a cui è collegata. Per ciascuna utenza inserire nel modello un'equazione di bilancio dei flussi (del tipo 2.4)
- Individuare il numero n_u di utenze, la categoria di appartenenza di ciascuna utenza e le unità a cui è collegata. Per ciascuna utenza inserire nel modello un'equazione di bilancio dei flussi (del tipo 2.6)
- Individuare il numero e la tipologia di unità che compongono il sistema. Per ogni unità inoltre si devono individuare gli n flussi in ingresso, gli m flussi in uscita e i flussi di perdita. Nel modello del sistema devono essere inserite per ogni unità il bilancio di energia, $(k-1)$ mappe caratteristiche (con $k=n+m$), e le equazioni ausiliarie.
- Individuare i nodi del sistema, cioè i punti in cui si uniscono o si dipartono due o più flussi. Per ogni nodo è necessario inserire nel modello del sistema un bilancio di flussi.

La semplicità dei modelli così ricavati deriva oltre che dalla particolare classificazione individuata anche dall'assunzione di poter descrivere il comportamento di ciascun impianto utilizzando un modello zero-D. Questo modello permette di descrivere il comportamento dei diversi componenti con equazioni che relazionano gli input con gli output; ed è sufficiente per analizzare in modo adeguato i diversi componenti, come è stato visto dall'analisi bibliografica. Un ulteriore vantaggio è derivato dal fatto che la gran parte delle mappe caratteristiche degli impianti esistenti è ben approssimabile da funzioni lineari o da sistemi di funzioni lineari, questo ha portato ad un'aggiuntiva semplificazione nel modello. Inoltre si è visto come molte funzioni che prevedono il prodotto tra variabili possano essere efficacemente linearizzate. Ciò permette l'applicazione della programmazione lineare mista intera (MILP) che comporta l'utilizzo di un minor numero di risorse computazionali.

Dall'altra parte però quest'approccio presenta anche alcuni svantaggi, che in gran parte derivano dalle assunzioni che stanno alla base dell'approccio stesso. In particolar modo in alcune situazioni il grado di dettaglio assunto può non permettere una descrizione corretta di un sistema o di alcune parti di esso. Qualora però, il grado di dettaglio sia insufficiente l'approccio è estendibile considerando equazioni con grado di dettaglio maggiore, ma che fondamentalmente sono dello stesso tipo di quelle descritte in questa trattazione.

Un ulteriore punto debole è legato al fatto di considerare, ad eccezione dei flussi di materia M e W , esclusivamente flussi di energia e non i flussi di massa ad essi associati. L'aver trascurato i flussi di massa è un'approssimazione forte che talvolta rende inattendibili i risultati. In questi casi non risulta conveniente, al fine di ottenere un'analisi corretta, trascurare i flussi di massa associati ai flussi di energia. La fase di creazione del modello e la successiva fase di ottimizzazione diventano più complicate in relazione all'aumento del numero di equazioni e di variabili, ma soprattutto in relazione al fatto che le equazioni aggiuntive sono spesso non lineari. Si pensi ad esempio che per ogni flusso di massa associato ad un flusso di energia è richiesta la presenza nel modello di un'equazione del tipo 1.1 che identifica un prodotto tra due variabili. Un ultimo svantaggio è relazionato alla necessità di avere mappe caratteristiche precise e corrette per i diversi componenti, al fine di ottenere risultati corretti. Queste mappe solitamente sono difficilmente reperibili

dai costruttori di impianti, e quindi devono essere ricavate tramite analisi approfondite svolte sul singolo impianto, con gradi di dettaglio superiori.

Da questo lavoro di tesi è possibile ricavare degli spunti per lavori successivi, in relazione soprattutto ad un'analisi più approfondita delle utenze e delle sorgenti. In particolare modo la richiesta di energia e materia da parte dell'utenza, la disponibilità di energia e materia che rende fruibile l'ambiente, l'andamento di variabili di costo (quali ad esempio i prezzi) sono stati assunti come dati certi del problema. Nella realtà, però tutti questi aspetti sono condizionati da un grado più o meno elevato di incertezza. Ciò è dovuto alla dipendenza che tali aspetti presentano in relazione agli eventi futuri. Questi eventi, ovviamente, non essendo ancora successi non possono essere determinati, ma solo supposti. In futuro, quindi, l'approccio presentato potrà essere integrata con strumenti di programmazione stocastica al fine di valutare in modo semplice non la soluzione ottima, ma la soluzione che ha una maggior probabilità di essere ottima.

Bibliografia

- [1] A.Bejan,G. Tsatsaronis, and Moran, *Thermal Design and Optimization*. John Wiley and Sons, New York, 1996
- [2] W. F. Stoecker, *Design of Thermal Systems* McGraw-Hill, New York, 1989.
- [3] S. S. Rao, *Engineering Optimization: Theory and Practice* John Wiley and Sons, New York, 1996.
- [4] P. P. Walsh and P. Fletcher *Gas Turbine Performance, Second Edition*.Blackwell Publishing, 2004.
- [5] R. Yokoyama, K. Ito, and Y.Matsumoto," Optimal Sizing of a gas turbine cogeneration plant in consideration of its operational strategy", *ASME Journal of Engrneering for Gas Turbines and Power*, no.116, pp. 32-38, 1994
- [6] R. Yokoyama, K. Ito, and K.Kamimura," Development og a General-Purpose Optimal Operational Planning System for Energy Suplly", *ASME Journal of Energy Resource Technology*, no.116, pp. 290-290, 1994
- [7] R. Yokoyama, K. Ito, "Operational Strategy of a Cogeneration System Under a Complex Utility Rate Structure", *ASME Journal of Energy Resource Technology* no.118 pp 256-262, 1996
- [8] R. Yokoyama, K. Ito, "Optimal operational planning of cogeneration systems with thermal storage by the decomposition method", *ASME Journal of Energy Resource Technology* no.117 pp 337-342, 1995
- [9] R. Yokoyama, Y. Hasegawa ,K. Ito, "A MILP decomposition approach to large scale optimization in structural design of energy suplly system", *Pergamon Energy Conversion and Management* no.43 pp 771-790, 2002
- [10] H.Ren, W.Gao, "A MILP model for integrated plan and evaluation of distributed Energy System", *Elsevier Applied Energy* no.87 pp 1001-1014, 2010
- [11] A. Christidis, C. Koch, L. Pottel, G. Tsatsaronis, "The Contribution of Heat storage to the profitable operation of combined heat and power plants in liberalized electricity markets", *Elsevier Energy* no.41 pp 75-82, 2012
- [12] J. Aghaei, M. Alizadeh, "Multi-objective self-scheduling of CHP based microgrids considering demand response programs and EESs (energy storage system)", *Elsevier Energy* no.55 pp 1044-1054, 2013
- [13] S. Rech, *Analisi e Ottimizzazione della configurazione di un Macro-Sistema di conversione di energia*, Tesi di dottorato, Università di Padova, 2013

- [14] S. Rech, A. Toffolo, A. Lazzaretto, "TSO-STO: A two-step approach to the optimal operation of heat storage system with variable temperature tanks", Elsevier *Energy* no.45, pp 366-374, 2012
- [15] A. Cavallini, L. Mattarolo, *Termodinamica Applicata* Cleup, 1988
- [16] L. Basso *Tecniche di Ottimizzazione della gestione di Sistemi Energetici: Aspetti teorici e applicativi* Tesi di Laurea, Università di Padova, 1996
- [17] M. Guarnieri, *Elementi di elettrotecnica circuitale*. Edizioni Progetto, Padova, 2010
- [18] Terna, *Dati statistici sull'energia elettrica in Italia - 2012*,
<http://www.terna.it/LinkClick.aspx?fileticket=S14eWNgRUNs3Dtabid=649>
- [19] A. Cavallini, *Appunti delle lezioni del corso di Energie Rinnovabili*
- [20] D. Bluck, *Enciclopedia degli idrocarburi, vol 2/ Raffinazione Petrochimica*, Treccani, pp 71-88
- [21] D. Bluck, *Enciclopedia degli idrocarburi, vol 3/ Nuovi Sviluppi: Energia, Trasporti, Sostenibilità*, Treccani, pp 421-434
- [22] H.K. Jacobsen, E. Zvingilate, "Reducing the market impact of large shares of intermittent energy in Denmark", Elsevier, *Energy Policy*, no 38, pp 3403-3412, 2010
- [23] M. Morandin, A. Toffolo, A. Lazzaretto, F. Maréchal, A. V. Ensinas, S. A. Nebre, "Synthesis and parameter optimization of a combined sugar and ethanol production process integrated with a CHP system", Elsevier, *Energy*, no 36, pp 3675-3690, 2011
- [24] G. V. Reklaitis, A. Ravindran, and K. Ragsdell, *Engineering optimization: Methods and Applications*. John Wiley and Sons, New York, 1983
- [25] R. F. Boehm, *Design Analysis of Thermal Systems*. John Wiley and Sons, New York, 1987.
- [26] A. Lazzaretto, *Appunti delle lezioni di Sistemi Energetici*. CUSL, Padova, 2012.
- [27] I. Vaja, *Definition of an object oriented library for the Dynamic simulation of advanced energy system: Methodologies, tools and application to combined Ice-ORC power plants*, Tesi di dottorato, Università di Parma, 2009
- [28] P. Mancarella, A. Canova, G. Chicco, G. Genon *Cogenerazione distribuita a gas naturale. Modelli per valutazioni energetiche, ambientali ed economiche*, Franco Angeli, 2009
- [29] Corso di Gestione delle risorse Energetiche, *Dispensa Pompe di calore e gruppi frigoriferi*, Università di Napoli, 2012
- [30] R. Yokoyama, K. Ito, and Y. Matsumoto, "Optimal Sizing of a gas turbine Cogeneration Plant in consideration of its operational strategy", *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, no.116, pp. 32-38, 1994
- [31] C. Riegler, M. Bauer, and J. Kurze, "Some aspect of modelling compressor behavior in gas turbine performance calculations", *Journal of Turbomachinery*, no 123, pp 372-378, 2001
- [32] P. Zhu and H. Saravanamuttoo, "Simulation of advanced twin-spool industrial gas turbine", *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, no.114, pp. 180-188, 1992

- [33] P.P Walsh and P. Fletcher, *Gas Turbine Performance, Second Edition*, Blackwell Publishing, 2004.
- [34] M. Judes, A. Christidis, C. Koch, L. Pottel, G. Tsatsaronis, " Combined optimization of the operation of existing power plants with design and operation of heat storage system for a large district heating network", in *Proceedings of ECOS 2009*, August 31- September 1, 2009
- [35] D. Del Col, *Progettazione di Impianti fotovoltaici*, Slide, Università di Padova, 2012
- [36] G. Pavesi, *Wind Energy System*, dispensa per il corso di "Macchine per l'utilizzo di fonti rinnovabili", 2012
- [37] P. Kall, S.W. Wallace, *Stochastic Programming, Second Edition*, John Wiley and Sons, Chichester, 1994
- [38] P. Berra, L. De Paoli, G. Zingales, *Economia delle fonti di Energia*, CLEUP, 1997
- [39] Y. El-Sayed and R. Evans, "Thermoeconomics and the design of heat system", *Journal of engineering for power*, no 92, pp 27-35, 1970
- [40] G. Tsatsaronis and M. Winhold, "Exergoeconomic analysis and evaluation of energy-conversion plants i: A new general methodology. ii: Analysis of a coal-fired steam power plant", *Energy*, no 10(1), pp 81-94, 1985
- [41] ENEL, *Dichiarazione Ambientale 2012-2014 impianto termoelettrico "Andrea Palladio" di Fusina (Ve)*, 2014
- [42] L. De Giovanni, G. Zambelli, *Introduzione al metodo del semplice*, Slide
- [43] R. E. Bellman, *Dinamic Programming*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1957
- [44] S. K. Kamali, V.V Tyagi, N. A. Rahim, N. L. Panwar, H. Monkhlis, "Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, no 25, pp 135-165, 2013
- [45] C. H. Li, X. J. Zhu, G.Y. Cao, S. Sui, M. Hu, " Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power system using hybrid energy storage technology", *Renewable Energy*, Elsevier, no 34, pp 815-826, 2009
- [46] G. Pagliarini, S. Rainieri, " Modeling of a thermal energy storage system coupled with combined heat and power generation for heating requirements of University Campus", *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, no 30, pp 1255-1261, 2010
- [47] F. S. De Samaniego, *Modeling of an Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage (AA-CAES) Unit and an Optimal Model-based Operation Strategy for its Integration into Power Markets*, Master Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2010
- [48] California Energy Commission, "California Aims to Increase Efficiency", Demand Response to Meet Need For Reliable, Low-Carbon Energy System", <http://www.energy.ca.gov/releases/2014releases/2014-01-15ieprnr.html>
- [49] L. Cabeza, *Thermal Energy Storage*, Elsevier, Universitat de Lleida, 2012
- [50] S. K. Kamali, V.V Tyagi, N. A. Rahim, N. L. Panwar, H. Monkhlis, "Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power

- systems: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, no 25, pp 135-165, 2013
- [51] A. Rabiee, H. Khorramdel, J. Aghaei, ”A review of energy storage systems in micro-grids with wind turbines”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, no 18, pp 316-326, 2013
- [52] I. Dincer, M. A. Rosen, *Thermal Energy Storage Systems and Application*, John Wiley and Sons, 2011
- [53] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rhafiki, Y.Zeraoui, ” Energy storage: Applications and Challenges”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Elsevier, pp 1-16, 2013
- [54] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lazaro, P. Dolado, B. Zalba, ” State of art on high temperature thermal energy storage for power generation.”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, no 14, pp 31-72, 2010
- [55] M. Semadeni, ” Storage of Energy, Overview”, *Encyclopedia of Energy, Volume 5*, Elsevier, 2004
- [56] K. Skogsberg, B. Nordell, ” The Sundsvall hospital snow storage”, *Cold Region Science and Technology* 32 (2001) 63–70.
- [57] Abhat, A.” Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials”, *Solar Energy* 30(4), 313–332, 1983.
- [58] Lane, G.A. ”Low temperature heat storage with phase change materials”,*International Journal of Energy Research* 5, 155–160, 1980.
- [59] H.G. Lorsch, K.W. Kauffman, J.C. Denton, ”Thermal energy storage for heating and air conditioning, future energy production system”,*Heat Mass Transfer Processes* no 1, pp 69–85, 1976.
- [60] R. Yokoyama, K. Ito, ” A revised DEcomposition Method for MILP Problems and its application to operational Planning of thermal Storage System”, *Journal of Energy Resource Technology*, ASME, no 118, pp 277-283, 1996
- [61] R. Yokoyama, K. Ito, ” Optimal operational planning of cogeneration Systems with Thermal Storage by the Decomposition Method”, *Journal of Energy Resource Technology*, ASME, no 117, pp 337-353, 1995
- [62] R. Bruschi, *Enciclopedia degli idrocarburi, vol 1/ Trasporto idrocarburi e stoccaggio gas*, Treccani, pp 769-828
- [63] E. Dotzauer and P. Meiborn, ” Simple model for prediction of load in district-heating system”,*Applied Energy*, no 73, pp 277-284, 2002.
- [64] A. Nottrot, J. Kleissl, B. Washom, ” Energy dispatch schedule optimization and cost benefit analysis for grid-connected, photovoltaic-battery storage system”, *Renewable Energy*, Elsevier, no 55, pp 230-240, 2013.
- [65] R. H. Milocco, J. E. Thomas, B. E. Castro, ” Generic dynamic model of rechargeable batteries”, *Journal of Power Source*, Elsevier, no 246, pp 609-620, 2014.
- [66] J. P. Maton, L. Zhao, J. Brouwer, ”Dynamic modeling of compressed gas energy storage to complement renewable wind power intermittency”, *International Journal of hydrogen Energy*, Elsevier, no 38, pp 7867-7880, 2013.

-
- [67] K. M. Powell, T. F. Edgar, " An adaptive-grid model for dynamic simulation of thermocline thermal energy storage systems", *Energy Conversion and Management*, Elsevier, no 76, pp 865-873, 2013.
- [68] R. Carapellucci, L. Giordano, "Modeling and optimization of an energy generation island based on renewable technologies and hydrogen storage systems", *International Journal of hydrogen energy*, Elsevier, no 37, pp 2081-2093, 2012.
- [69] T. Tveit, T. Savola, A. Gebermedhin, and C. Fogelholm, " Multi-period minlp model for optimising operation and structural changes to chp plants in district heating networks with long-term thermal storage", *Energy Conversion and Management*, no 50, pp 639-647, 2009
- [70] C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo, *Trasmissione del calore*, CLEUP, Padova, 1989.