



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

**ANALISI TECNICO – ECONOMICA DEL
POTENZIALE DI EFFICIENTAMENTO
ENERGETICO DEI FORNI FUSORI DEL
DISTRETTO DEL VETRO ARTISTICO DI MURANO**

Relatore: Prof. Arturo Lorenzoni

Studentessa: Giulia Samantha Schiavo - 1106705

Anno Accademico 2015/2016

INDICE

INTRODUZIONE	5
CAPITOLO 1 – LA FILIERA DEL VETRO ARTISTICO E ASPETTI PRODUTTIVI	
1.1. La Filiera del vetro artistico di Murano	7
1.1.1. Inquadramento del settore produttivo: occupazione, prospettive di sviluppo e tutela con problematiche varie	7
1.1.2. Struttura energetica distrettuale	8
1.2. Il Vetro Artistico di Murano	8
1.2.1. Tipologie di lavorazioni e di prodotti	8
1.2.2. Tipologie di forni	9
1.2.3. Fasi di lavorazione (durata e temperature caratteristiche)	11
CAPITOLO 2 – INDAGINE PRELIMINARE ED ELABORAZIONE QUESTIONARI	
2.1. Raccolta dati, tipologia di questionario e indagine sui consumi energetici	15
2.1.1. Tipo di questionario e somministrazione	15
2.1.2. Tipo campione	16
2.1.3. Dati ottenuti e risultati dell'indagine	16
2.1.4. Considerazioni sullo stato del parco installazioni e impianti ausiliari	25
2.1.5. Consumi energetici globali	32
CAPITOLO 3 – ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI	
3.1. Misure sperimentali: raccolta dati sperimentali su tecnologia presente	35
3.1.1. Scelta del campione, numerosità e periodo di misurazione	35
3.2. Analisi dei dati sperimentali	36
3.2.1. Tipologia dei dati raccolti e tipologie di aggregazione: tipi forno e grandezza	36
3.2.2. Analisi comparativa dei dati, analisi dei benchmark, scelta del fattore di normalizzazione e riflessioni	37
3.2.3. Aspetti di correlazione consumo-produzione o consumo-ore funzionamento	38

3.2.4. Confronto e analisi risultati	44
Per fase	44
Presenza del recuperatore di calore	49
Presenza della regolazione automatica di combustione	51
Quantità di rottame percentuale	54
3.2.5. Costruzione modello predittivo del consumo – curve di correlazione per determinazione baseline	55

CAPITOLO 4 – ASPETTI TECNOLOGICI

4.1. Tipologie di forni: aspetti costruttivi e particolarità	63
4.2. Refrattario e Isolamento	72
4.3. Combustione: principi e regolazione automatica	79
4.4. Recupero del calore: recuperatore, criticità e limiti, tipi di recuperatore	87
4.5. Altri aspetti per l'efficientamento energetico: accorgimenti costruttivi e comportamentali	89

CAPITOLO 5 – ANALISI TECNICO-ECONOMICA E ATTIVITA' A SOSTEGNO DEGLI INVESTIMENTI PER L'EFFICIENTAMENTO ENERGETICO

5.1. Analisi economica dell'intervento di efficientamento	93
5.2. ESCo, Forme contrattuali EPC e interventi a sostegno dell'investimento	115
CONCLUSIONI	121
BIBLIOGRAFIA	123
RINGRAZIAMENTI	125

INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi è incentrato sullo studio del potenziale di efficientamento energetico dei forni fusori del distretto del vetro artistico di Murano (Ve). Il progetto, sviluppato in collaborazione con ENEA, S.E.I. ESCo, il Consorzio Promo Vetro e il Consorzio Vetro Energia, ha come obiettivo il miglioramento dell'efficienza energetica e il risparmio conseguibile dalla sostituzione dei forni attuali con forni alla migliore tecnologia disponibile.

Per poter fissare il benchmark dello stato attuale e studiare la potenzialità di tale investimento, è stato fondamentale conoscere il parco installazioni attuale. Nel Capitolo 2, vi sono i risultati raccolti nel corso della somministrazione del questionario conoscitivo e successivamente elaborati e confrontati a intervalli annuali o a tipologia di forno. Inoltre, si sono analizzati i consumi energetici globali e specifici.

Successivamente all'indagine conoscitiva, è stata condotta una campagna di misure sperimentale in un campione rappresentativo di forni, per poter stabilire un benchmark e poter confrontare i consumi attuale con i consumi previsti dai forni di nuova tecnologia. L'analisi dei dati sperimentali, nel Capitolo 3, riporta gli aspetti di correlazione tra consumo e produzione o tra consumo e ore di funzionamento, il confronto tra la durata delle fasi del ciclo termico tipico, l'influenza del recuperatore di calore, della regolazione automatica di combustione e della percentuale di rottame in fondita sui consumi orari. Infine, ai fini del benchmarking, è stato costruito il modello predittivo del consumo tramite curve di correlazione e confrontato con i dati reali.

Nel Capitolo 4, si sono indagati gli aspetti tecnologici dei forni: tipologia di forno e aspetti costruttivi e le principali leve di efficientamento: il refrattario e l'isolamento, i principi e la regolazione automatica della combustione, il recupero del calore tramite recuperatori e altri accorgimenti costruttivi e comportamentali.

Infine, nel Capitolo 5, sono state simulate due analisi economiche differenziate per tipologia di forno fusorio nelle due grandezze più frequenti, analizzando l'influenza del costo del vettore energetico gas naturale, del numero di fusioni settimanali e dell'applicazione di forme incentivanti. A margine, è stato fatto una presentazione, normativa e concettuale dei termini ESCo, EPC e TEE.

CAPITOLO 1 – LA FILIERA DEL VETRO ARTISTICO E ASPETTI PRODUTTIVI

1.1. La Filiera del vetro artistico di Murano

1.1.1. Inquadramento del settore produttivo: occupazione, prospettive di sviluppo e problematiche varie

La filiera del vetro artistico di Murano rappresenta ancora oggi una realtà produttiva unica nel suo genere: la qualità e la ricerca dei prodotti restano marchio riconoscibile per la realtà artigianale italiana nel mondo.

La produzione italiana del Vetro Artistico è costituita da Aziende medio-piccole che, grazie alla manualità e capacità interpretativa dei Maestri Vetrai e delle varie maestranze coinvolte, crea opere, sculture, vasi, bicchieri, lampadari ed oggettistica, che risultano essere “pezzi unici” e irriproducibili su larga scala.

In Italia il settore della produzione Artistica del Vetro conta 260 Aziende, con 150 aziende dislocate a Murano. Il comparto vetro artistico veneziano copre l’80% dell’export nazionale del settore con 66 milioni di fatturato e occupa 1100 addetti, ovvero il 30% del totale nazionale.

L’impatto della crisi economica ha portato un decremento di numero di addetti e della dimensione media dell’impresa, oltre che a un decremento del 7% dell’export in soli 5 anni. Il fatturato medio è di 594.853 euro.

I mercati di riferimento principali sono: Italia (66% nel 2013), Estero (33%, di cui 30% USA, 13% Giappone, Francia e Russia 11% - 2013). La crisi economica, la variazione delle esigenze della committenza e i cambi culturali hanno influenzato maggiormente la produzione, portando l’oggettistica e l’illuminazione ad occupare il 70% della produzione. Questa variazione di produzione ha avuto come conseguenza la crisi e spesso la chiusura di fornaci specializzate in elementi scultorei.

La tipica impresa occupa un numero di dipendenti medio di 4,2, identificando le vetrerie di Murano come micro-impresе e sebbene le peculiarità del settore, il lavoro del Maestro Vetraio ha perso negli anni appetibilità, sebbene le tipologie di contratto di lavoro, sia per i Maestri che per i serventi, serventini, altro tipo di operai e impiegati siano per la maggior parte a tempo indeterminato.

Con un numero così esiguo di dipendenti e con una media di 1,4 maestri per impresa, si può capire che il settore del vetro artistico è largamente artigianale, a conduzione familiare e le tecnologie e i know-how vengono talvolta tramandate in modo generazionale.

Proprio per l’altissima artigianalità delle lavorazioni, il rischio di perdita di know-how unico al mondo, i prodotti che rendono riconoscibile il marchio – Italia all’estero e la

pesante morsa della crisi economica che sta gravando sul settore, che si rendono necessari interventi a sostegno dell'innovazione e del lavoro.

Il Consorzio Promo Vetro, promotore del progetto di Tesi, coinvolge imprese che, rispetto alle non aderenti, hanno una maggiore internazionalizzazione e un fatturato medio del 40% maggiore.

(Confartigianato Venezia; Consorzio Provometro Murano, 2015)

1.1.2. Struttura energetica distrettuale

Il consumo del settore del vetro artistico impatta al 13.4% del consumo totale del settore vetrario, ma per le sue peculiarità, il consumo specifico per kg di vetro cavato (ovvero lavorato), risulta anche 100 volte maggiore rispetto alle produzioni industriali. Proprio per questo motivo si devono rendere accessibili le migliorie tecnologiche che permetteranno la diminuzione dei consumi, sia secondo l'ottica della sostenibilità che della economicità. (Dall'Igna, D'Este, & Maurina, 2012)

Le Vetriere Artistiche sono soggetti energivori con notevoli consumi di gas naturale ed energia elettrica: il volume complessivo di gas naturale consumato all'anno dagli aderenti al consorzio PromoVetro risulta essere di 10 milioni di Sm³, mentre il volume consumato dalle sole aziende coinvolte nell'indagine è di 7 milioni di Sm³. L'indagine, concentrata in 20 fornaci, ha permesso di studiare il 70% dei consumi totali del Consorzio PromoVetro.

1.2. Il Vetro Artistico di Murano

1.2.1. Tipologie di lavorazioni e di prodotti

Le tipologie di lavorazione artistica i cui processi di produzione e lavorazione possono essere suddivisi sono principalmente tre, di seguito presentate in base alla crescente artigianalità, frequenza e consumo di gas naturale:

- Vetro cavato a cucchiaino:

Questa procedura viene utilizzata per realizzare lavorazioni a piastra, canne piene e cave, lastre, oggetti massicci, tendenzialmente semilavorati utilizzati poi da fornaci minori che non utilizzano composizioni in fusione ma portano in fusione il cotisso, le graniglie o utilizzano le canne per la lavorazione a lume.

- Vetro cavato a canna per la produzione di canne:

La tiratura della canna di vetro viene effettuata in fornace dalle maestranze, partendo da una massa di vetro che viene lavorata in canne a diametro variabile, fino a

lunghezze di qualche decina di metri, con una lavorazione simile alla trafilatura. Le canne possono essere trafilate piene o vuote: la lavorazione è un processo guidato da un maestro artigiano per poter mantenere il diametro più costante possibile, poiché un'eventuale strizione comporterebbe danno alla filigrana o alla fantasia in caso di canna millefiori.

- Vetro cavato a canna per produzioni diverse:

Quest'ultima procedura è la più artigianale, poiché vi è l'azione diretta delle maestranze e la massima iterazione tra forno e operatori. La maggior parte dei manufatti viene prodotta con la cavatura a canna da due tipi di forni: a vasca, anche chiamata day-tank e a crogiolo. Tali forni sono differenti nelle taglie e nei consumi per motivi costruttivi e per la loro diversa capienza di vetro fuso pronto per la lavorazione. Da questo tipo di lavorazione derivano tutti i prodotti finiti artigianali come elementi per l'illuminazione, oggettistica (vasi, vassoi, stoviglie) e elementi scultorei.

1.2.2. Tipologie di forni

I forni di fusione e di lavorazione utilizzati nel settore del vetro Artistico sono di dimensioni variabili da kg. 100 a kg. 2.400 e la loro capacità produttiva varia in funzione della tipologia di articolo che si vuole produrre.

Si evince quindi che dovendo produrre semilavorati come oggetti massicci, piastre, canne ecc., lo svuotamento del forno può essere anche giornaliero e prevedere quindi una fusione al giorno. Diversamente, se si producono piccoli oggetti che richiedono tempi di manipolazione più lunghi, la capacità del forno può bastare per lavorare anche 4/5 gg.

I due tipi di forno utilizzati nella produzione del vetro Artistico sono i Forni a Crogiolo e i Day tank.

- Forno a crogiolo: è costituito da uno o più crogioli di refrattario, anche di dimensione diversa tra loro, poggiati sulla base del forno vero e proprio. Il bruciatore posto alla base diffonde la fiamma nel forno e attorno ai crogioli. Tale diffusione garantisce un'omogeneità di riscaldamento del crogiolo stesso, garantendo quindi una temperatura uniforme del vetro e di conseguenza una qualità migliore. I forni a crogiolo sono i più diffusi, le taglie più frequenti sono le 150-300 kg. Tale tipologia di forno ha una vita media di 7-10 anni, il refrattario comunque dev'essere sostituito ogni 0.5 – 1 anni.

La caratteristica peculiare di un forno a crogiolo è che permette ad un unico forno di contenere crogioli di vetro fuso di colori diversi.

- Forno Day tank è costituito da una vasca in refrattario che contiene il vetro fuso (quadrata o circolare per miglior uniformità) e da un bruciatore posto al di sopra del livello del vetro. Tale configurazione provoca sia nella vasca di vetro fuso che nell'atmosfera del forno una certa stratificazione termica, che provoca un peggioramento della qualità del vetro, che risulta non essere sempre esente da corde (difetti dovuti a righe di composizione differente) e altre impurità. Inoltre, essendo presente un'unica vasca all'interno del forno, la versatilità di lavorazione e i colori a disposizione sono notevolmente ridotti, spesso il day-tank è utilizzato per il vetro trasparente. Il vantaggio principale del forno day-tank è il consumo specifico minore rispetto ai forni a crogiolo, poiché le taglie sono maggiori. La vita utile del forno di tipologia day-tank è maggiore rispetto ai forni a crogiolo, con una vita media di 10-15 anni.

Gli aspetti tecnologici specifici verranno affrontati nel capitolo 4.

1.2.3.Fasi di lavorazione (durata e temperature caratteristiche)

Le materie prime principalmente impiegate sono:

- Vetrificanti: sabbie silicee adeguatamente trattate e purificate, che compongono circa il 70% della carica
- Fondenti: carbonato di sodio
- Stabilizzanti: silico-alluminati di sodio e/o potassio, carbonato di calcio, dolomite
- Affinanti: composti dell'Arsenico, sostituiti da composti dell'Antimonio,
- Coloranti: composti del Cadmio, Cobalto, Cromo, Nickel, Piombo, Rame, Alluminio
- Rottame di vetro proveniente dagli scarti di produzione

Identificare la precisa composizione del materiale che fonde è pressoché impossibile, poiché si tratta di informazione segreta e diversa per ogni fornace.

Processo di produzione del vetro artigianale

- **Fondita**

La prima fase di lavorazione del vetro artigianale prevede la composizione dei vari minerali da specialisti chiamati fonditori. Tale lavorazione avviene fuori dall'orario di lavoro tradizionale e solamente se richiesto, ovvero in caso di esaurimento dello strato qualitativamente adatto (solo i primi 10 cm di fuso sono utilizzabili) oppure in caso di cambio colore del vetro fuso, in questo caso la procedura che prevede il completo svuotamento del crogiolo con l'eventuale pulizia e il successivo caricamento è più energeticamente dispendiosa.

Fasi della fondita:

- Riscaldamento del forno: avviene nell'ora del cambio turno, il forno viene portato dalla temperatura di lavorazione (1100 °C) alla temperatura di carico (1300 °C);
- Carico: il carico della composizione avviene a scaglioni per non abbassare troppo la temperatura e fare in modo che i minerali non “sprofondino” nel letto fuso compromettendo l'intera fusione. Durante il carico, la temperatura tende a calare a causa dell'assorbimento del calore latente di fusione;

- Fusione: la fusione vera e propria della composizione avviene a temperature comprese tra i 1350 e i 1430 °C, tale temperatura e il tempo di mantenimento possono variare sensibilmente con il colore del vetro e la percentuale di rottame impiegata (più rottame viene utilizzato, meno calore latente di fusione viene richiesto). La temperatura di fusione, nei sistemi a regolazione non automatica, viene regolata “ad occhio” dal fonditore, che agisce ripetutamente sulla valvola di apertura del combustibile per ottenere il livello desiderato. La fusione dura dalle 4 alle 7 ore. Nei sistemi automatici, la regolazione agisce adattando il carico richiesto dalla fase della fondita in maniera più corretta e senza continui aggiustamenti;
- Affinaggio: l’ultima fase della fondita riguarda l’affinaggio che serve ad eliminare le bolle di gas intrappolate all’interno del vetro fuso. Il vetro fuso viene portato per 2-3 ore a 1100-1180 °C per poter favorire il rilascio delle bolle o la diminuzione di dimensione.

- **Lavorazione**

La lavorazione del vetro vera e propria è la fase in cui vi è la maggior interazione operatore-forno. In questa fase, il vetro fuso, mantenuto mediamente a 1100 °C, viene prelevato a cucchiaio o a canna dagli operatori e i manufatti vengono riscaldati per essere lavorati. Talvolta per caratteristiche sfavorevoli del forno o per maggiori richieste di riscaldamento del manufatto, la temperatura viene portata anche a temperature superiori a 1270 °C.

- **Mantenimento**

La fase di mantenimento avviene quando si deve appunto mantenere la carica di vetro fuso in stand-by, pronta per essere lavorata. Si tratta di una fase meno dispendiosa, poiché il forno viene chiuso e la temperatura mantenuta a 1100 °C.

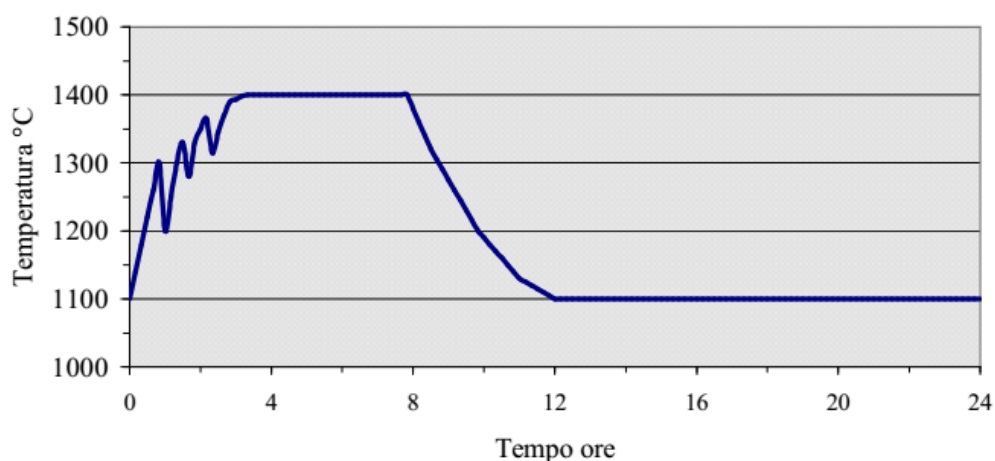


Figura 1 – Ciclo termico tipico di un forno per il vetro lavorato a mano (Dall'Igna, D'Este, & Maurina, 2012)

Dal ciclo termico si può capire che il vetro richiede temperature estremamente elevate, raggiungibili solo con una corretta combustione. Finora il metodo più semplice ed economico per ottenere tali temperature è stato il preriscaldamento dell'aria comburente. I livelli di consumo nelle varie fasi, trattati nel capitolo 3 e le oscillazioni di levata comportano l'impossibilità di progettare un impianto efficiente di preriscaldamento dell'aria, che risulta essere quindi sottodimensionato, ottenendo un preriscaldamento medio dell'aria di circa 250 °C.

Le seguenti immagini sono riferite a forni reali, misurati durante la conduzione della campagna misure e ottenute tramite nanodac.

Nella figura 2, si può vedere un ciclo termico reale di un forno day tank di media taglia: tra le ore 18.00 e 20 vi è il preriscaldamento e il carico (a cui corrisponde un picco verso il basso dovuto al raffreddamento del forno per l'immissione delle sabbie), dalle ore 20.00 fino alle 03.00 si procede con la fusione della carica, in questa fase la temperature raggiungono i valori massimi (fino a 1450 °C) ed è quindi la fase più dispendiosa dal punto di vista energetico. Segue una fase di affinamento, fino alle 08.00 quando inizia solitamente il turno di lavoro all'interno della fornace. Spesso tra le 12.00 e le 13.00 i forni vengono portati ad un regime minimo di mantenimento, dove si registrano quindi i consumi minimi.

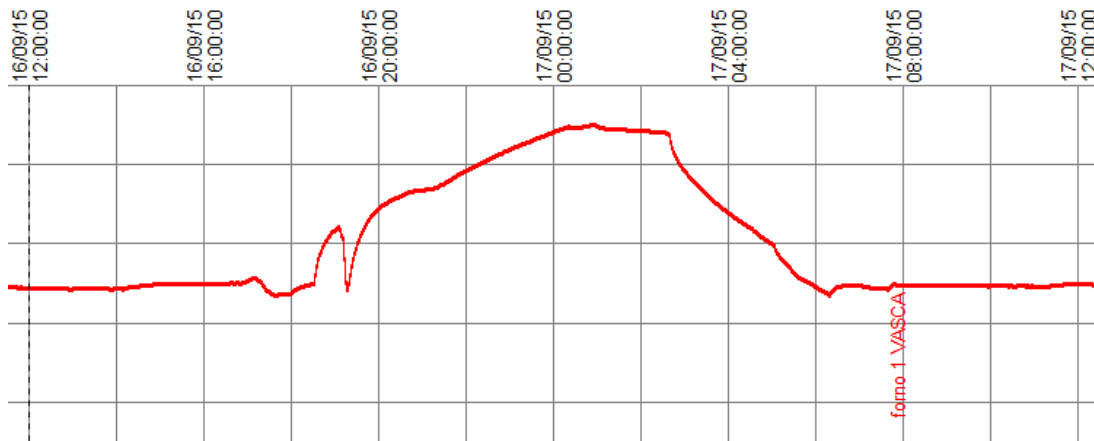


Figura 2 – Ciclo termico reale di un forno Day Tank

Per quanto riguarda il forno a crogiolo della figura seguente, il ciclo può dirsi simile al precedente, qui si tratta di un forno obsoleto e di taglia piccola: i picchi di abbassamento tra le ore 18.00 e le ore 22.00 identificano una serie di cariche successive, distribuite per ottenere qualità di vetro migliori.

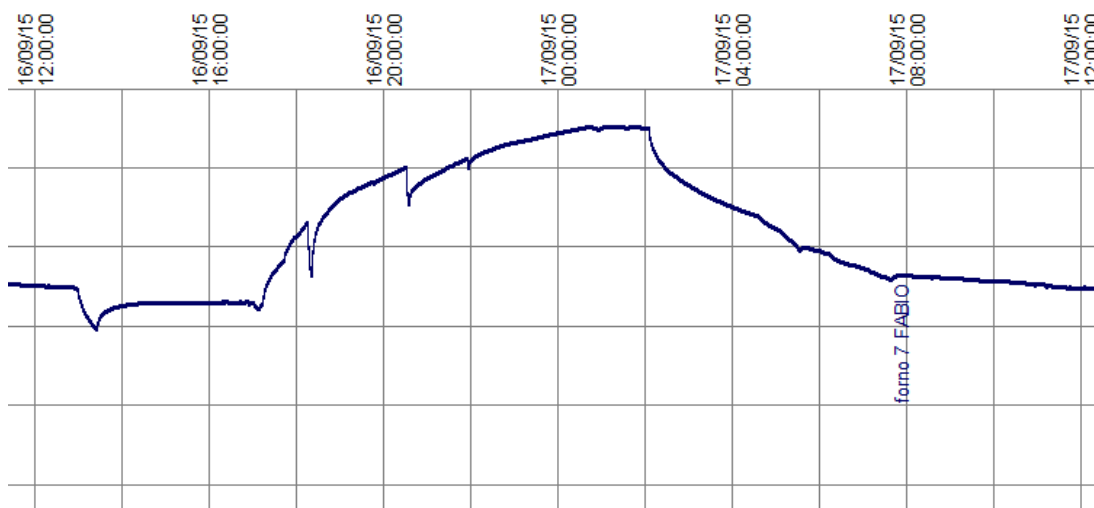


Figura 3 – Ciclo termico reale di un Forno a Crogiolo

CAPITOLO 2 – INDAGINE PRELIMINARE ED ELABORAZIONE QUESTIONARI

2.1. Raccolta dati, tipologia di questionario e indagine sui consumi energetici

Nello studio della potenzialità di un investimento è fondamentale essere a conoscenza del parco installazioni attuale. L'indagine è stata svolta con il concerto del consorzio PromoVetro, S.E.I. ESCo e ENEA. Gli scopi principali di questa campagna di misure, condotta nell'arco di quattro mesi, sono stati:

- La presentazione di una bozza di guida operativa per il Settore di Produzione del Vetro Artistico, rientrante nella Presentazione dei progetti a Consuntivo (PPPM), previsti dal *Decreto del Ministero Sviluppo Economico 28.12.2012, art. 15 comma 2*;
- La conoscenza del parco macchine attuale, per poter valutare, qualitativamente e quantitativamente l'investimento;
- La caratterizzazione energetica del distretto delle vetrerie artistiche del consorzio.

2.1.1. Tipo di questionario e somministrazione

I questionari sono stati somministrati alle aziende del consorzio PromoVetro in seguito a una prima presentazione del progetto da parte di S.E.I. ESCo. Il Consorzio PromoVetro di Murano nasce nel 1985, con il patrocinio della Confartigianato di Venezia, da un'iniziativa di un gruppo di imprese artigiane impegnate nella produzione di vetro artistico di Murano. Nel corso degli anni è divenuto un'importante realtà consortile, tanto da annoverare tra i suoi soci le due principali associazioni di categoria del settore vetro, Confartigianato Venezia e Confindustria Venezia. Rappresenta attualmente una cinquantina di aziende artigiane ed industriali muranesi e veneziane.

I questionari, compilati direttamente dalle aziende interessate, hanno previsto le seguenti sezioni:

- Dati generali dell'azienda: nome della società e dello stabilimento, indirizzo dello stabilimento, nome e funzione aziendale del referente, contatti, il numero di dipendenti, l'iscrizione all'albo imprese artigiane;
- Produzione: presenza sistema automatico di emissioni e temperatura forni, presenza di sistema gestionale delle ore di funzionamento dei forni, la quantità di vetro cavato e la quantità di vetro finito annui, la quantità di cotisso impiegato

(nel caso di lavorazioni da cotisso e non da fondita) e la percentuale media di rottame utilizzato;

- Dati energetici. Per quanto riguarda l'energia elettrica sono stati indagati: la potenza massima assorbita nell'anno in kW, l'energia elettrica consumata annualmente in MWh/anno, la spesa annua in €/anno e le eventuali penali per energia reattiva immessa in rete. Per l'energia termica da gas naturale, si sono indagati i consumi annui in Sm³/anno e la spesa annua in €/anno.
- Dati sui forni: Tipologia di forno (crogiolo o day tank), per ogni forno segnalato: capacità in kg, anno di ultimo rifacimento (inteso come intervento maggiore di manutenzione straordinaria), presenza di recuperatore, presenza di regolazione automatica della combustione, presenza del contatore gas a bordo forno, il numero di fusioni medio a settimana, il ciclo tipico di un giorno lavorativo (ore/giorno di fusione, lavorazione, mantenimento) e il numero giorni lavorati, passati in mantenimento o fermi annualmente dal forno in questione;
- Indagine sulle utenze elettriche, soprattutto ventilatori dell'impianto di aspirazione, altri motori elettrici per il taglio, la lavorazione o utenze come pompe e i compressori dell'impianto aria compressa;
- La presenza di servizi centralizzati come la centrale termica, l'impianto di produzione aria compressa e l'aspirazione centralizzata.

2.1.2. Tipo campione

L'indagine ha coinvolto 11 aziende appartenenti al consorzio, per un consumo complessivo di 7000000 Sm³ equivalenti di gas naturale. Tale indagine ha permesso di valutare il 70% dei consumi totali del Consorzio. La produzione tipica del campione di aziende riguarda prodotti per l'illuminazione, oggettistica e una fornace produttrice di semilavorati (cotisso, canne, millefiori).

2.1.3. Dati ottenuti e risultati dell'indagine

I dati ottenuti hanno permesso di fotografare in maniera adeguata la situazione attuale delle fornaci aderenti e del consorzio.

Dal lato occupazionale, il valore minimo di addetti nelle aziende indagate è 5, il massimo è di 83, mentre la media è di 24 dipendenti, da cui si deduce che il campione riguarda una varietà di realtà di occupazione muranese, dalla fornace a conduzione pressoché familiare alla realtà con un mercato su scala mondiale.

Interessanti sono i risultati ottenuti da successive elaborazioni:

Tabella 1 - Dati annuali triennio 2011/2012/2013

QUESTIONARIO VETRERIE	2013			2012			2011		
DATI DISPONIBILI	MIN	MAX	MEDIA	MIN	MAX	MEDIA	MIN	MAX	MEDIA
% media tipica di rottame riutilizzato	0,50	30,00	17,00	0,50	30,00	17,88	0,50	30,00	17,88
costo specifico gas [€/t prodotto finito]	1155,81	21739,13	8302,36	1125,81	21739,13	8266,03	1053,57	21739,13	7845,19
costo specifico gas [€/t vetro cavato]	704,29	10869,57	3699,31	681,57	10869,57	3735,53	641,30	10869,57	3531,13
costo unitario energia elettrica [€/MWh]	168,25	250,00	210,15	176,50	264,63	213,11	146,46	207,60	177,61
costo unitario gas [€/Sm3]	0,32	0,45	0,37	0,31	0,40	0,37	0,31	0,39	0,35
energia elettrica consumata [MWh/anno]	40,00	431,49	167,57	39,78	457,00	187,45	40,00	541,44	168,56
gas naturale [Sm3/anno]	123000,00	2108212,00	707003,22	125000,00	1839665,00	745725,13	128000,00	2394965,00	829488,00
potenza massima assorbita nell'anno [kW]	35,00	39,00	37,00	20,00	39,00	29,50	20,00	38,00	29,00
quantità cotisso impiegato [ton/anno]	0,80	3,60	2,20	0,80	3,85	2,33	0,80	3,95	2,38
quantità vetro cavato all'anno [ton/anno]	4,60	1070,00	180,42	4,60	925,00	185,10	4,60	1150,00	216,23
quantità vetro finito prodotto [ton/anno]	2,30	652,00	97,49	2,30	560,00	98,05	2,30	700,00	115,80
spesa annua per energia elettrica [€/anno]	8651,39	74368,00	31682,06	8904,58	76958,00	34398,93	7490,00	79300,00	26963,23
spesa annua per gas naturale [€/anno]	50000,00	753588,00	259094,56	50000,00	666780,00	269722,13	50000,00	737500,00	268317,50

Tabella 2 - Dati totali annuali per consumi e produzioni

QUESTIONARIO VETRERIE	TOTALE ANNUALE		
DATI DISPONIBILI	2013	2012	2011
energia elettrica consumata [MWh/anno]	1172,977	1124,684	842,783
gas naturale [Sm3/anno]	6363029	5965801	6635904
quantità cotisso impiegato [ton/anno]	4,4	4,65	4,75
quantità vetro cavato all'anno [ton/anno]	1623,8	1480,8	1729,8
quantità vetro finito prodotto [ton/anno]	877,4	784,4	926,4
spesa annua per energia elettrica [€/anno]	221774,39	206393,58	134816,14
spesa annua per gas naturale [€/anno]	2331851	2157777	2146540

• Produzione annuale

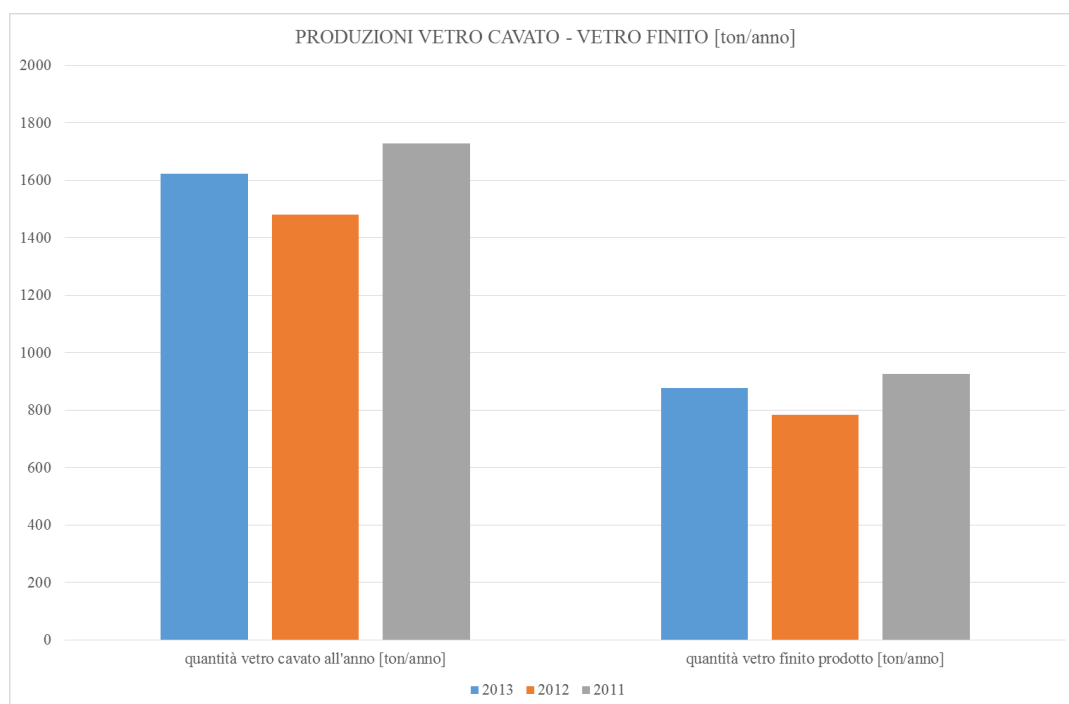


Figura 4 - Confronto produzioni vetro cavato/prodotto finito nel triennio considerato

La figura rappresenta l'andamento della produzione nel triennio 2011/2012/2013: l'incidenza della crisi economica sulla produzione non è determinante e comunque dimostra un trend in aumento rispetto ai minimi del 2012. È interessante notare che la produzione di vetro cavato non corrisponde assolutamente alla quantità di vetro del prodotto finito, una certa quantità di cavato entra effettivamente a far parte della produzione in fasi successive del prodotto, ma molte parti dell'oggetto creato servono come supporto, come base per il maestro del vetro. Tali parti vengono poi tagliate e ridotte in frantumi per poter essere reintrodotte nel forno e rifuse nel forno come fornace. Non è possibile utilizzare una quantità troppo alta di rottame, poiché nella rifondita il materiale potrebbe non amalgamarsi correttamente o potrebbe portare inclusioni, difetti o altre distorsioni al vetro.

- **Costi energetici:**
 - **Energia elettrica**

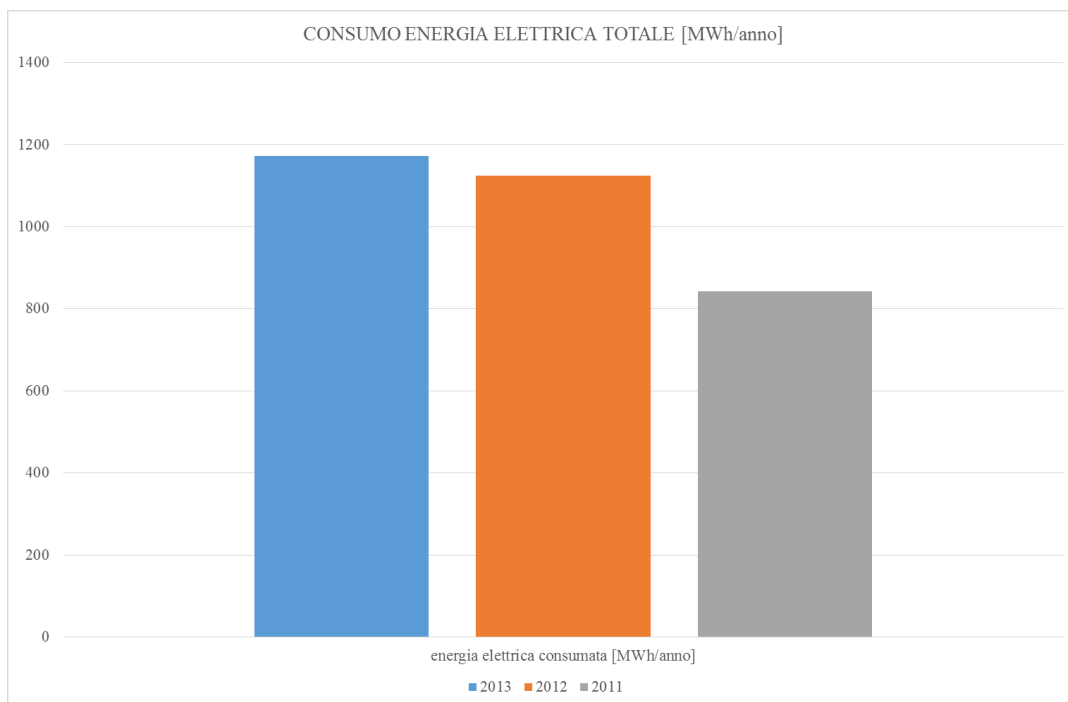


Figura 5 - Consumo totale energia elettrica

La componente di spesa energetica minore riguarda l'energia elettrica, infatti gli interventi previsti sono solo a riduzione della spesa dovuta al gas naturale. Non sono però certo da ritenersi esigui, infatti il consumo annuale è salito del 40% nel corso del triennio, considerando però anche la riapertura di una fornace.

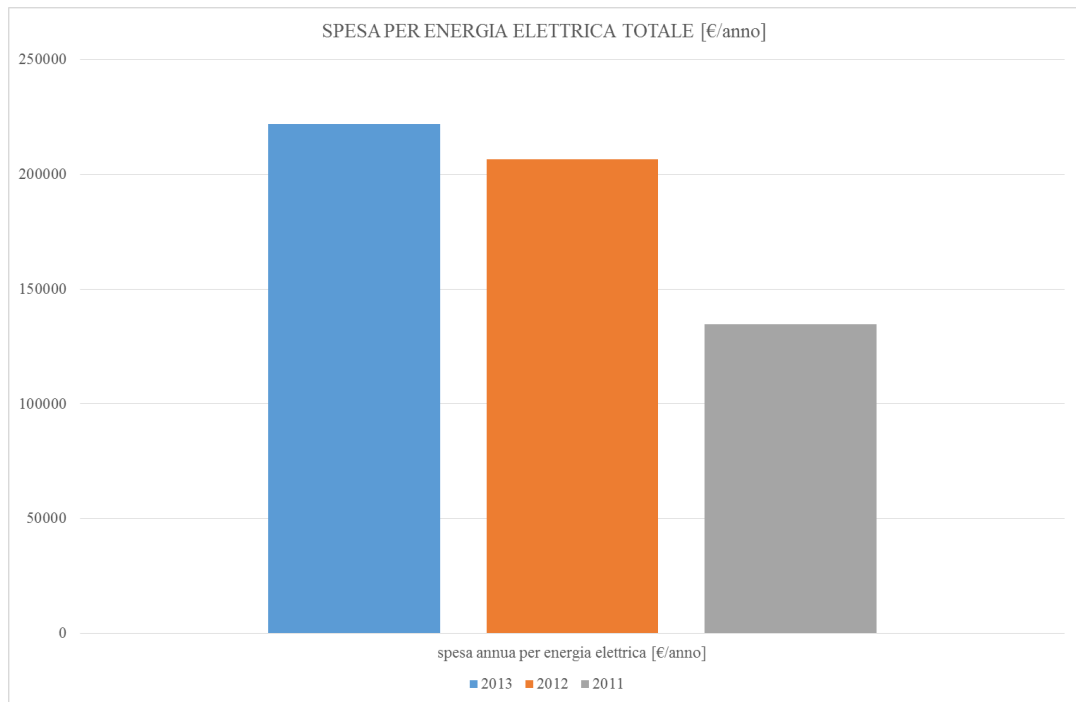


Figura 6 - Spesa annuale totale energia elettrica

La spesa totale per l'energia elettrica è cresciuta al pari passo con i consumi.

La situazione però non è la stessa in tutte le aziende componenti il consorzio, si possono identificare costi diversi per fornace, infatti il consumo, il costo unitario per MWh e la spesa annua per l'energia elettrica variano anche di molto.

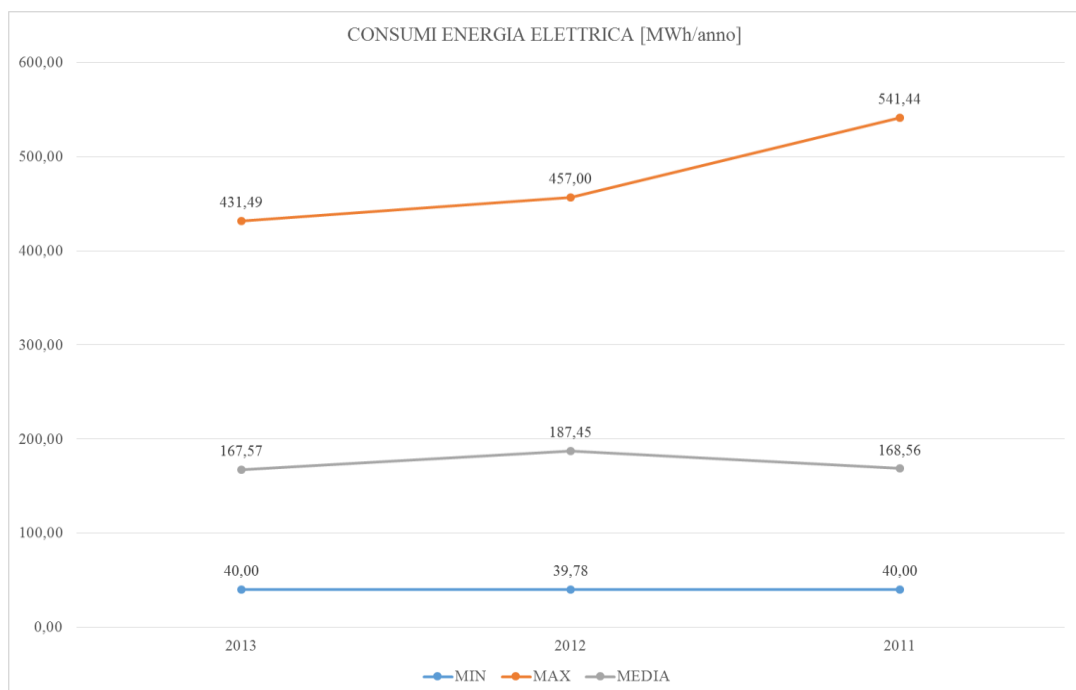


Figura 7 - Consumi minimi - massimi - medi di energia elettrica nel campione

I consumi minimi e medi sono pressoché rimasti costanti nel corso del triennio, paradossalmente sono stati i consumi massimi a calare notevolmente.

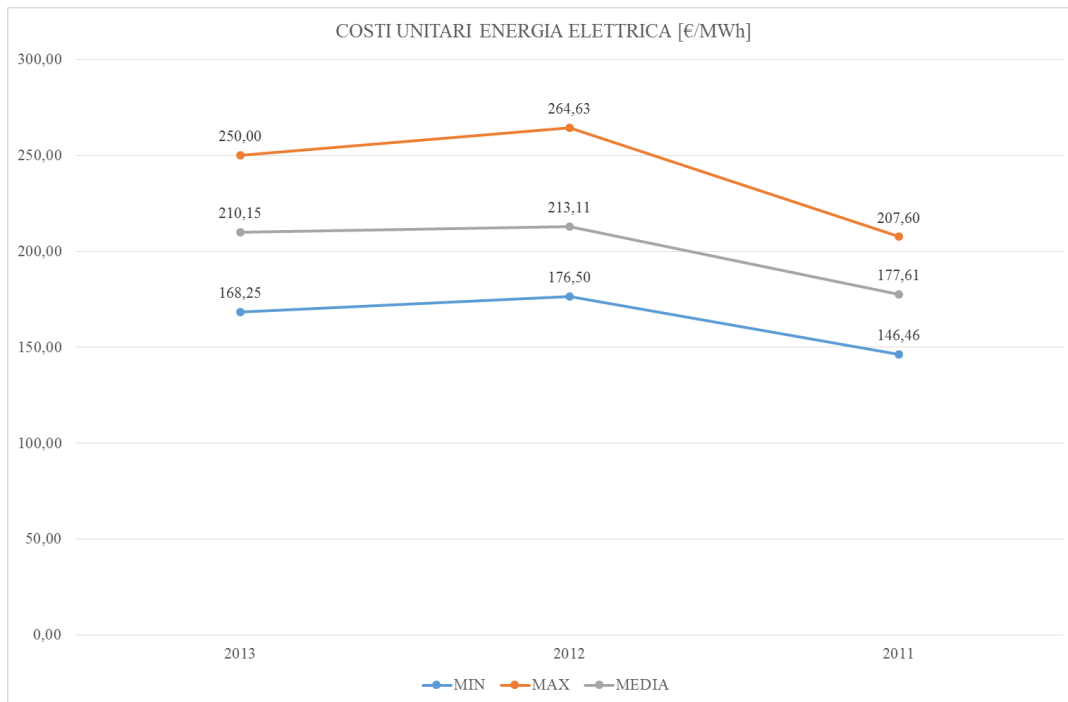


Figura 8 - Costi unitari minimi - massimi - medi per l'energia elettrica nel campione

I costi unitari per la fornitura dell'energia elettrica sono variati di molto soprattutto per quanto riguarda la fascia massima. Dall'elaborazione, si evince che è il costo unitario per MWh è di molto maggiore per le fornaci con bassi volumi di consumo e di produzione, penalizzando quindi proprio la fascia più artigianale e a conduzione familiare. Potrebbe essere interessante lo studio di una tariffa unica contrattuale consortile per la componente elettrica dell'energia come strumento di risparmio per chi già ha una spesa inferiore e come volano economico per le aziende minori.

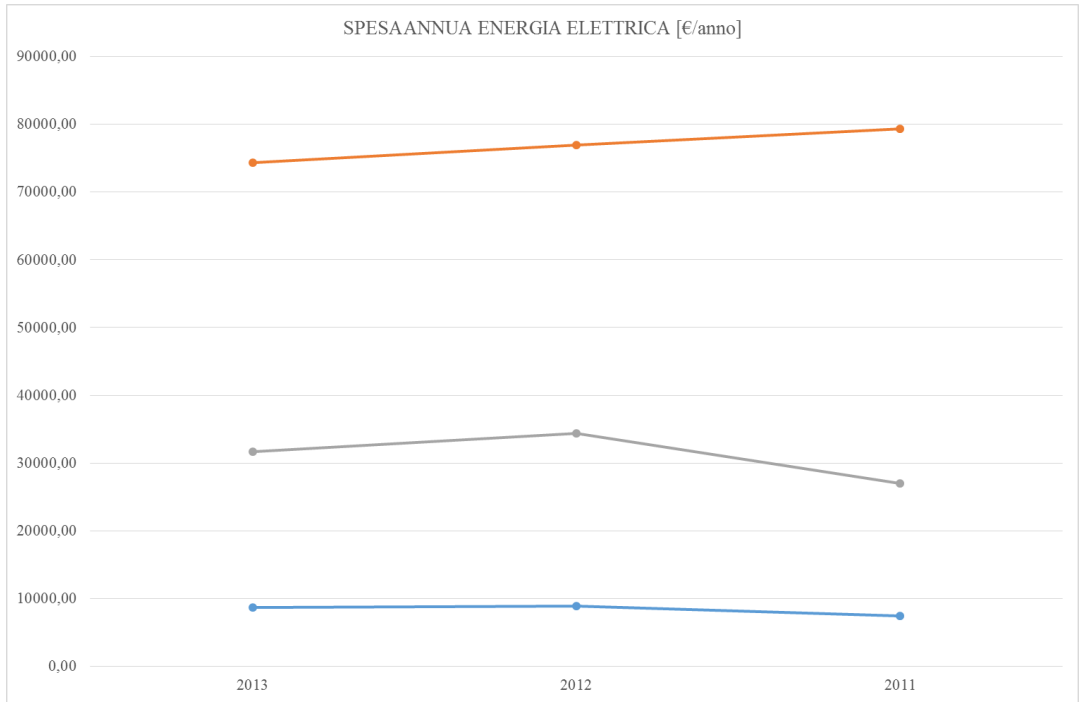


Figura 9 - Spesa annua minima - massima - media per l'energia elettrica nel campione

Sebbene i costi unitari siano aumentati negli anni, in realtà la spesa annua non è variata di molto. Il merito di questo andamento è dovuto alla diminuzione dei consumi elettrici.

- **Gas naturale**

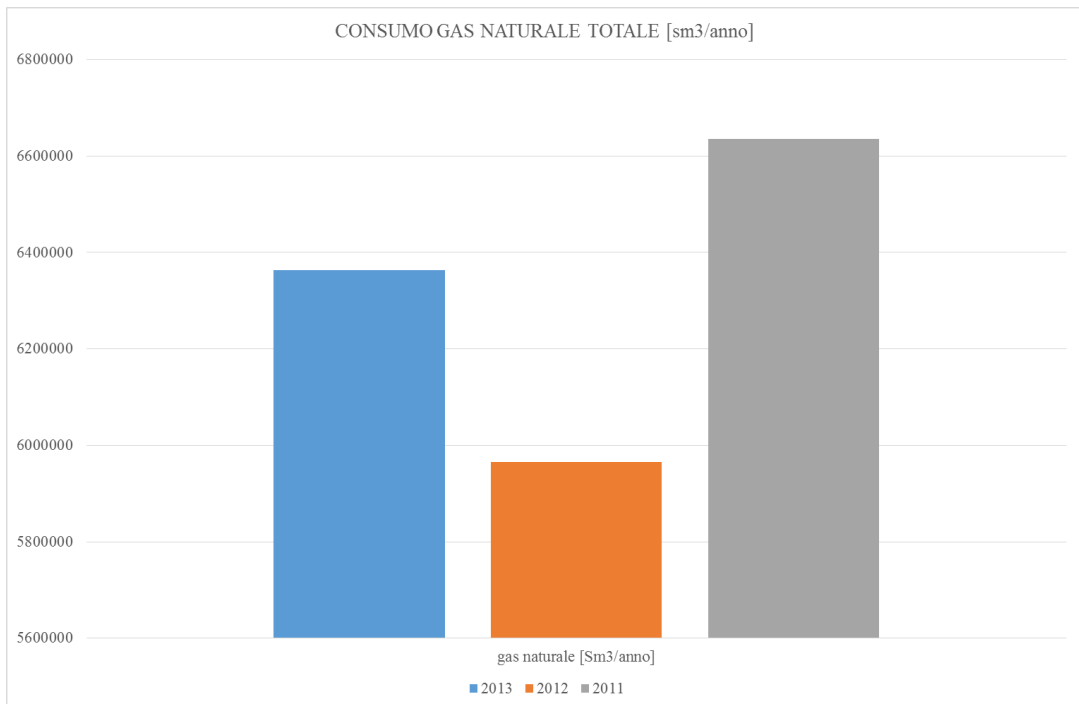


Figura 10 - Consumo totale gas naturale

La voce di spesa più importante è quella riguardante il gas naturale, prevalentemente utilizzato nei forni per la lavorazione, oggetto dell'intervento di efficientamento, e nei forni a muffola.

La deflessione di consumi nell'anno 2012 è parzialmente imputabile al calo di produzione, non di certo ad un miglioramento tecnologico.

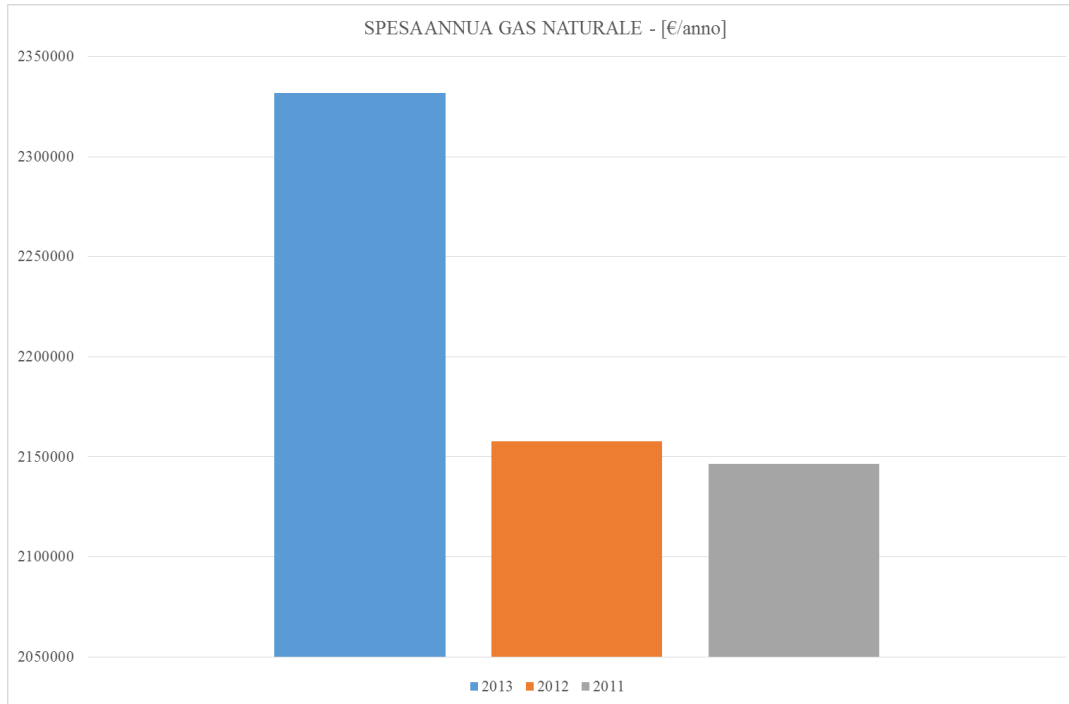


Figura 11 - Spesa annuale totale gas naturale

La spesa complessiva annuale invece è aumentata, tale aumento è imputabile sia all'apertura di nuove fornaci o alla mancata o corretta contabilizzazione del gas naturale da parte delle fornaci. Comunque si tratta di una voce di spesa importante se messa al confronto con la spesa per l'energia elettrica: per una spesa di 2.331.851 € per il gas nel 2013, si ha avuto una spesa totale di "soli" 221.774 € per l'energia elettrica, circa il 10%.

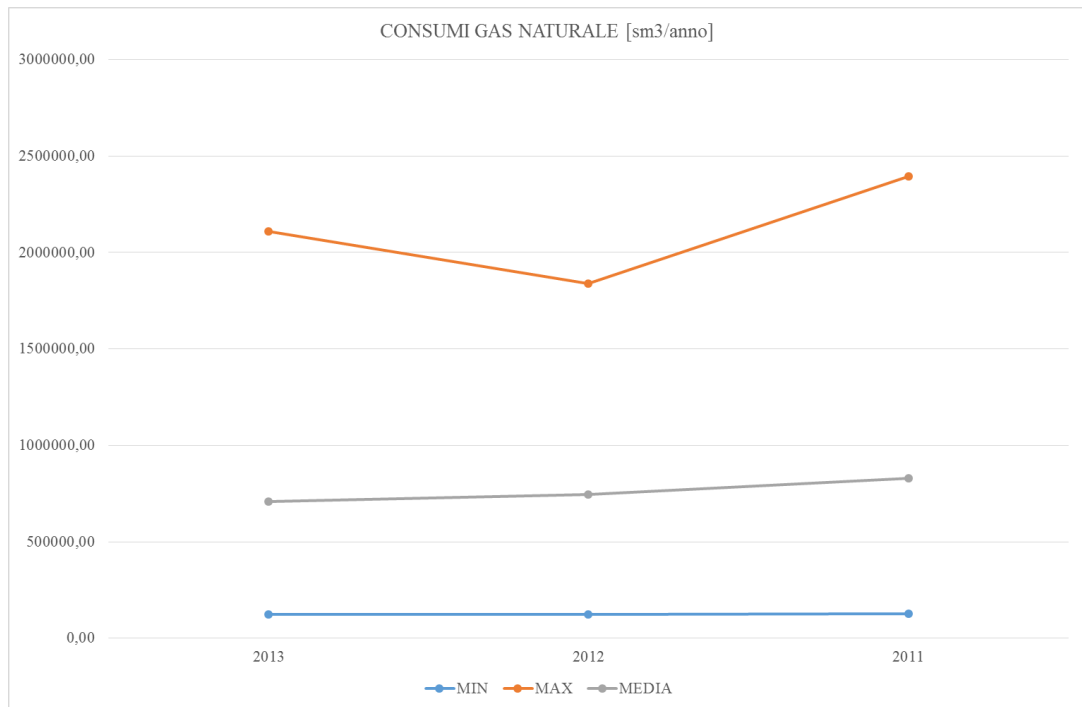


Figura 12 - Consumi minimi - massimi - medi di gas naturale nel campione

Dai consumi separati per medio e minimo, la dichiarazione di alcuni valori costanti di aziende (probabilmente stimate e non effettivamente conteggiate), non permettono considerazioni sugli andamenti. Per quanto riguarda invece in massimi, si può dire che il loro andamento è in linea con la produzione.

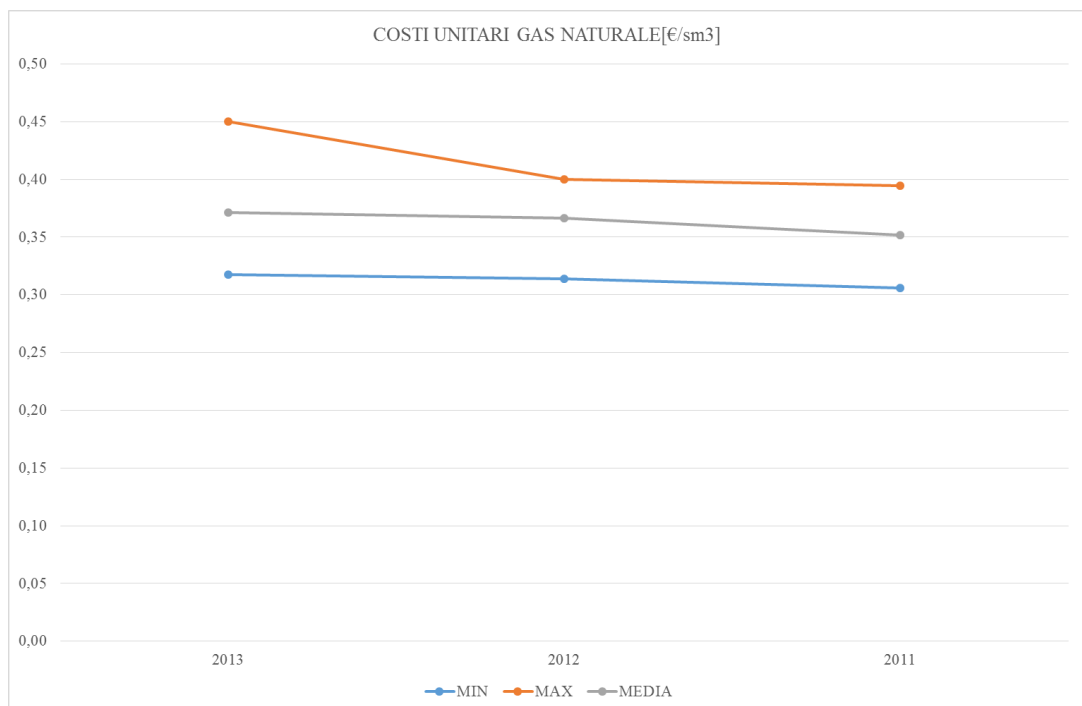


Figura 13 - Costi unitari minimi - massimi - medi per il gas naturale nel campione

I costi massimi riguardano soprattutto le aziende con bassi volumi di produzione. Non è altrettanto vero che il costo unitario minore riguardi le aziende con alti volumi di produzione, spesso dipende dal fornitore e dai contratti in atto con essi.

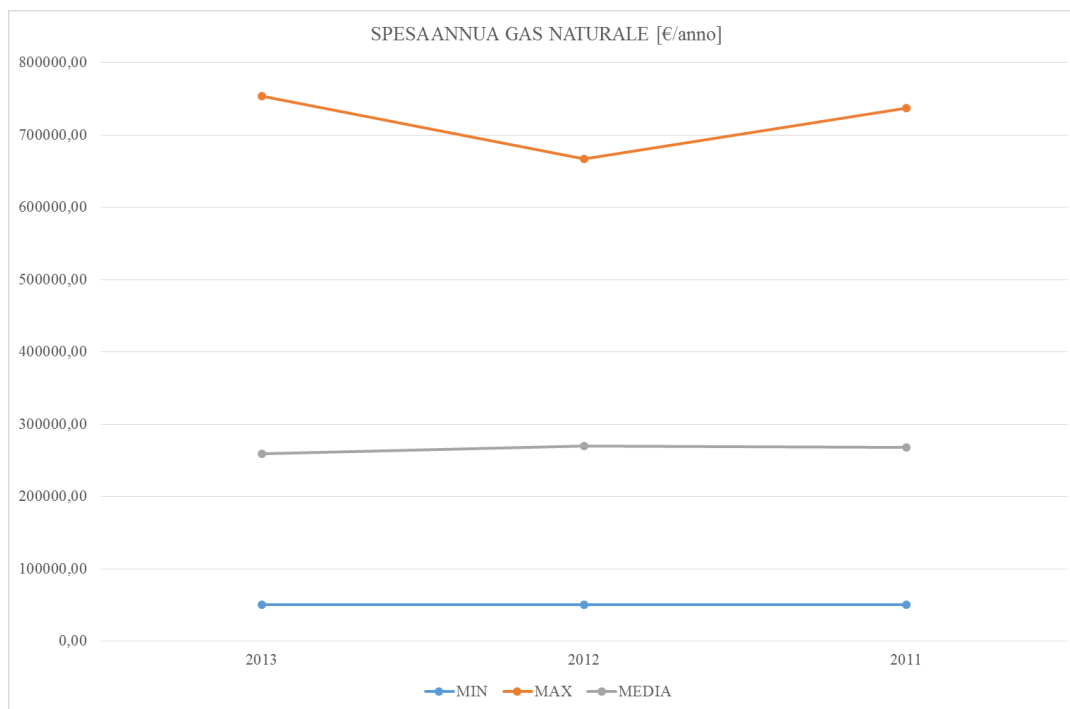


Figura 14 - Spesa annua minima - massima - media per il gas naturale nel campione

Per la spesa annuale, vale la stessa considerazione fatta per il minimo e il medio dei consumi annuali. Il massimo è in linea con i consumi e con l'andamento della produzione.

2.1.4. Considerazioni sullo stato del parco installazioni e impianti ausiliari

FORNI DAY TANK

Nell'indagine riguardante i forni day tank, il campione osservato è meno numeroso rispetto ai forni a crogiolo. Si nota che le taglie sono maggiori, fino ad avere crogioli da 24000 kg. Il campionamento dei consumi si è concentrato però su day tank di misura media, ovvero attorno ai 1200 kg, la seconda categoria più popolata.

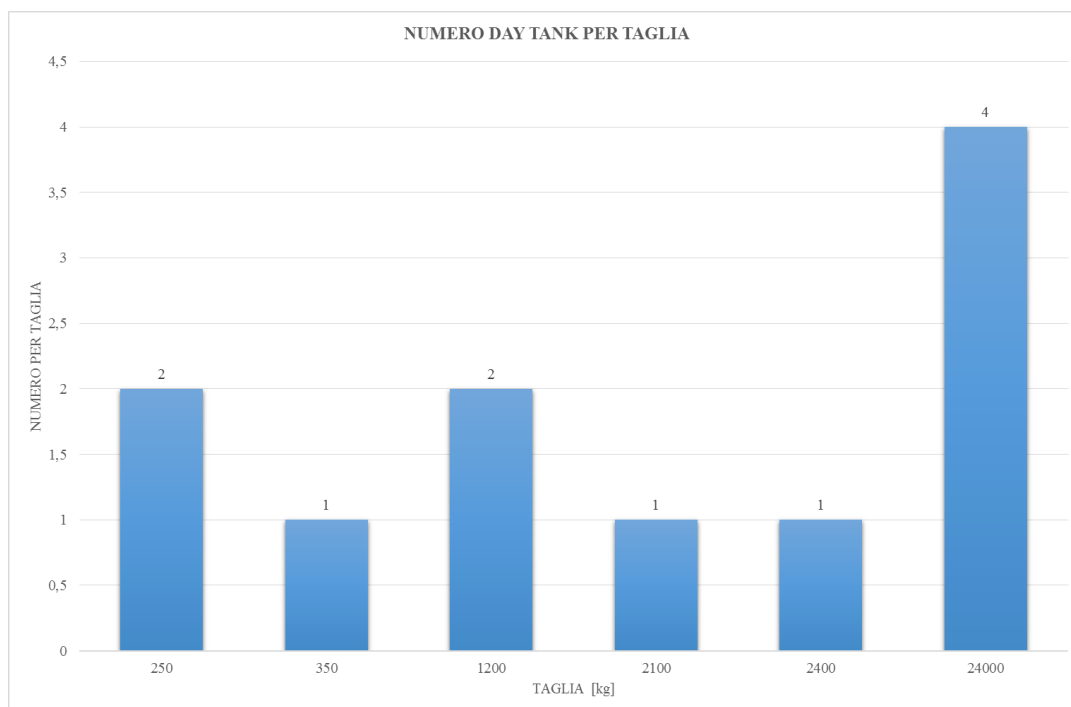


Figura 15 - Numero di day tank nel campione, suddiviso per grandezza

Lo stato tecnologico attuale dei forni day tank è migliore rispetto all'altra tipologia di forni: ben il 55% è dotato sia di regolazione di combustione che di recuperatore. Infatti, l'attenzione delle aziende si è concentrata, in passato, sulla sostituzione e miglioria degli elementi più energivori o più impiegati.

È raro trovare un forno privo di recuperatore ma con regolazione automatica: per i day tank, solo 1, mentre si vedrà successivamente che per i forni a crogiolo non è presente questa combinazione.

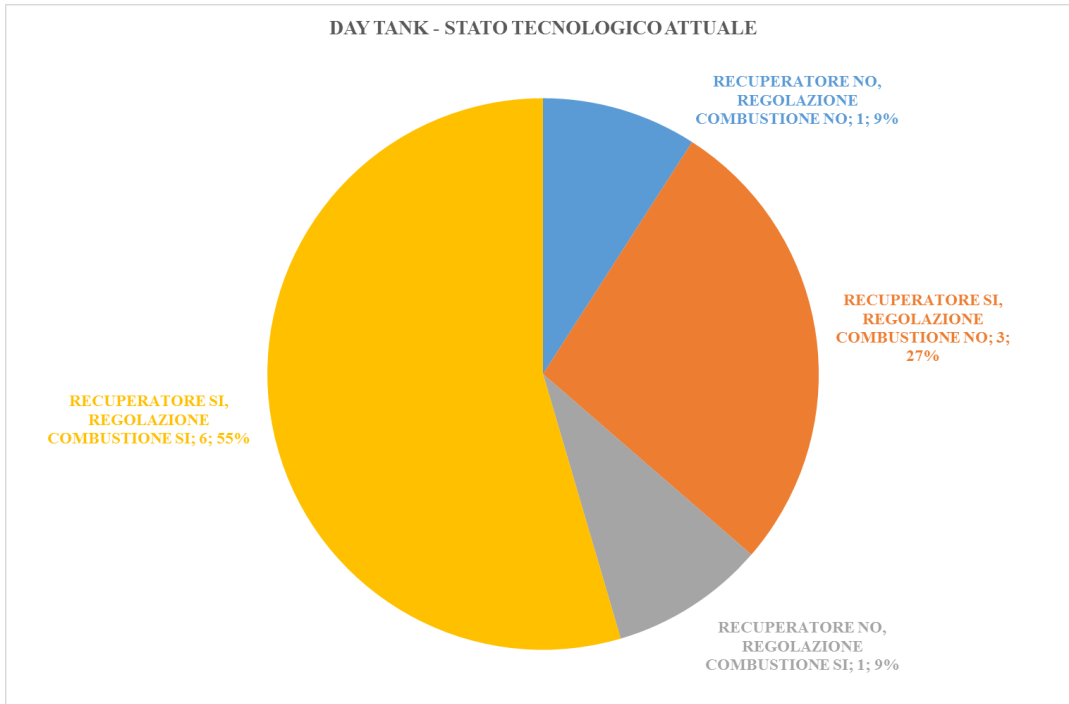


Figura 16 - Stato tecnologico attuale dei Day Tank

I recuperatori sono una tecnologia molto più diffusa (82%) rispetto alla regolazione della combustione (64%). Da questa indagine si può capire che il raggio di azione di un efficientamento energetico sui day tank è ridotto rispetto all'efficientamento sui forni a crogiolo.

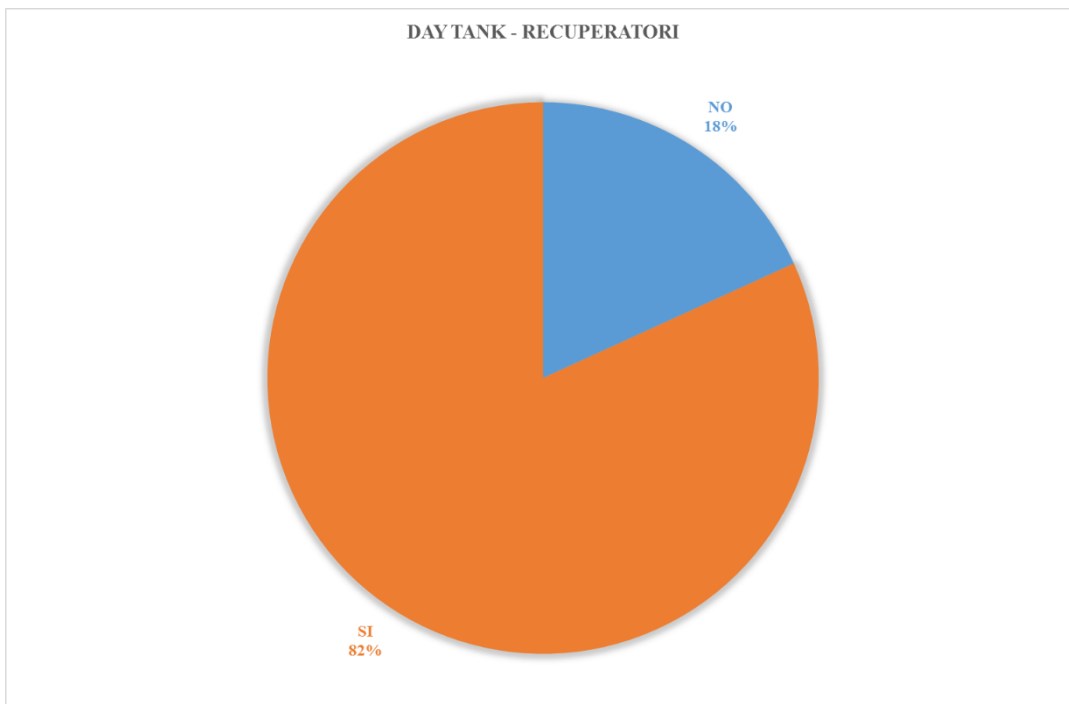


Figura 17 - Presenza di tecnologie di recupero del calore sui Day Tank

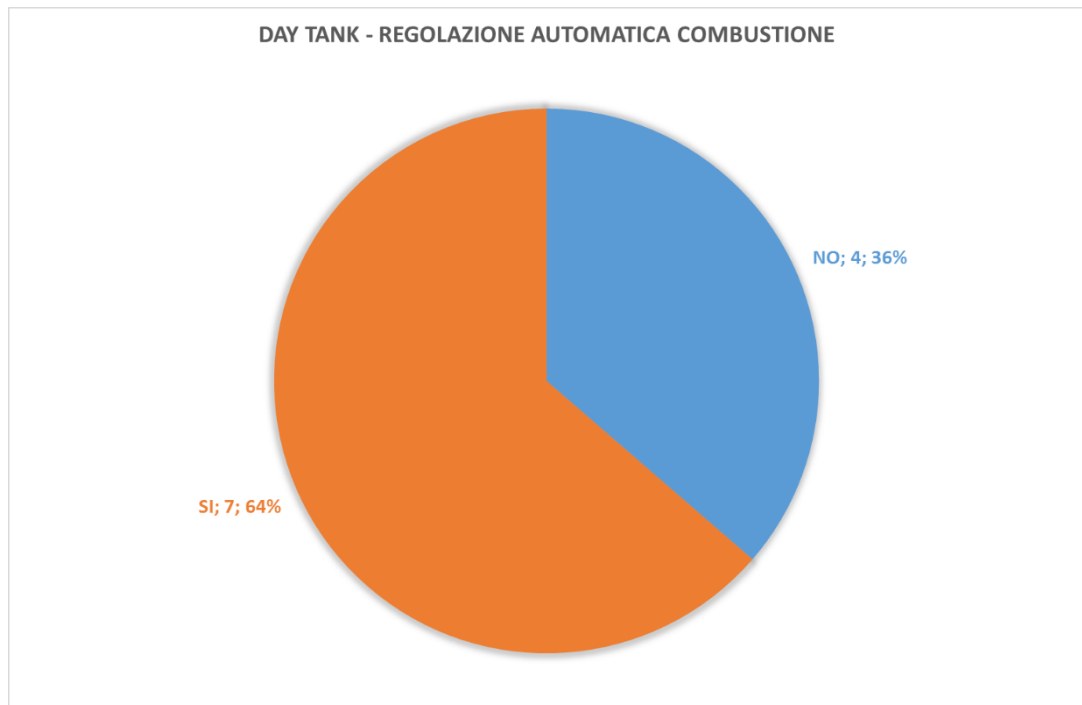


Figura 18 - Presenza di tecnologie per la regolazione automatica della combustione sui Day Tank

FORNI A CROGIOLO

Il campione di forni a crogiolo è decisamente più numeroso (47) e denota una distribuzione di taglie concentrata su un intervallo compreso tra 300 – 400 kg (26). Di conseguenza, tale intervallo è stato il più campionato anche in fase raccolta dati. Altra categoria importante è la 850 kg, in questo caso si tratta di forni considerati di taglia grande, utilizzati nella produzione di semilavorati.

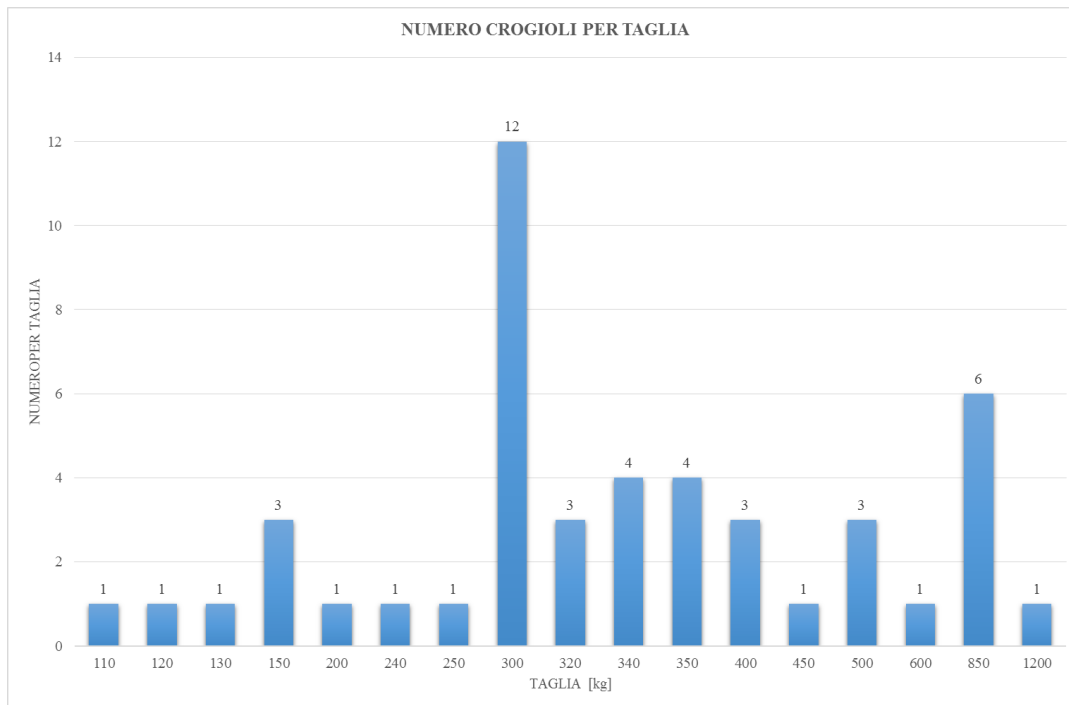


Figura 19 - Numero di forni a crogiolo nel campione, suddiviso per grandezza

L'indagine ha fotografato una condizione del parco macchine decisamente peggiore che nel caso dei forni day tank: il 54% infatti non ha né il recuperatore né la regolazione di combustione. La regolazione è assente nel 32% dei casi, mentre solo il 14% è dotato di entrambe le tecnologie. Ciò fa presupporre che il range di operazione di interventi di efficientamento sarà molto ampio e coinvolgerà un buon numero di forni e aziende del consorzio.

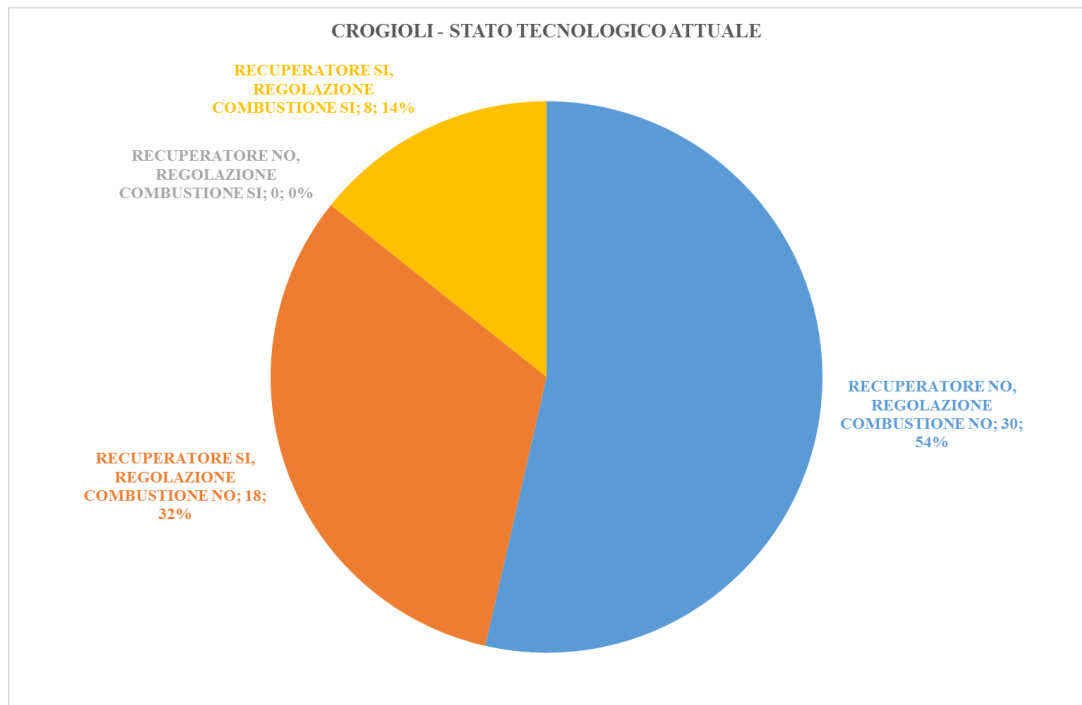


Figura 20 - Stato tecnologico attuale dei Forni a Crogiolo

I recuperatori non hanno una diffusione omogenea, ben il 54% dei forni è privo. La regolazione di combustione invece è da considerarsi rara, solo il 14% ne è in possesso.

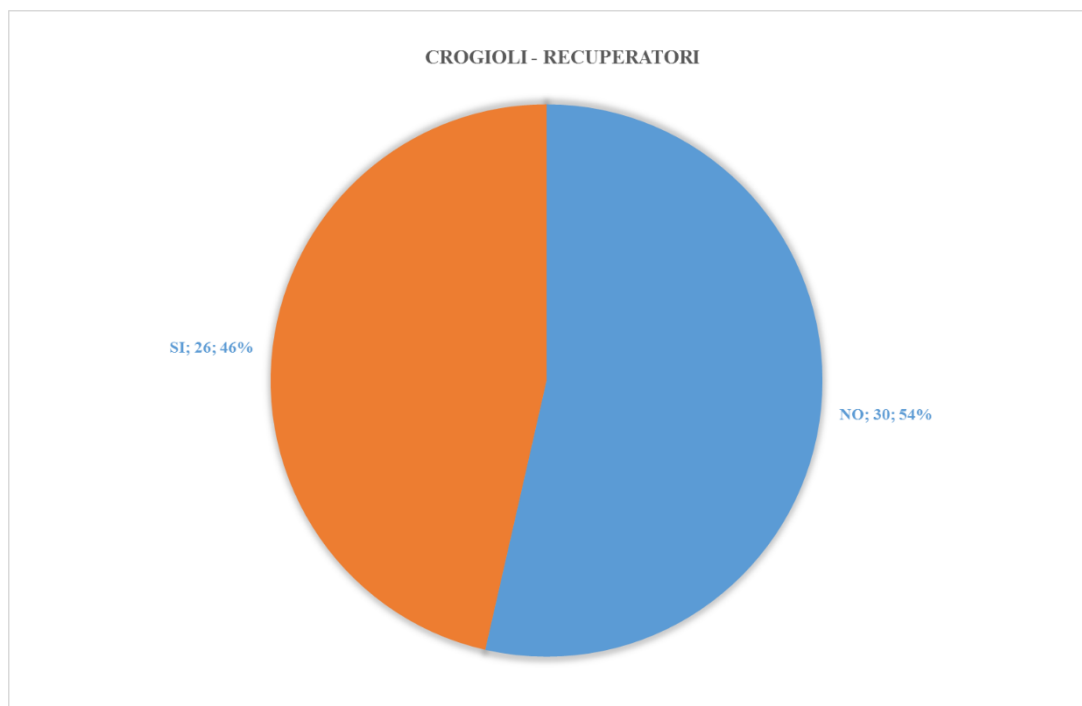


Figura 21 - Presenza di tecnologie per il recupero del calore sui Forni a Crogiolo

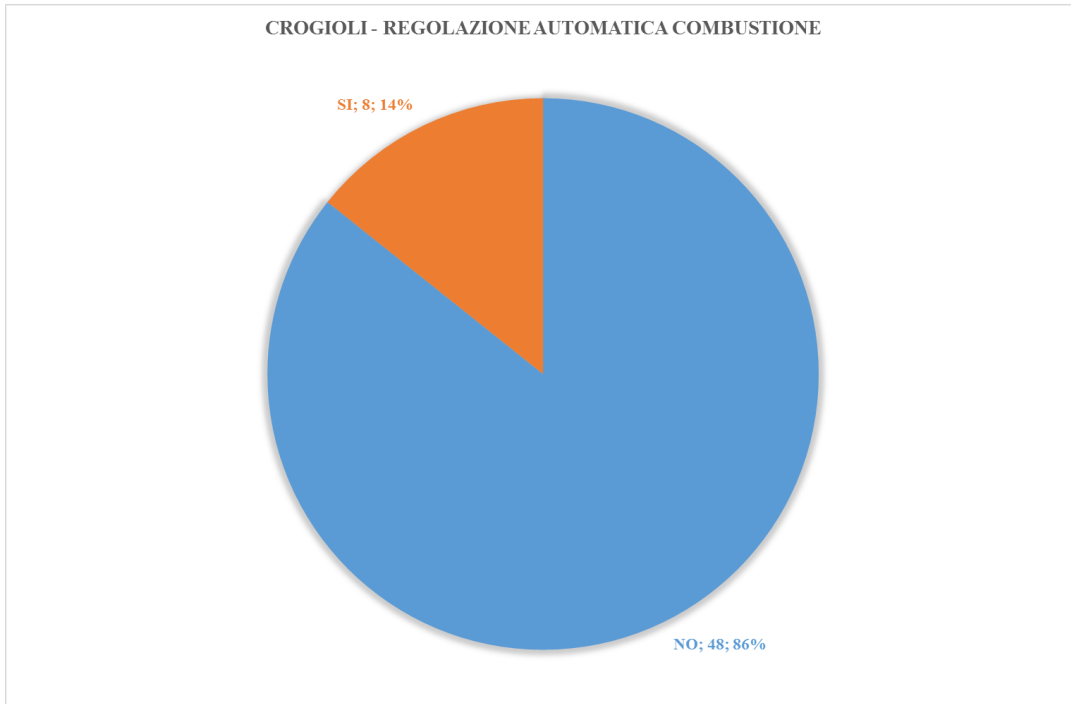


Figura 22 - Presenza di tecnologie per la regolazione automatica della combustione sui Forni a Crogiolo

ALTRI IMPIANTI – UTENZE ELETTRICHE

Altro scopo del questionario è stato quello di “fotografare” la situazione energetica del distretto. Uno degli interessi di una diagnosi energetica è stabilire il numero di utenze elettriche presenti, la loro potenza totale e la presenza di regolazione a inverter. Infatti, oltre ad agire sui consumi di gas riguardanti i forni, è anche interessante valutare le azioni sulle utenze elettriche. Tale analisi però esula dagli obiettivi di questa Tesi.

Si può affermare che, alla luce dei dati raccolti tramite questionario, il numero di motori con Inverter è sensibilmente inferiore e che sono prevalentemente occupati negli impianti di aspirazione. I 118 motori privi di regolazione inverter costituiscono quindi una base su cui poter fare efficientamento anche dal punto di vista elettrico, partendo con la sostituzione, ad esempio, di utenze funzionanti 24/24, come le aspirazioni, per poi passare a utenze funzionanti saltuariamente o durante gli orari di lavoro (8 h), come gli altri motori elettrici (mole, movimentazioni ...) e l'aria compressa.

Tabella 3 - Utente elettriche prive di tecnologia a Inverter, suddivise per impianto

Tipi utenze NO INVERTER	Quantità	Potenza totale [kW]
ALTRI MOTORI ELETTRICI	82	170,85
ARIA COMPRESSA	12	109
ASPIRAZIONE	24	39,7
Totale	118	319,55

Tabella 4 - Utente elettriche provviste di tecnologia a Inverter, suddivise per impianto

Tipi utenze SI INVERTER	Quantità	Potenza totale [kW]
ALTRI MOTORI ELETTRICI	3	5,7
ARIA COMPRESSA	1	3
ASPIRAZIONE	12	125
Totale complessivo	16	133,7

Altra operazione di efficientamento elettrico potrebbe includere una centralizzazione degli impianti, dal momento che il 20% degli impianti di aspirazione, il 44% delle centrali termiche e il 33% degli impianti di aria compressa centralizzata non sono centralizzati.

2.1.5. Consumi energetici globali

Tabella 5 - Consumi energetici annuali e specifici per il triennio 2011-2013

CONSUMI ENERGETICI	TOTALE ANNUALE		
	2013	2012	2011
Energia elettrica consumata [MWh/anno]	1172,98	1124,68	842,78
Gas naturale [Sm ³ /anno]	6363029,00	5965801,00	6635904,00
Quantità cotisso impiegato [ton/anno]	4,40	4,65	4,75
Quantità vetro cavato all'anno [ton/anno]	1623,80	1480,80	1729,80
Quantità vetro finito prodotto [ton/anno]	877,40	784,40	926,40
Consumi specifici gas naturale su vetro cavato [Sm ³ /t]	3918,60	4028,77	3836,23
Consumi specifici gas naturale su vetro finito [Sm ³ /t]	7252,14	7605,56	7163,11
Consumi specifici energia elettrica su vetro cavato [kWh/t]	722,37	759,51	487,21
Consumi specifici energia elettrica su vetro finito [kWh/t]	1336,88	1433,81	909,74

Al fine di confrontare uniformemente i consumi delle diverse fonti e vettori energetici annuali per il triennio 2011-2013, si è proceduto alla loro conversione in tep (tonnellate equivalenti di petrolio). I fattori di conversione utilizzati sono riassunti nella tabella seguente:

Tabella 6 - Fattori di conversione

	Fattore di conversione	U.M.
Energia Termica	0,086	tep/MWh
Energia Elettrica	0,187	tep/MWhe

Per l'energia termica si sono considerati i valori elencati nella tabella 1 del circolare del MISE del 18 dicembre 2014. Per l'energia elettrica, il fattore di conversione deriva dall'allegato A della delibera AEEG n° 03/08.

Per i fattori di emissione di CO₂, ci si è riferiti al rapporto ISPRA sulle emissioni di CO₂ n° 212/2015, assumendo il valore riferito al IPCC '06 per le emissioni da gas naturale, pari a 0.00193 t CO₂eq/ Sm³ e per le emissioni da consumo elettrico 0.329 kg CO₂eq/kWh.

Tabella 7 - Consumi specifici, consumi specifici normalizzati e emissioni CO2 equivalente

ANNO	GAS				
	CS su cavato [Sm ³ /t]	CS su finito [Sm ³ /t]	CS su cavato [tep/t]	CS su finito [tep/t]	CO ₂ [t CO ₂ eq/Sm ³]
2013	3918,60	7252,14	3,23	5,98	12280,65
2012	4028,77	7605,56	3,32	6,27	11514,00
2011	3836,23	7163,11	3,16	5,91	12807,29

Tabella 8 - Consumi specifici, consumi specifici normalizzati e emissioni CO2 equivalente – ENERGIA

ELETTRICA

ANNO	ENERGIA ELETTRICA				
	CS su cavato [kWh/t]	CS su finito [kWh/t]	CS su cavato [tep/t]	CS su finito [tep/t]	CO ₂ [kg CO ₂ eq/kWh]
2013	722,37	1336,88	0,14	0,25	385909,43
2012	759,51	1433,81	0,14	0,27	370021,04
2011	487,21	909,74	0,09	0,17	277275,61

CAPITOLO 3 – ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI

3.1. Misure sperimentali: raccolta dati sperimentali su tecnologia presente

3.1.1. Scelta del campione, numerosità e periodo di misurazione.

La campagna di misure è stata condotta nell'arco di due mesi, in due modalità: in remoto, tramite strumento di misura nanodac e diretto, ovvero con misure orarie rilevate dai quantometri direttamente installati sui forni che ne disponevano. In entrambe le modalità, è stata rilevato il tipo di lavorazione dagli operatorie del forno, pertanto è stato possibile ricostruire il ciclo di lavorazione.

Il campione di forni monitorato è ridotto rispetto al campione ottenuto dal questionario, infatti è stato possibile monitorare 4 vetrerie.

Sono stati monitorati:

- 4 day tank, di cui due da 1500 kg e due da 2200 kg, per ogni capacità è stato possibile selezionare un forno considerabile “nuovo” e un forno considerabile “vecchio”, ovvero con caratteristiche che lo rendono obsoleto, come l'anno di costruzione, l'assenza del recuperatore e/o l'assenza di regolazione automatica della combustione.
- 8 forni a crogiolo, di varie taglie (160-180-240-300-320-350-400-850 kg), di cui 2 privi sia di recuperatore che di regolazione automatica di combustione, 2 con solo la regolazione automatica di combustione, 4 con entrambe le caratteristiche.

La conduzione in remoto della campagna misure, è stata effettuata tramite lo strumento registratore Nanodac™ di Eurotherm, montato opportunamente alla tubazione di ingresso del gas del forno. La registrazione, in modalità videografica da remoto, ha permesso di tracciare curve di consumo e di temperatura per almeno due cicli di fusione e l'elaborazione diretta di dati quantitativamente precisi e temporalmente puntuali. Il software Review™, direttamente fornito dal produttore, permette la creazione di database per ogni fornace e per ogni forno misurati. Tale rilevazione ha incluso dati di: temperatura forno, temperatura recuperatore, portata gas in ingresso, quantità cumulata da contatore.

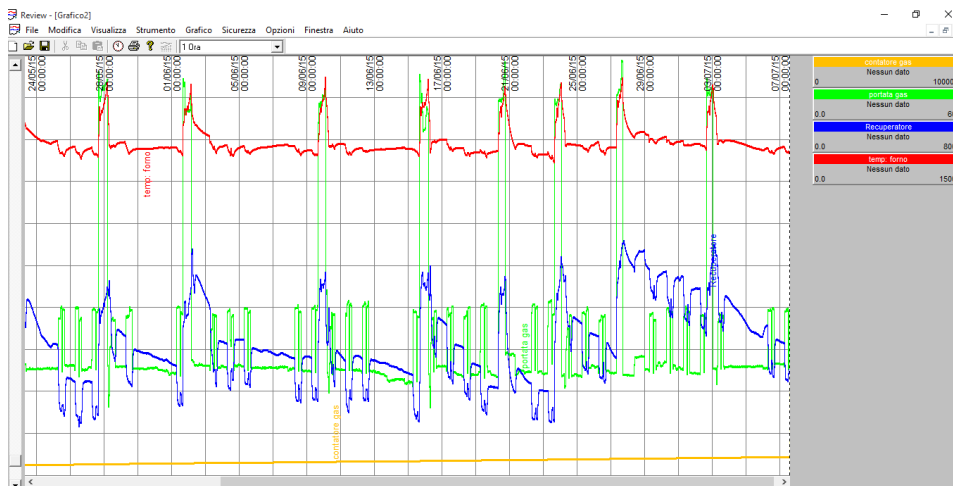


Figura 23 - Schermata ottenibile dal software Review per Nanodac

Il tipo di output è sia grafico che in formato elaborabile .CSV.

La rilevazione sul campo è stata possibile solo sui forni dotati di flussometro a galleggiante in ingresso al bruciatore, successivamente all'eventuale regolazione automatica. Sono state effettuate letture orarie di portata e di temperatura, durante l'orario lavorativo e nel caso di variazione di portata da parte del personale addetto alla fusione, dal momento che durante la fusione vi sono spesso aggiustamenti ripetuti in brevi intervalli di tempo. Con la collaborazione dei responsabili di produzione e ai tecnici di fusione, è stato possibile ricostruire il ciclo di produzione per ogni forno coinvolto nell'indagine.

È stata condotta anche una campagna di misura su un forno di nuova costruzione, su cui basare la baseline e i successivi confronti. La conduzione è stata effettuata sul campo a intervalli regolari da parte degli operatori della fornace e dai fonditori.

3.2. Analisi dei dati sperimentali

3.2.1. Tipologia di dati raccolti e tipologie di aggregazione: tipi forno e grandezza

I dati raccolti con campionamenti in remoto e in sito hanno permesso di ottenere i seguenti dati:

- Vetreria, numero di riconoscimento forno;
- Tipologia di forno: Forno a Crogiolo o Day Tank, grandezza del forno in kg, presenza di tecnologie come il recuperatore o la regolazione automatica della combustione, tipo di tecnologia (recente, vecchia);

- Dati ambientali: temperatura dell'aria all'adduzione al forno/al misuratore e sovrappressione della condotta del gas naturale. I dati ambientali sono necessari per poter normalizzare i consumi di gas naturale ottenuti tramite le rilevazioni;
- Composizione del contenuto del forno: kg di materiale da fondere, kg di rottame e percentuale di rottame sul totale;
- Fase: affinaggio, fusione, lavorazione e mantenimento; durata delle fasi, durata specifica delle fasi
- Consumi: per fase, per fase e normalizzati, Consumi orari in m³/h e specifici in m³/kg; Consumi specifici normalizzati in Sm³/h e Sm³/kg.
- Temperatura media del forno, Temperatura media del recuperatore (se disponibile).

3.2.2. Analisi comparativa dei dati, analisi dei benchmark, scelta del fattore di normalizzazione e riflessioni

L'analisi dei dati ha previsto come primo passo la costituzione del fattore di conversione per la misura del gas naturale. Si è reso infatti necessario convertire i m³ in Sm³ con la seguente relazione:

$$\text{fattore conversione } m^3 \rightarrow Sm^3 = \frac{1.01325 + \frac{P[mbar]}{1000}}{T_{\circ C} + 273.15} * \frac{15 + 273.15}{1.01325} \quad [3.1]$$

Per poter confrontare in seguito le fasi seguite dai vari forni calcolati, si è calcolato una durata specifica di fase:

$$\text{durata specifica fase} = \frac{\text{durata fase [h]}}{(\text{kg composizione} + \text{kg rottame})} \quad [3.2]$$

Tramite le linee guida BREF 2007 si è cercata una relazione per poter correggere il consumo in funzione della percentuale del rottame utilizzato, dal momento che maggiore è la quantità di rottame in fondita, minori saranno i consumi, poiché il rottame, in fusione, non richiede calore latente di fusione aggiuntivo.

La correlazione per la correzione rispetto allo 0% di rottame è la seguente:

$$\text{Consumo fase normalizzato} = \text{consumo fase} * (1 + 0.0025 * \%rottame * 100) \quad [3.3]$$

Per il calcolo dei consumi specifici si è deciso di calcolare il consumo orario e il consumo per kg di vetro fuso tramite le seguenti correlazioni:

$$CS_1 \left[\frac{m^3}{h} \right] = \frac{\text{consumo} [m^3]}{\text{durata fase}} \quad [3.4]$$

$$CS_2 \left[\frac{m^3}{kg} \right] = \frac{\text{consumo} [m^3]}{kg \text{ composizione} + kg \text{ rottame}} \quad [3.5]$$

$$CS_3 \left[\frac{Sm^3}{h} \right] = CS_1 * \text{fattore conversione } m^3 \rightarrow Sm^3 = \frac{\text{consumo normalizzato} [Sm^3]}{\text{durata fase}} \quad [3.6]$$

$$CS_4 \left[\frac{Sm^3}{kg} \right] = CS_2 * \text{fattore conversione } m^3 \rightarrow Sm^3 = \frac{\text{consumo normalizzato} [Sm^3]}{kg \text{ composizione} + kg \text{ rottame}} \quad [3.7]$$

3.2.3. Aspetti di correlazione consumo – produzione o consumo – ore funzionamento

Inizialmente si è scelto di valutare i consumi su base oraria e su base della massa del vetro fuso. I risultati sono stati suddivisi per tipologia di forno e per fase e hanno dato i seguenti risultati, dalle quali si è cercata una correlazione per il calcolo del consumo indagato per ogni taglia di forno (grandezza forno, in kg). I consumi sono stati riportati nei seguenti grafici:

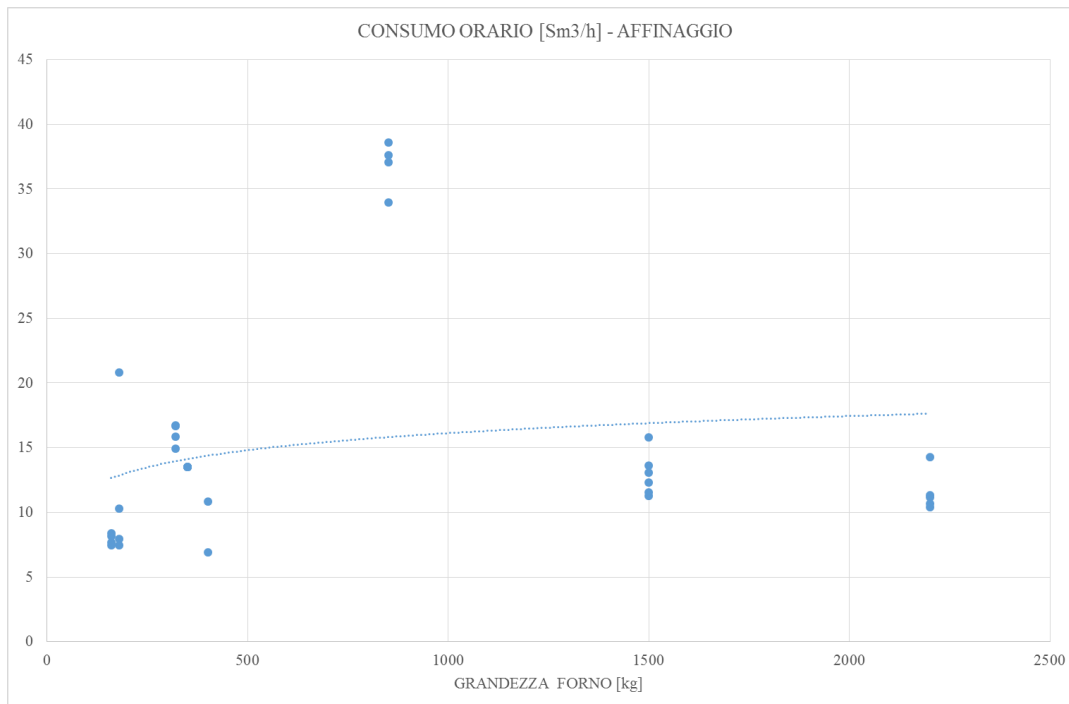


Figura 24 - Consumo orario in fase di affinaggio

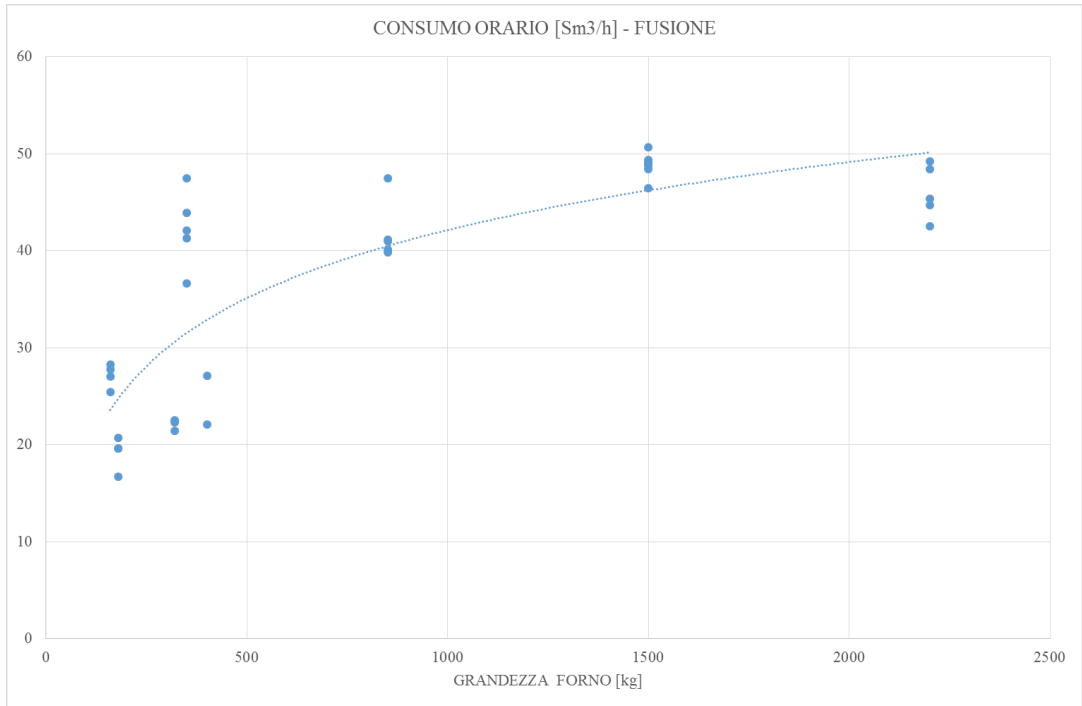


Figura 25 - Consumo orario in fase di fusione

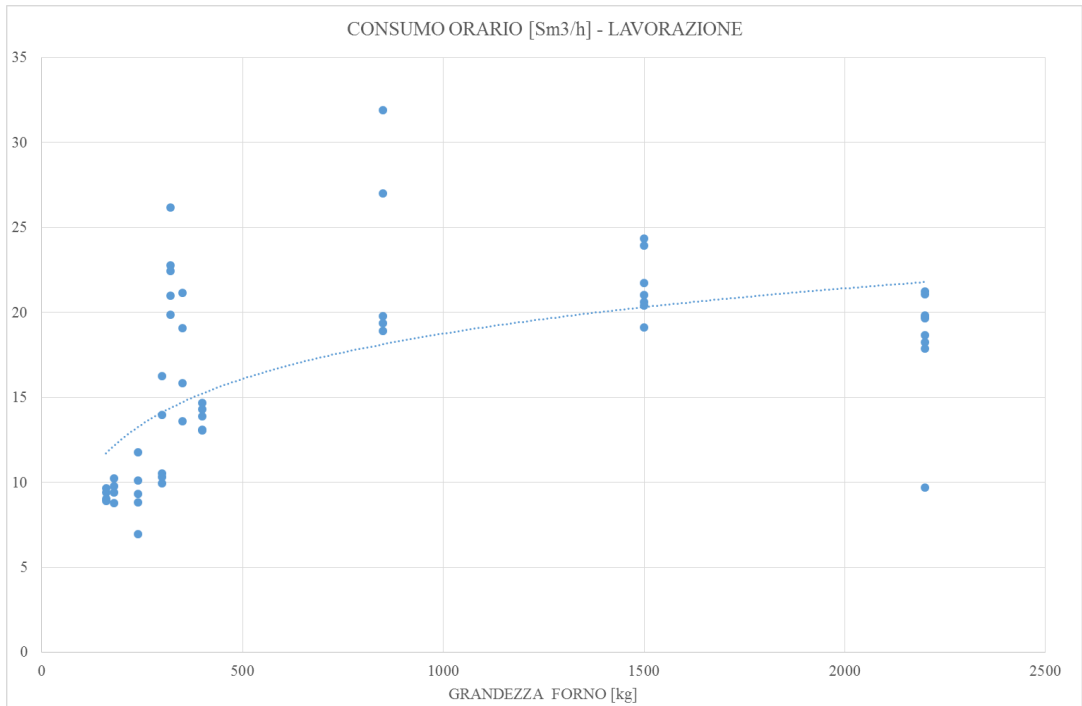


Figura 26 - Consumo orario in fase di lavorazione

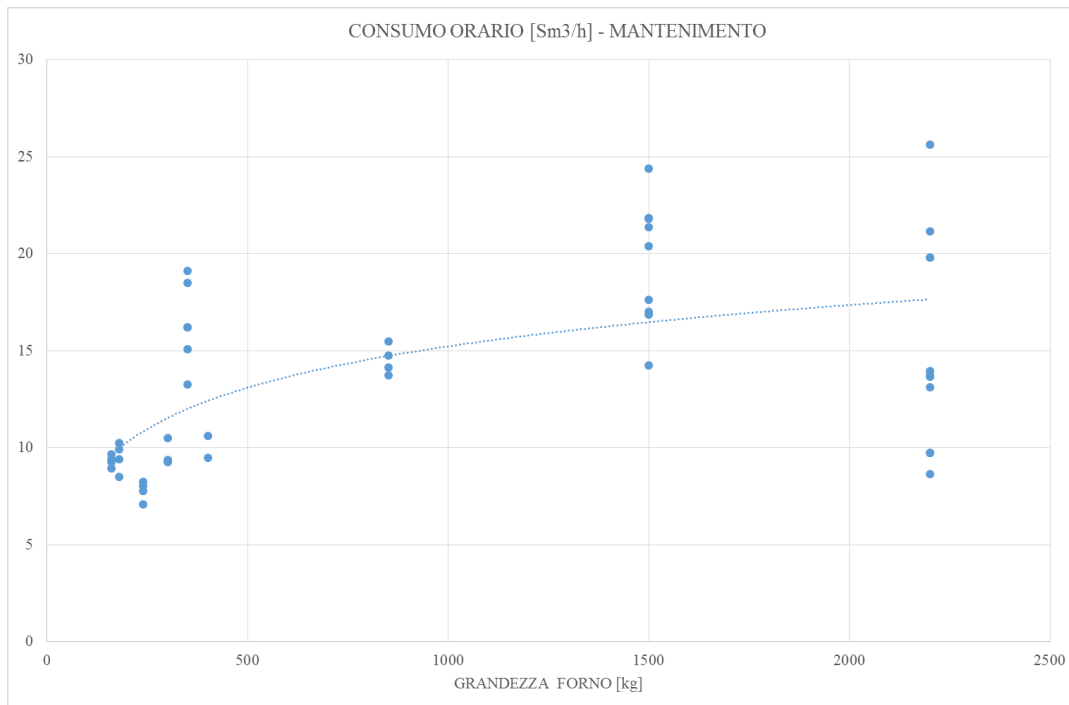


Figura 27 - Consumo orario in fase di mantenimento

La correlazione dei consumi normalizzati orari in Sm^3/h ha dato risultati soddisfacenti per tutte le fasi, suddivise opportunamente per classi di grandezza dei forni. I punti estremi, minimi e massimi, per ogni taglia, si riferiscono solitamente a forni con tecnologia recente o obsoleta, identificando così anche i margini di miglioramento tra il parco forni esistente. Come era presumibile, il consumo orario per ogni fase è tendenzialmente crescente con la grandezza. Tale dato potrebbe essere leggermente fuorviante quando la quantità fusa non corrisponde alla capacità del forno, ma una quantità sensibilmente inferiore.

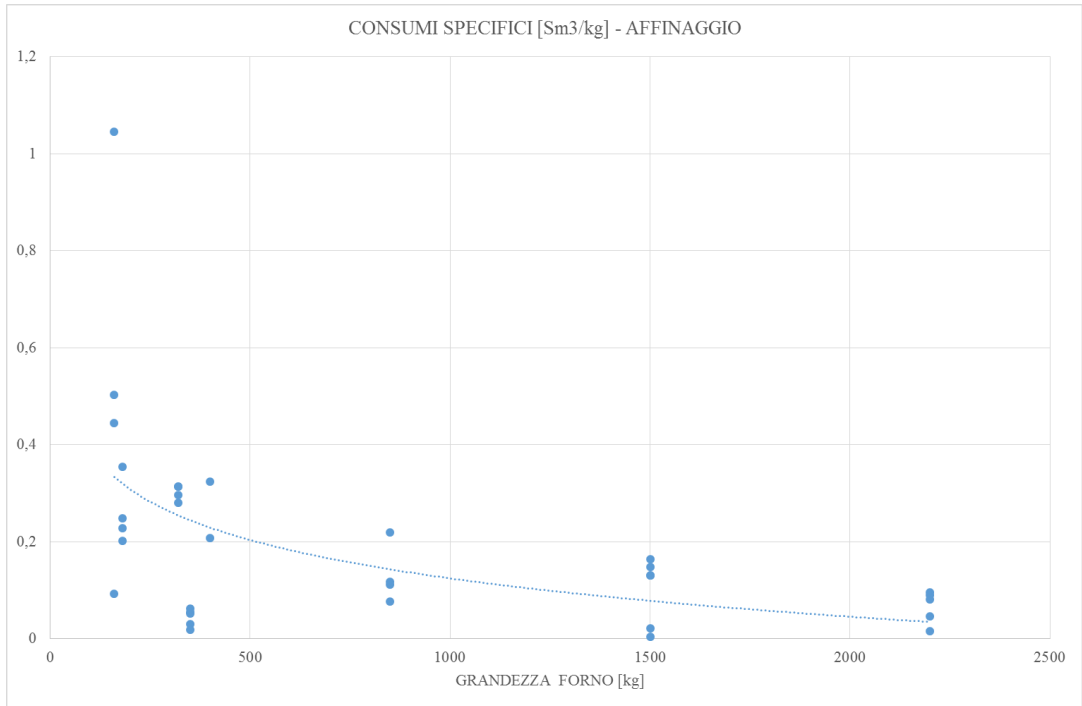


Figura 28 - Consumo specifico in fase di affinaggio

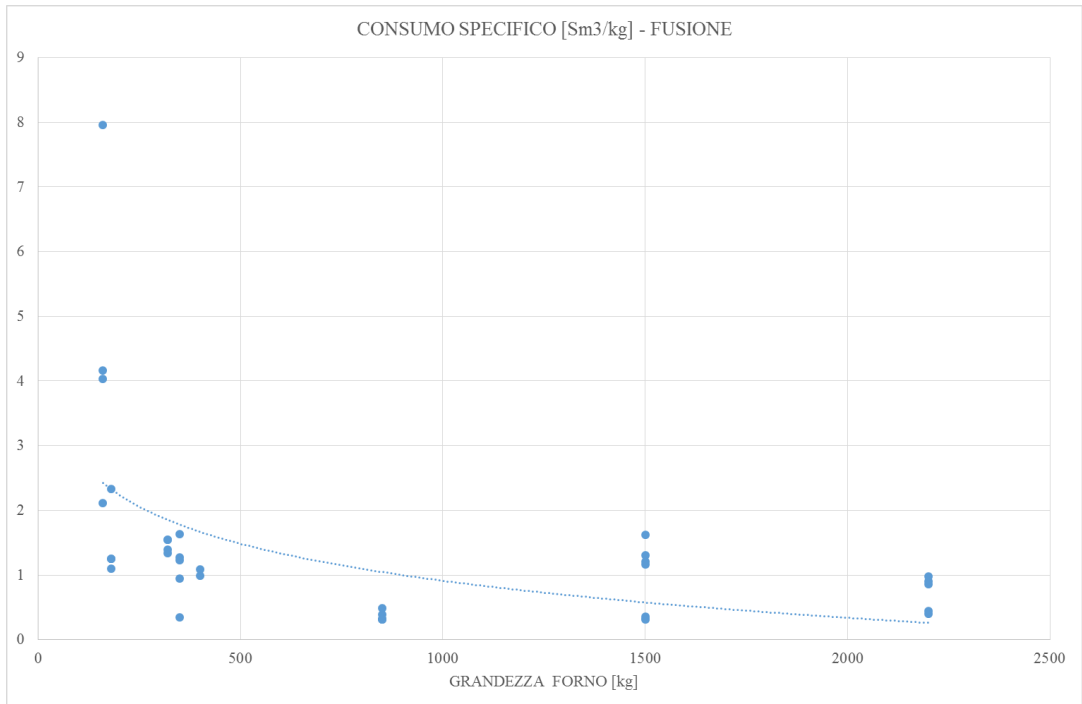


Figura 29 - Consumo specifico in fase di fusione

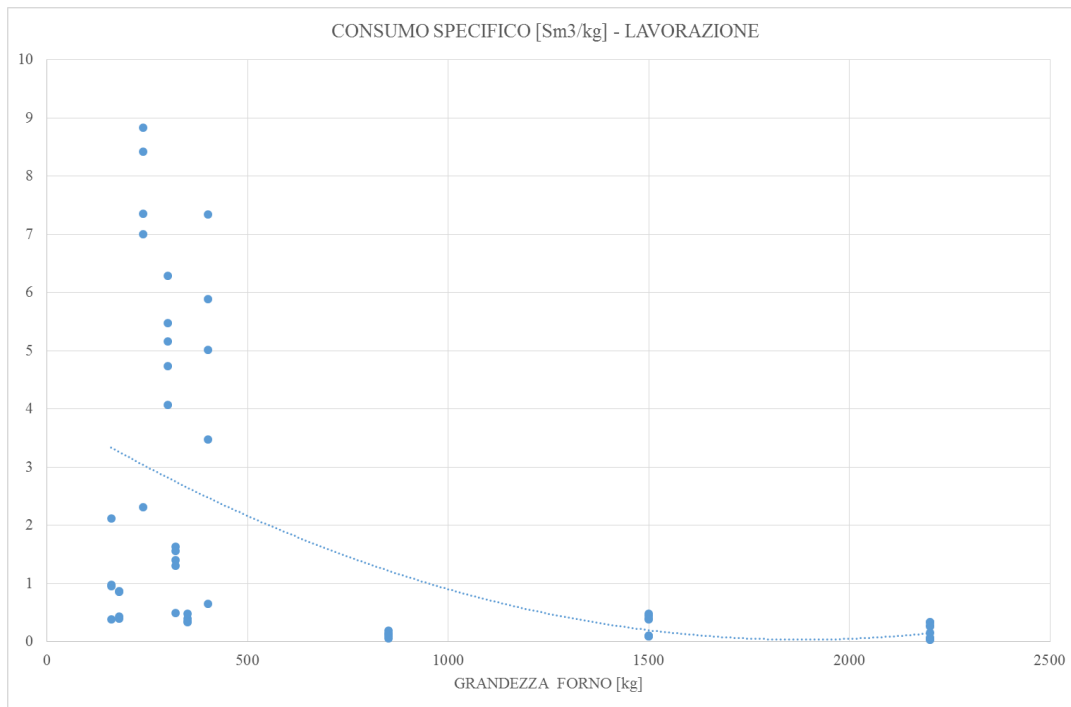


Figura 30 - Consumo specifico in fase di lavorazione

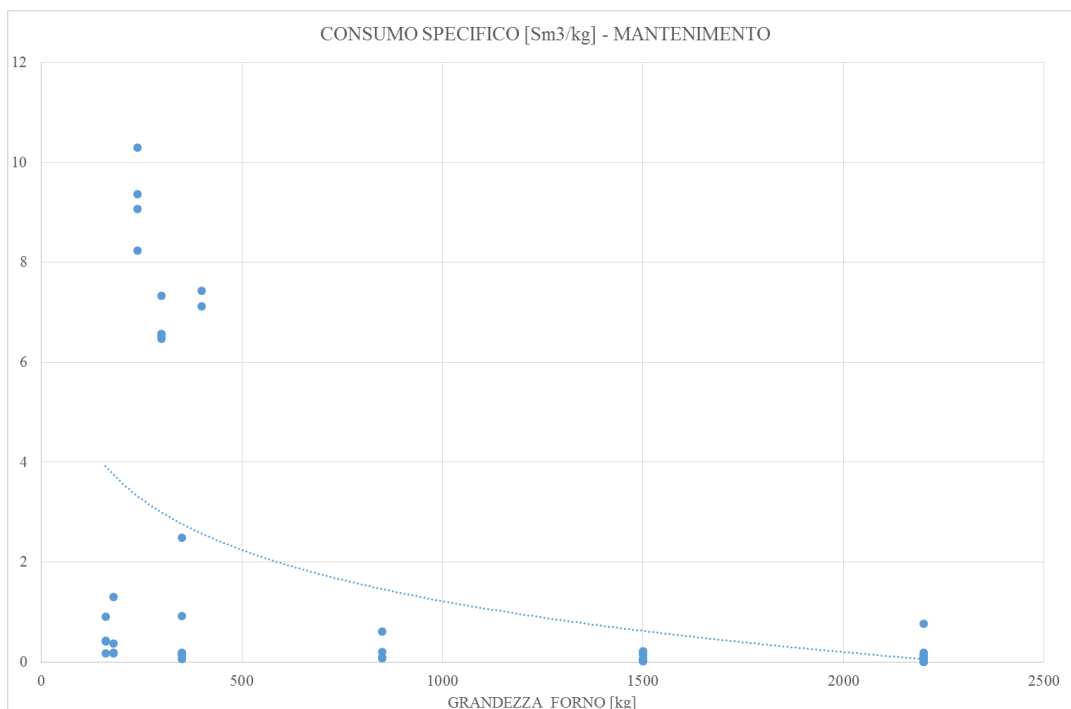


Figura 31 - Consumo specifico in fase di mantenimento

I consumi normalizzati correlati alla massa di vetro fuso ha rilevato, invece, alcune problematiche notevoli:

- C'è molta incertezza sui quantitativi di composizione utilizzata e di rottame utilizzato, per una scarsa accuratezza nella pesata da parte dei fonditori;

- Ci sono molte variabili che fanno variare i consumi di vetro da azienda ad azienda: alcune aziende preferiscono fondere il vetro trasparente in un day tank per poi suddividerlo, da fuso, nei crogioli, altri fondono solo il necessario per ripristinare qualitativamente il contenuto del forno, quindi facendo fondite parziali;
- Altre variabili in gioco riguardano l'utilizzo del forno nelle fasi di affinaggio e di lavorazione, in quest'ultima la modulazione della fiamma avviene secondo necessità del Maestro e dipende da che elemento si sta lavorando. Potrebbe infatti essere richiesta una fiamma lunga per riscaldare un pezzo in canna, o per mantenere il vetro fuso a una minore viscosità;
- Alcuni forni risultavano accesi ma non coinvolti nella produzione, per cui è stato necessario stimare una quantità minima di cavato;

La correlazione con la quantità lavorata risulta quindi meno significativa e gestibile con difficoltà sul piano pratico e per il confronto, poiché fornisce risultati molto variabili a parità di taglia.

Comunque la correlazione risulta essere decrescente con la taglia, come era prevedibile. I consumi sono direttamente proporzionali alle dimensioni ma inversamente proporzionali alla quantità di vetro cavato. Il consumo specifico per i forni per il vetro artistico, si può calcolare, in via teorica, con la seguente correlazione (Dall'Igna, D'Este, & Maurina, 2012):

$$\text{Consumo Specifico} = \frac{\text{Calore riscaldamento} + \text{Calore latente fusione} + \text{Calore disperso}}{\eta_{\text{fiamma}}} \quad [3.8]$$

Per tale relazione, la somma del calore per riscaldamento della carica e il calore latente di fusione della composizione vale 1673,6 – 2301,2 kJ/kg, mentre il calore disperso, compreso tra i 1673,6 e i 2092 kJ/kg, varia con la dimensione e con la quantità di vetro cavato.

Per il calcolo del rendimento di fiamma, si ricorre ad un fattore di amplificazione fiamma pari a:

$$\text{fattore amplificazione fiamma} = \frac{PCI_{CH_4}}{PCI_{CH_4} - h_{fumi} - h_{aria}} \quad [3.9]$$

e vale 1.45 per fiamme di tipo rigenerativo, mentre per forni per il vetro artistico con preriscaldamento dell'aria vale da 2.2 a 2.5.

3.2.4. Confronto e analisi risultati

Con i dati ottenuti e i risultati della normalizzazione, è stato possibile confrontare i consumi sotto diversi punti di vista.

- **Per fase: durata delle fasi, per tipologia di forno**

Sono state tracciate le curve di minima e massima durata e durata media per ogni fase al variare della grandezza del forno.

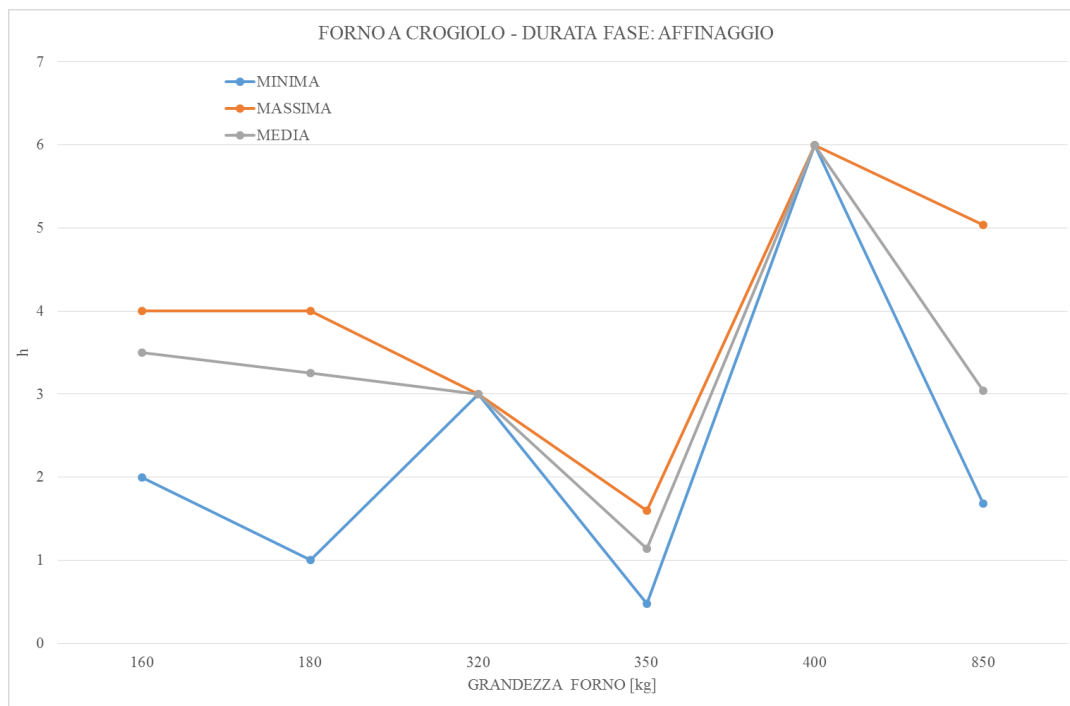


Figura 32 - Durata minima, massima e media della fase affinaggio per i forni a crogiolo

Essendo l'affinaggio una fase necessaria per la degassificazione della massa vetrosa fusa, cioè per non avere difetti dovuti a bolle nel prodotto, la durata è variabile con la grandezza del forno ma anche con la caratteristica del vetro stesso, comunque maggiore sarà la quantità di vetro fuso, maggiore sarà il tempo necessario.

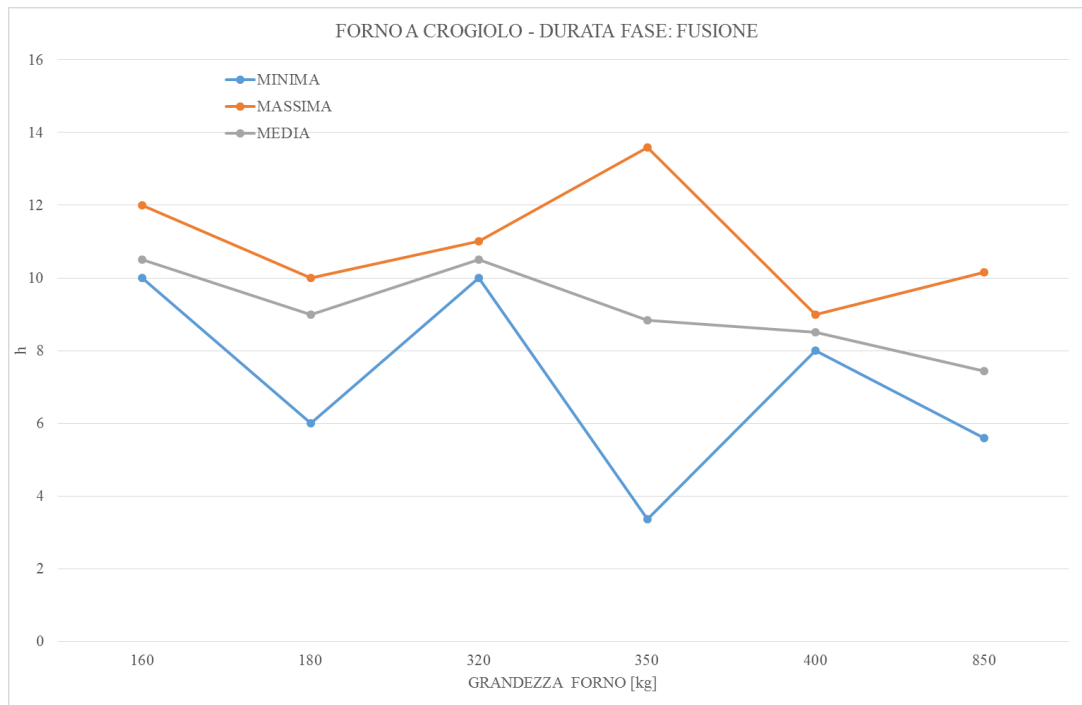


Figura 33 - Durata minima, massima e media della fase fusione per i forni a crogiolo

La rilevazione della durata della fusione comprende anche la fase di caricamento del forno, pertanto i valori sono così variabili. La scelta di effettuare cariche successive, prolunga inevitabilmente la durata della fusione. Per quanto riguarda il materiale da fondere, viene richiesto un maggior apporto di calore per la fusione dai vetri di colore scuro, allungando così il tempo richiesto per la fusione.

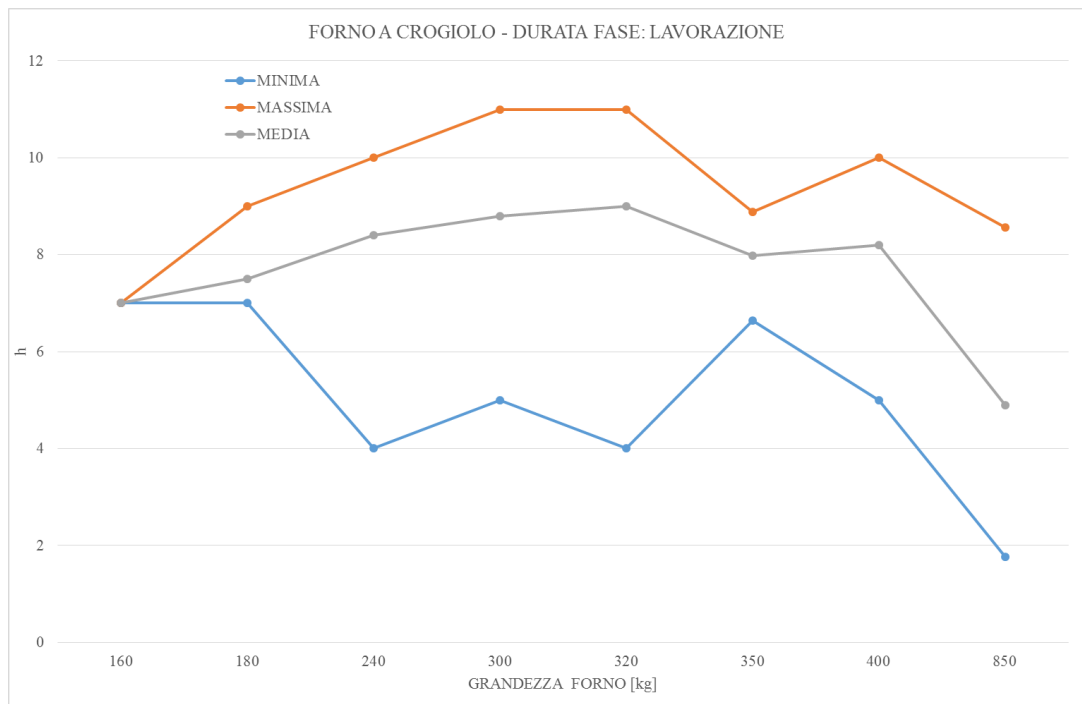


Figura 34 - Durata minima, massima e media della fase lavorazione per i forni a crogiolo

La durata della fase di lavorazione dipende unicamente dalla durata effettiva dei turni di lavoro sul forno: i turni partono alle 8.00 – 8.30 fino alle 12.00. La ripresa dell'attività lavorativa avviene alle ore 13.00, per terminare ad un orario compreso tra le 15.00 e le 17.00. Pertanto la durata dei turni di lavoro è compresa tra le 7 e le 11 ore. Per alcuni forni (850 kg), si registrano lavorazioni anche di sole 2 ore, questo dato è dovuto dall'uso di tale forno per produrre semilavorati.

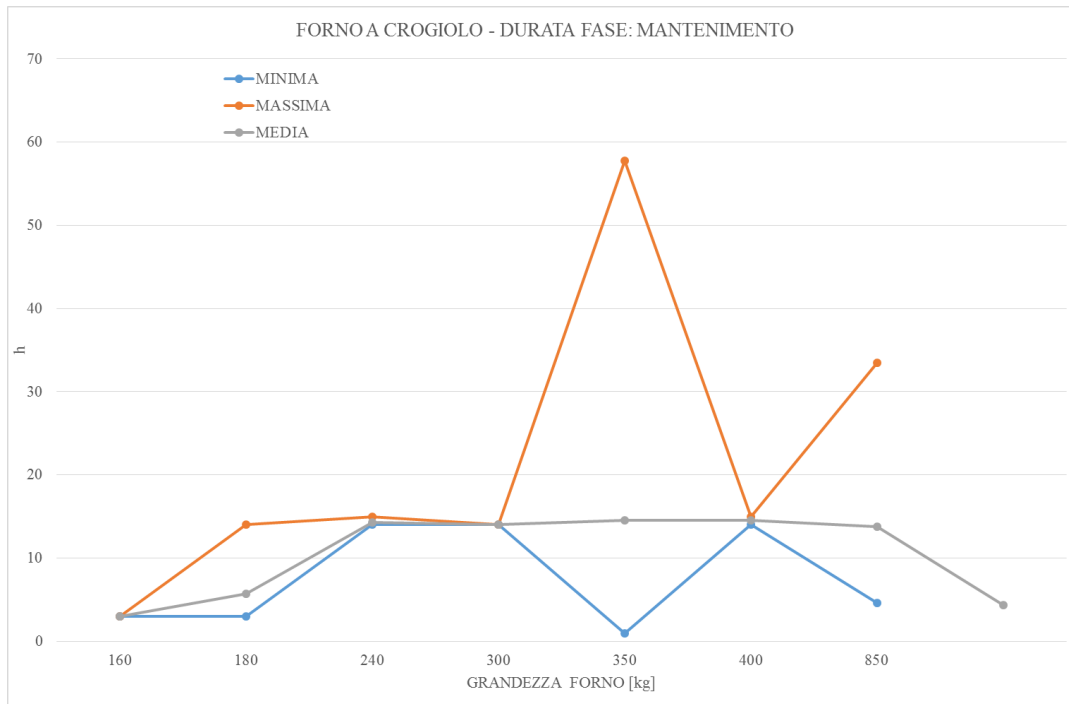


Figura 35 - Durata minima, massima e media della fase mantenimento per i forni a crogiolo

La durata del mantenimento ha durate molto variabili, ciò è dovuto dal rilevamento in remoto di week-end, i quali costituiscono un intervallo in mantenimento nell'arco di due giorni non lavorativi. La media è piuttosto costante, per i forni piccoli il valore è più basso per una maggior utilizzazione o per fondite più frequenti.

Per quanto riguarda i day tank, sono stati indagati due taglie: 1500 kg e 2200 kg. I risultati sono stati comunque soddisfacenti.

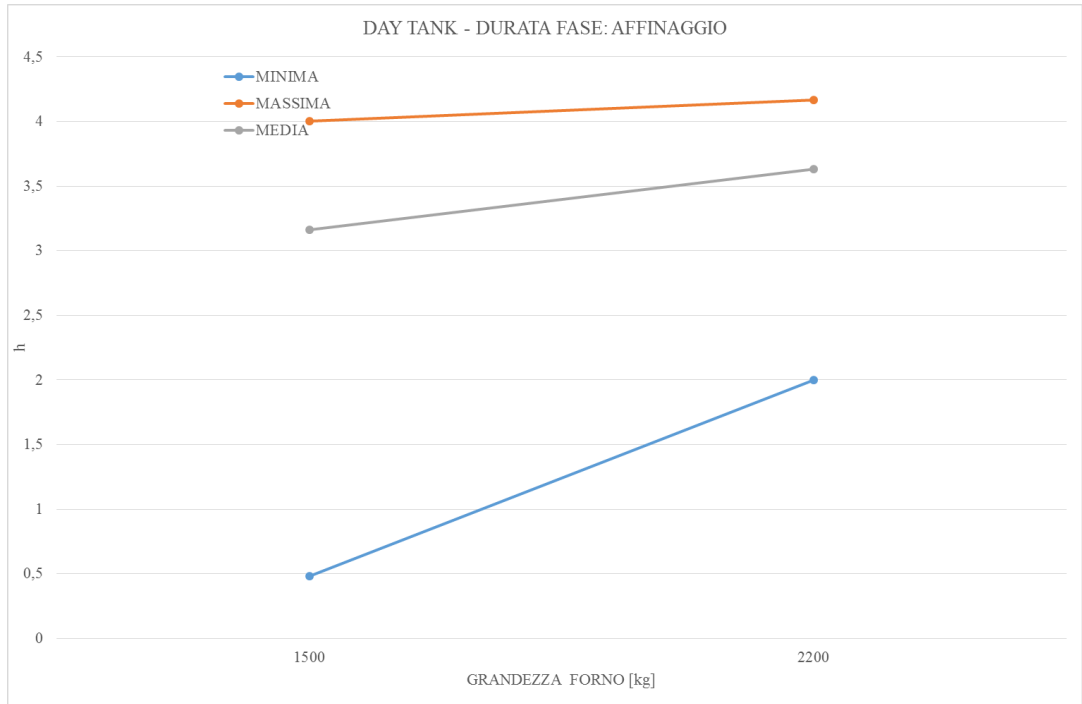


Figura 36 - Durata minima, massima e media della fase affinaggio per i forni Day Tank

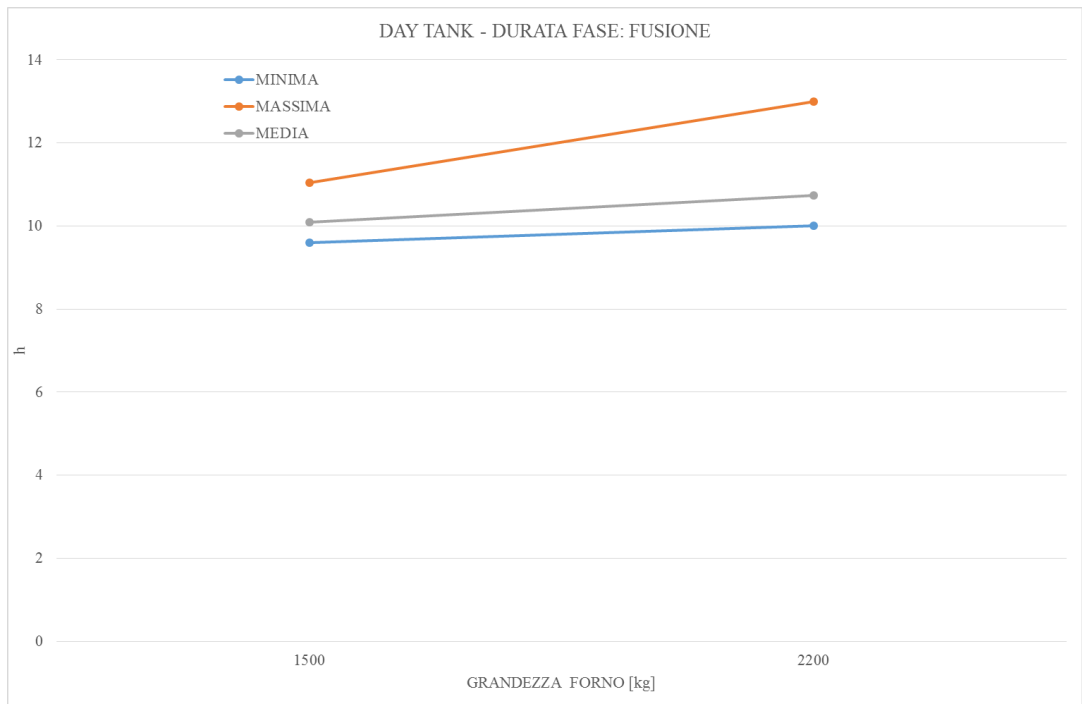


Figura 37 - Durata minima, massima e media della fase fusione per i forni Day Tank

Per le considerazioni sulle fasi di affinaggio e fusione, valgono le considerazioni fatte per i forni a crogiolo. Durate di fusione basse possono essere però fuorvianti, poiché le fasi potrebbero essere incluse nell'affinaggio e non indicate correttamente dall'operatore.

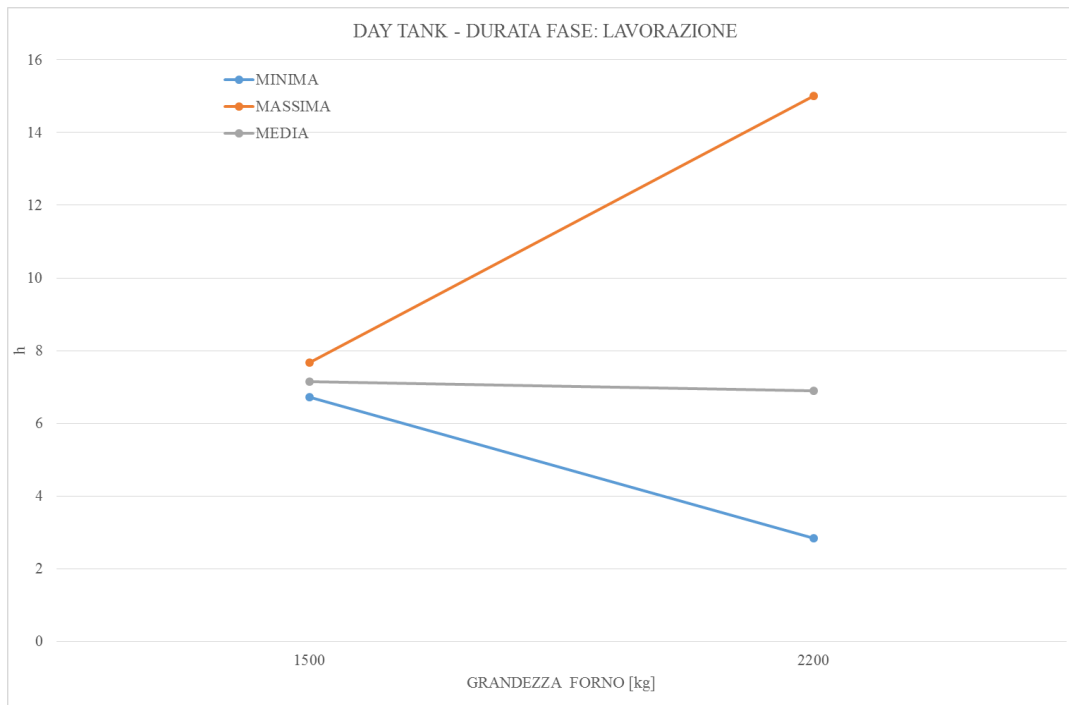


Figura 37 - Durata minima, massima e media della fase lavorazione per i forni Day Tank

Per la lavorazione, le considerazioni per i forni a crogiolo sono da ritenersi ancora valide, tuttavia l'uso dei day tank differisce sia per qualità di vetro che per quantità di operazioni svolte nella lavorazione.

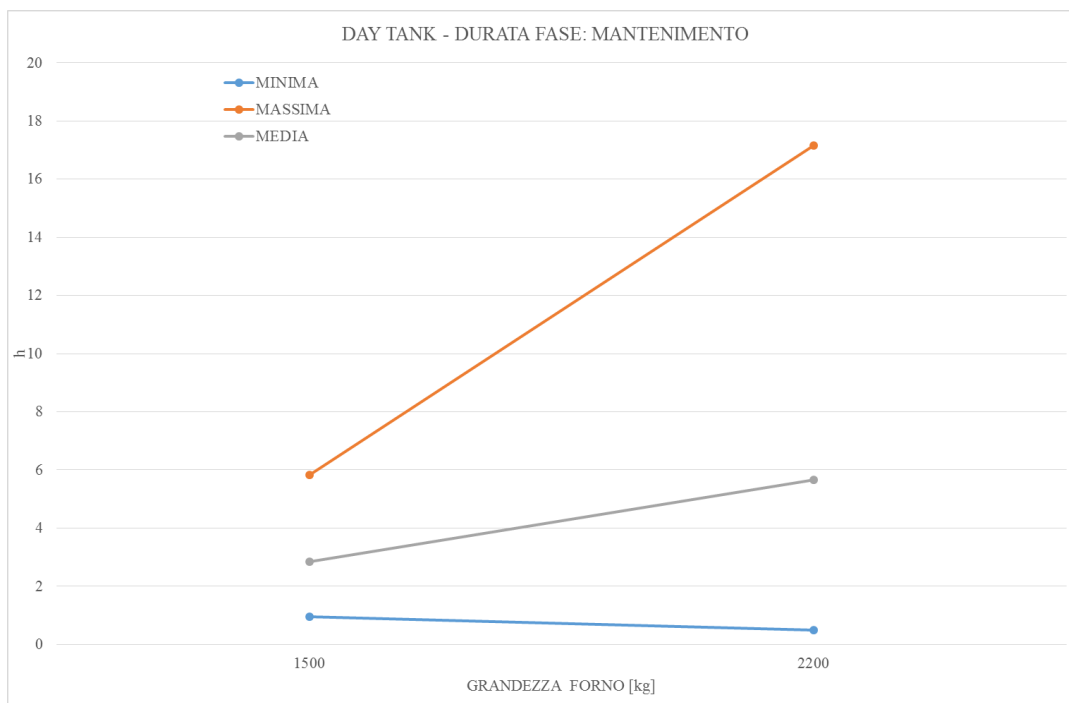


Figura 38 - Durata minima, massima e media della fase mantenimento per i forni Day Tank

I dati sul mantenimento sono spesso soggetti a interpretazione, poiché si confondono con fasi come l'affinaggio post-fusione e la lavorazione.

- **Presenza del recuperatore di calore**

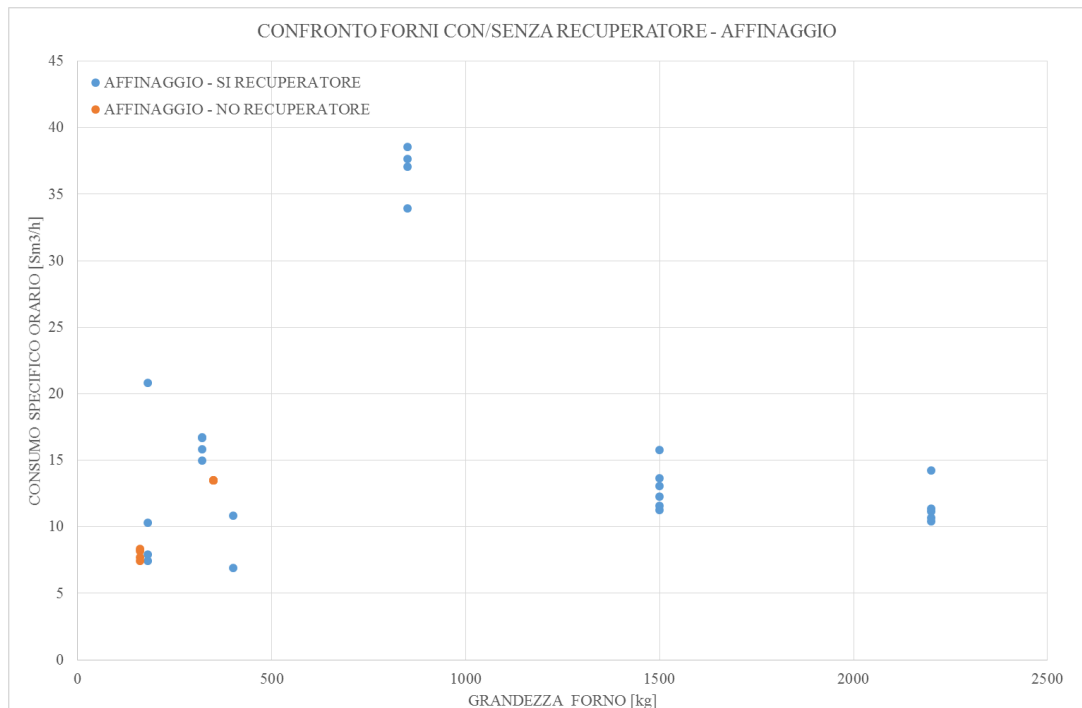


Figura 39 - Confronto consumi specifici orari di forni con/senza recuperatore nella fase affinaggio

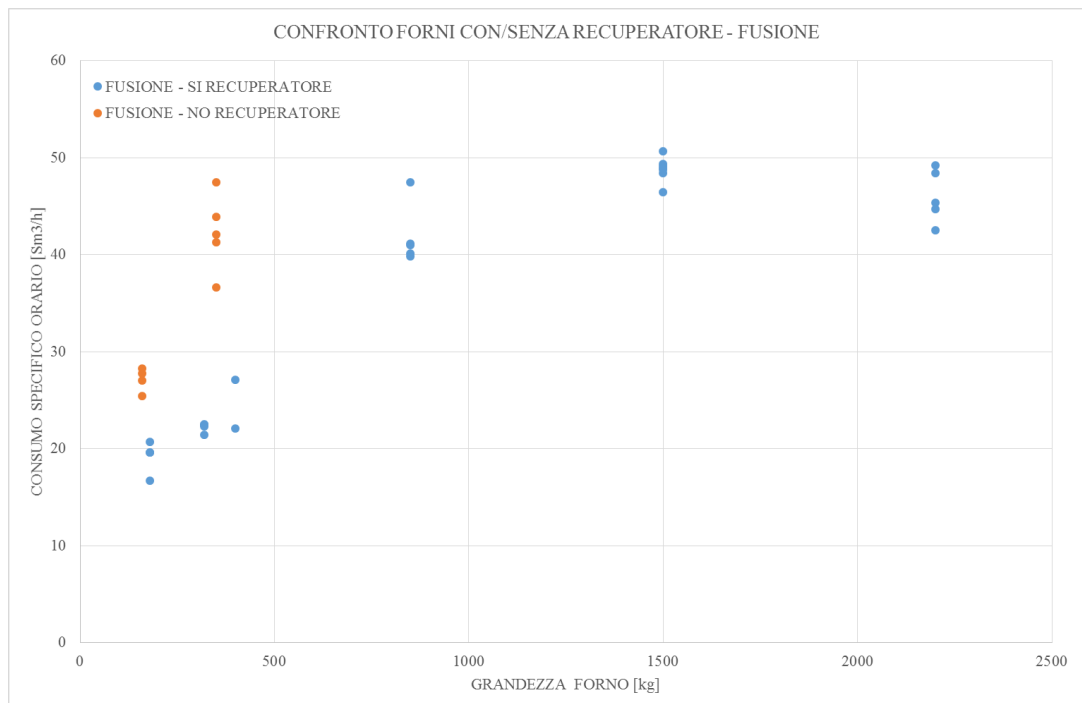


Figura 40 - Confronto consumi specifici orari di forni con/senza recuperatore nella fase fusione

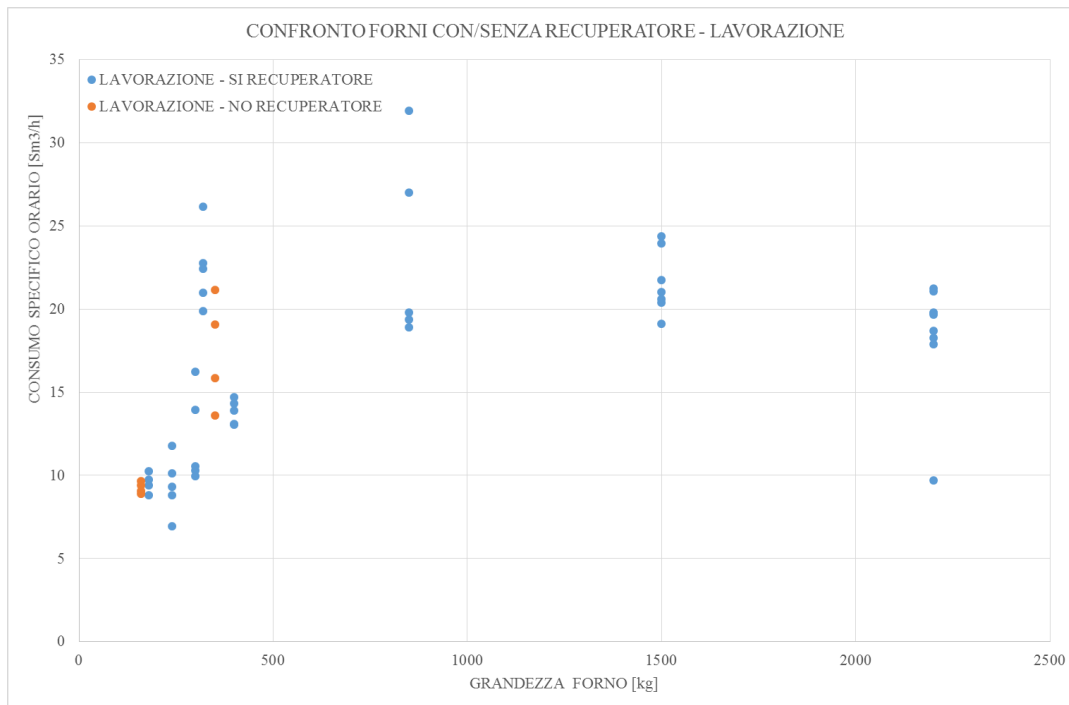


Figura 41 - Confronto consumi specifici orari di forni con/senza recuperatore nella fase lavorazione

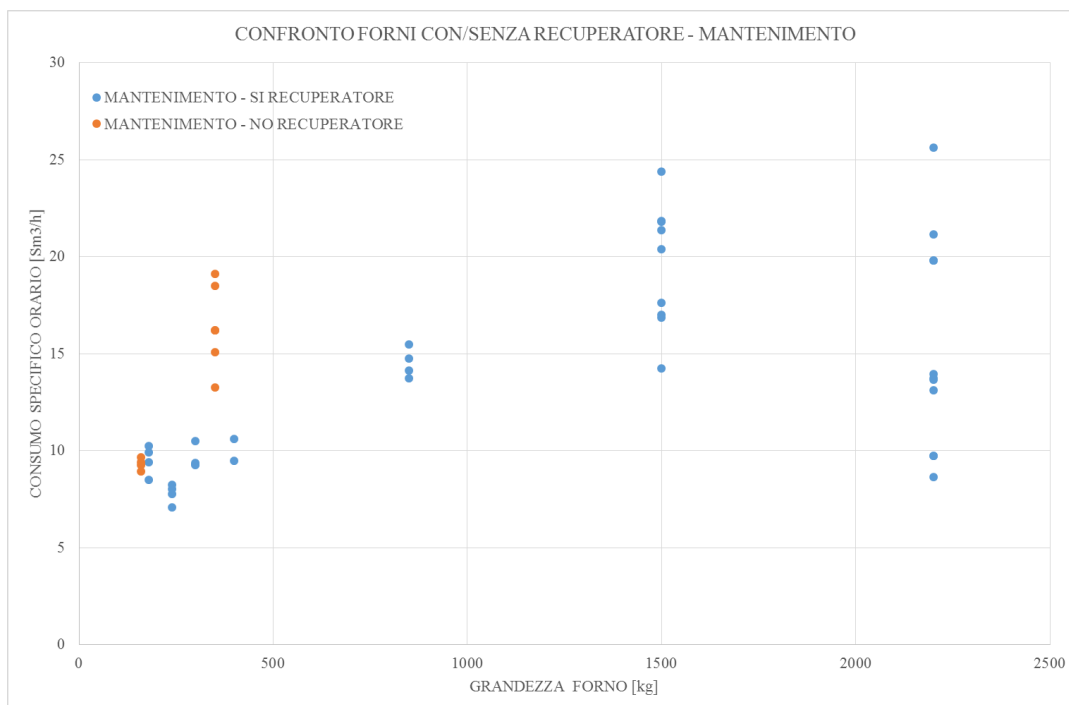


Figura 42 - Confronto consumi specifici orari di forni con/senza recuperatore nella fase mantenimento

Il confronto tra i consumi specifici orari tra forni con e senza recuperatore può essere effettuata solo per forni a crogiolo, i quali hanno disponibili dati per i privi di recuperatore solo per due taglie. Comunque si nota una certa differenza tra i consumi dei forni privi di recuperatore, ciò fa presupporre che tale andamento sia valido anche per gli altri tipi di

forno. Ciò fa notare anche che la maggior parte dei forni coinvolti nell'indagine ha il recuperatore: tale dato entra in conflitto con la rilevazione statistica del parco forni del capitolo 2, nel quale si sottolineava che il 46 % dei crogioli e l'82% dei day tank è provvisto di recuperatore. Incrociando quindi il risultato dell'indagine statistica e i risultati della campagna misure, si può supporre un buon potenziale di efficientamento con l'applicazione della tecnologia per il recupero di calore dai fumi di combustione per il preriscaldamento dell'aria comburente.

- **Presenza della regolazione automatica di combustione**

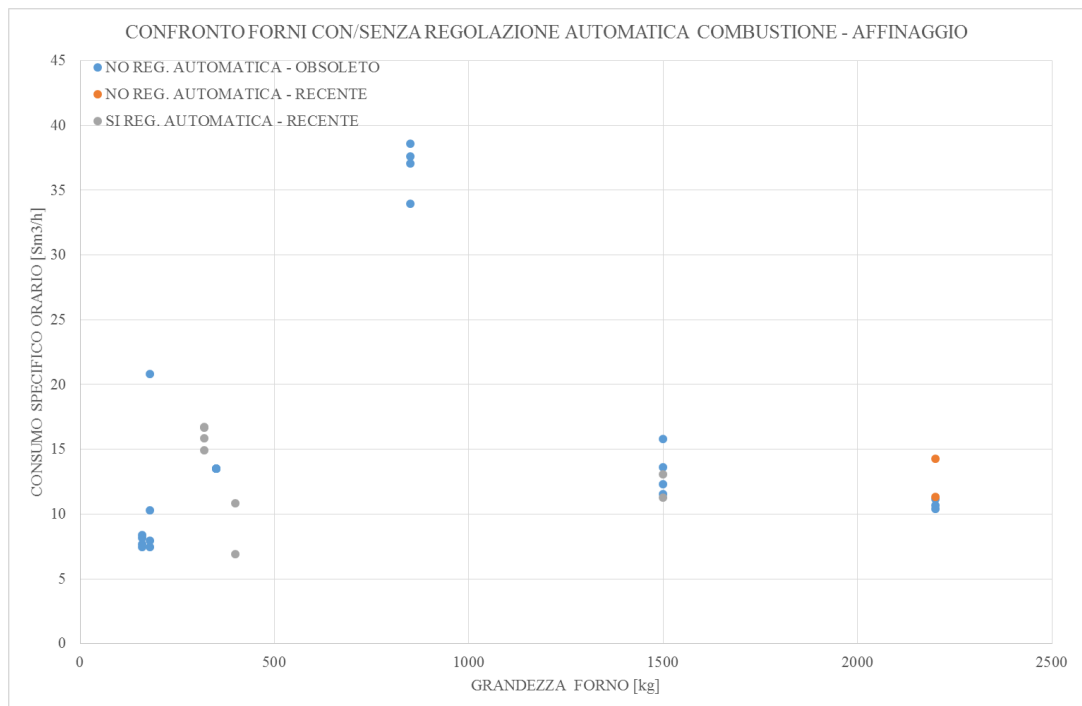


Figura 43 - Confronto consumi specifici orari di forni con/senza regolazione automatica di combustione nella fase affinaggio

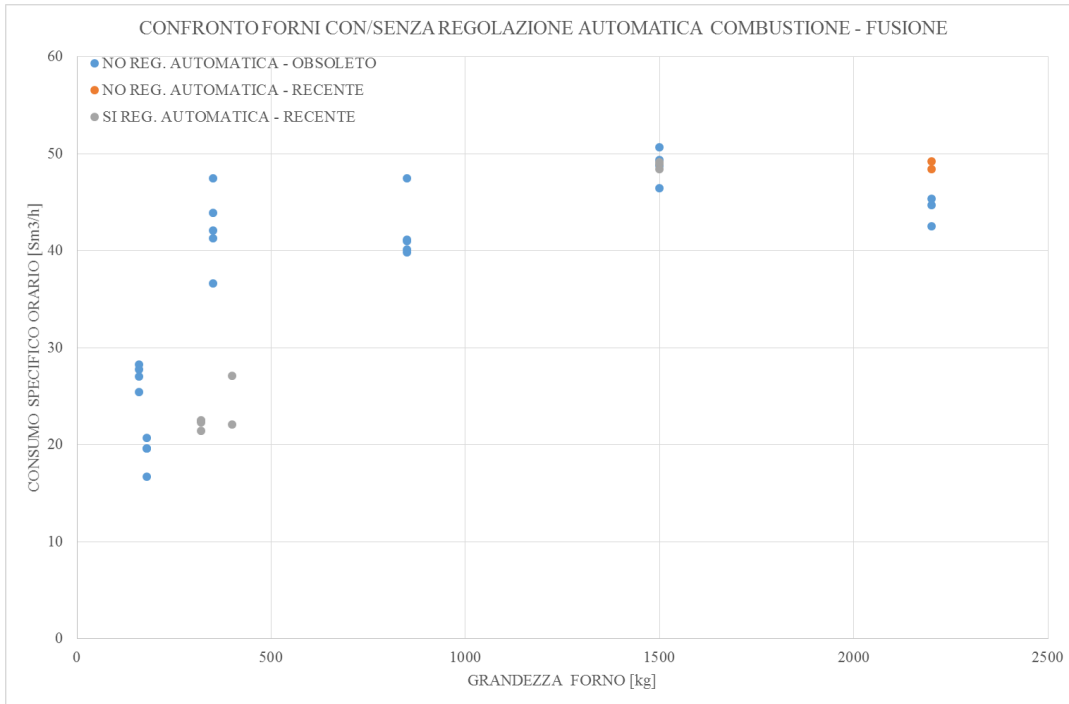


Figura 44 - Confronto consumi specifici orari di forni con/senza regolazione automatica di combustione nella fase fusione

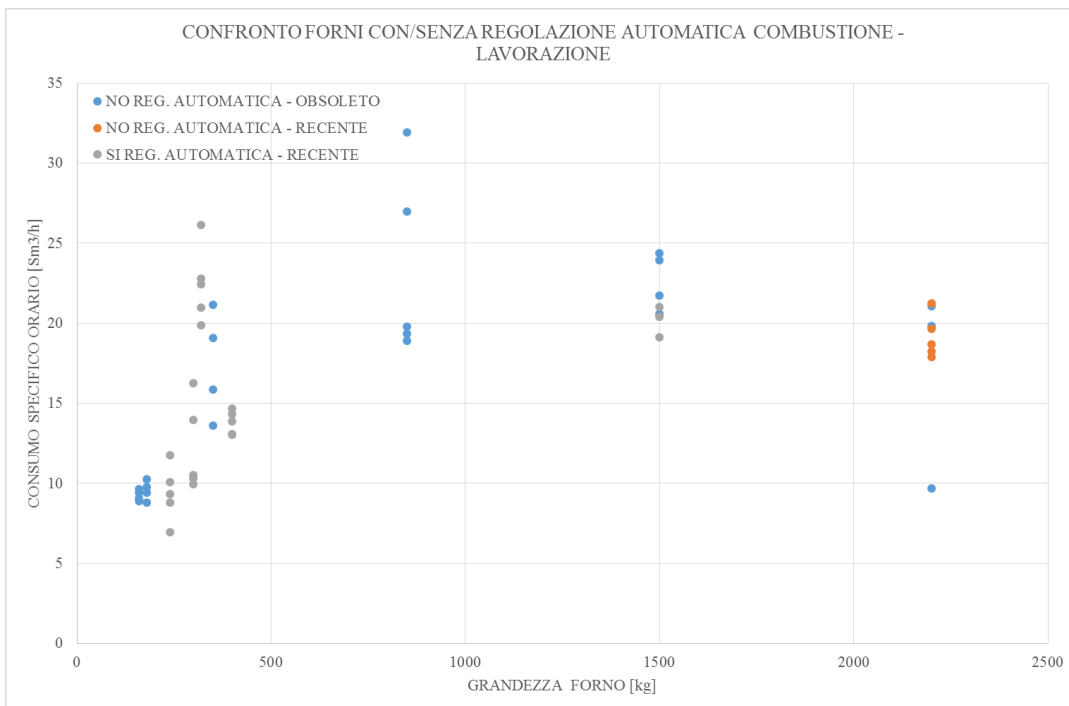


Figura 45 - Confronto consumi specifici orari di forni con/senza regolazione automatica di combustione nella fase lavorazione

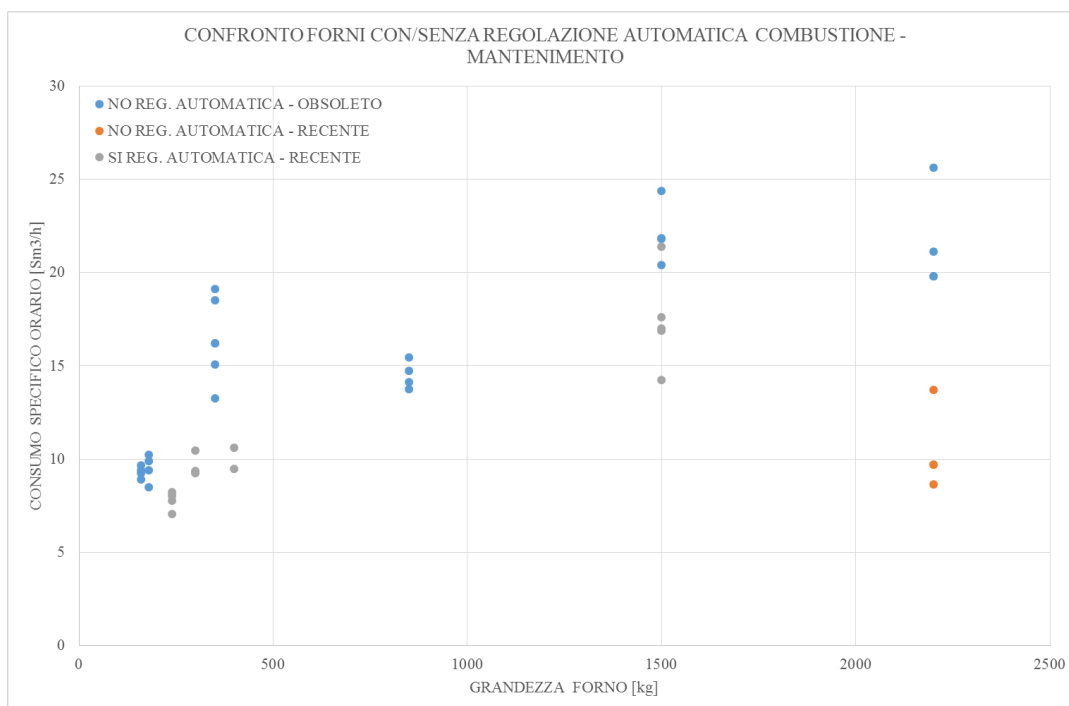


Figura 46 - Confronto consumi specifici orari di forni con/senza regolazione automatica di combustione nella fase mantenimento

Il confronto tra forni di età e tecnologia differenti, privi o provvisti di tecnologia di regolazione di combustione, offre spunti interessanti di riflessione sull’impatto di tale miglioria.

Le fasi più interessanti da valutare sono la fase di fusione e la fase di mantenimento. Infatti la regolazione interviene in modo migliore su forno chiuso, in un ciclo di riscaldamento o mantenimento, poiché permette di seguire adeguatamente le variazioni di richiesta di calore del forno direttamente.

In fase di affinaggio, la differenza non è così notevole, ma tale effetto è dovuto più alla scarsità di misurazioni che all’effettiva efficienza. In fusione, invece, la regolazione automatica offre margini notevoli di miglioramento, soprattutto sulle grandezze di forno a crogiolo medio piccole, con un risparmio fino al 50%. Nella lavorazione spesso il sistema di regolazione automatica di combustione viene by-passato, poiché si richiede la possibilità di modulare la fiamma manualmente a seconda delle lavorazioni. Nella fase di mantenimento è notevole la differenza di consumi in termini orari per ogni taglia di forno misurato.

Considerando che la regolazione automatica di combustione è una tecnologia già presente nel 64% dei day tank (comunque esigui in numero rispetto ai forni a crogiolo) e che l’86% dei forni a crogiolo ne è priva, si nota che il potenziale di efficientamento con la sola applicazione della tecnologia per la regolazione automatica di combustione è di per sé

notevole e applicabile su larga scala e provvede, in fasi di lunga durata come il mantenimento e la fusione, una riduzione dei consumi orari. Infatti si ricorda che la fusione è la fase più energivora nel ciclo termico di qualsiasi forno, mentre il mantenimento è un intervallo breve durante la settimana lavorativa, ma copre l'intero arco di tutti i week-end nei periodi di attività della fornace.

- **Quantità di rottame percentuale**

Altro dato importante da considerare, visto la notevole influenza sui consumi, è la quantità di rottame utilizzata nella fondita. La quantità di rottame riduce significativamente i consumi, tuttavia si tratta più di una scelta riguardante la qualità del vetro, che non una necessità energetica in sé, pertanto non presenta grossi margini di applicazione, perché è l'artigiano fonditore a ricevere indicazioni precise dalla singola fornace e dai singoli Maestri.

I risultati, in consumo specifico orario, sono stati riportati per ogni grandezza di forno, al variare della % di rottame utilizzata.

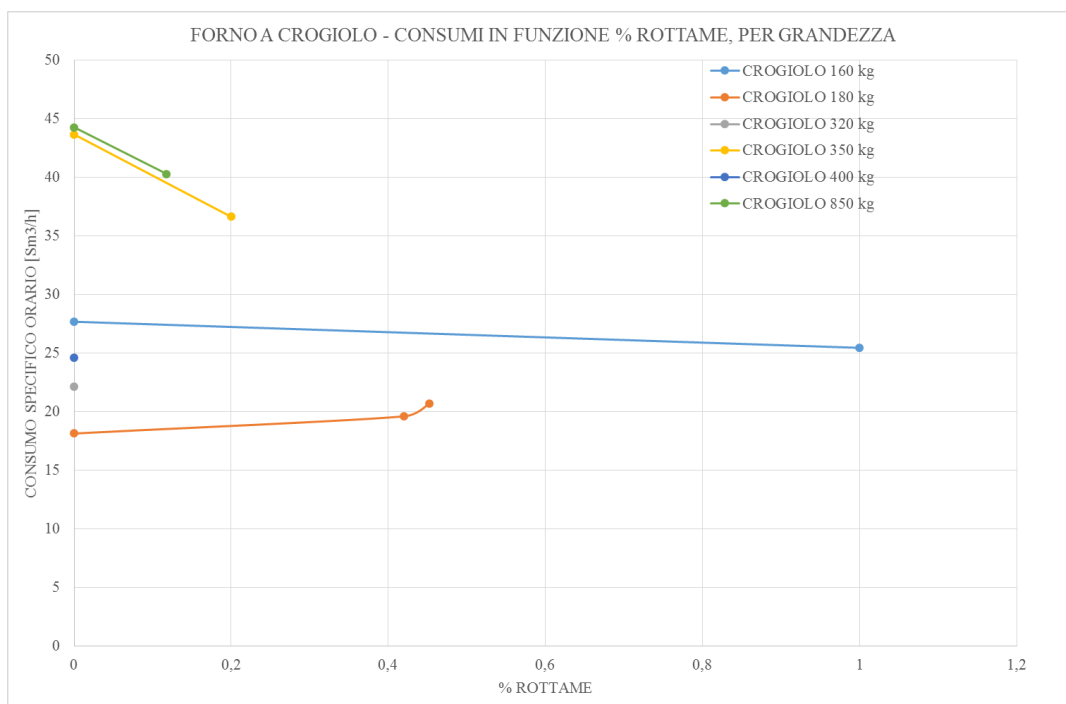


Figura 47 - Confronto consumi specifici orari in funzione della percentuale di rottame in fondita per i forni a crogiolo

Per i forni a crogiolo, la tendenza generale prevede un calo dei consumi all'aumentare della percentuale di rottame. Unico dato che differisce è quello riguardante il forno a

crogiolo da 180 kg, potrebbe essere influenzato da una diversa composizione del vetro fuso, anche dovuta da un colore del vetro diverso.

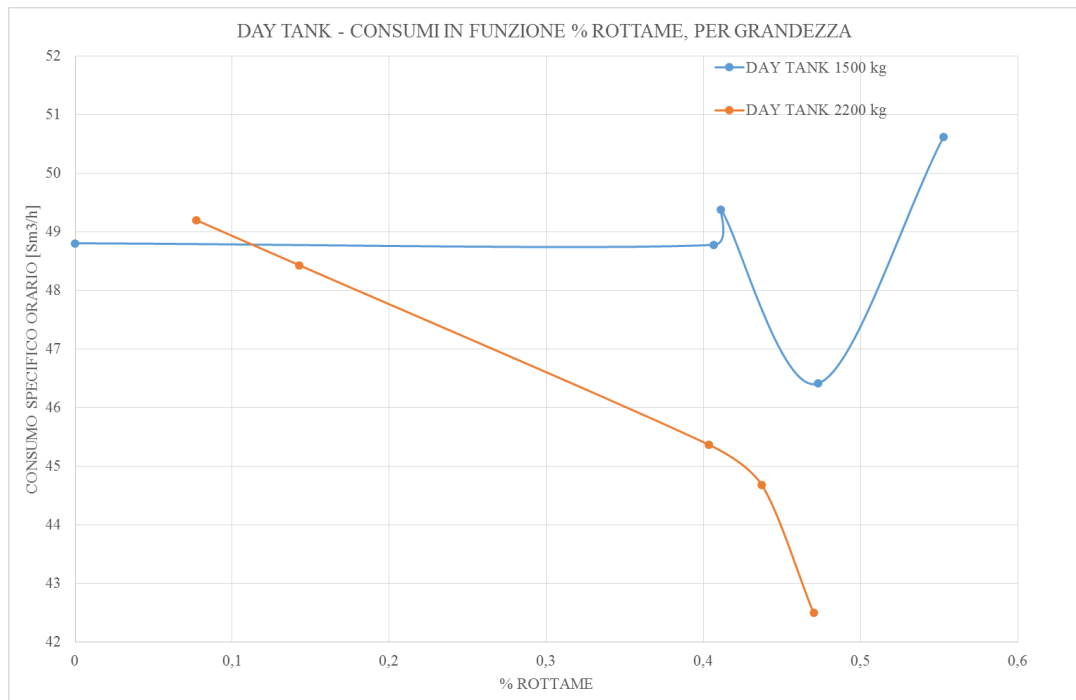


Figura 48 - Confronto consumi specifici orari in funzione della percentuale di rottame in fondita per i forni Day Tank

Per i day tank, il consumo diminuisce notevolmente per il day tank da 2200 kg, mentre l'andamento per il day tank da 1500 kg non è molto chiaro e per certe quantità di rottame sembra smentire l'andamento tendenziale.

3.2.5. Costruzione modello predittivo del consumo – curve di correlazione per determinazione baseline e fattori di aggiustamento, confronto modello predittivo con dati reali

Per la determinazione della baseline, per poter confrontare i risparmi ottenibili con la sostituzione del forno, è stato necessario richiedere al costruttore i valori dichiarati di consumo per varie tipologie di forno, per varie grandezze e per tecnologia (recente o obsoleta). Per forni nuovi si intendono forni dotati di struttura maggiormente solata, con regolazione automatica di combustione (bruciatori modulanti e regolazione elettronica di fiamma). I dati sono riportati nelle tabelle seguenti:

Tabella 9 - Consumi specifici orari dichiarati dal costruttore per varie tipologie e grandezze di forno ritenuti obsoleti, per ogni fase di lavorazione

FORNI OBSOLETI - CONSUMO GAS NATURALE				
	Affinaggio	Fusione	Lavorazione	Mantenimento
	Sm ³ /h	Sm ³ /h	Sm ³ /h	Sm ³ /h

Temperature [°C]	1400	1400	1100	1150
Capacità	Forno a crogiolo			
100	18	18	12	10
200	18	22	12	10
300	25	25	14	12
350	25	30	14	12
500	25	30	14	12
600	30	35	16	13
850	45	47,5	20	18
Capacità	Day Tank			
250	20	25	16	13
350	20	25	16	13
1200	35	42,5	20	15
2000	50	60	30	22
2400	50	70	30	22

Tabella 10 - Consumi specifici orari dichiarati dal costruttore per varie tipologie e grandezze di forno ritenuti di nuova costruzione, per ogni fase di lavorazione

FORNI NUOVI - CONSUMO GAS NATURALE				
	Affinaggio	Fusione	Lavorazione	Mantenimento
	Sm³/h	Sm³/h	Sm³/h	Sm³/h
Temperature [°C]	1400	1400	1100	1150
Capacità [kg]	Forno a crogiolo			
100	12	15	6	5
200	12	15	7	6
300	15	20	10	8
350	15	20	10	8
500	20	25	12	10
600	20	25	12	10
850	30	35	15	13,5
Capacità [kg]	Day Tank			
250	15	18	10	8
350	15	18	10	10
1200	30	35	17	12
2000	45	55	20	18
2400	45	55	20	18

Si riportano, per le due tipologie di forno, i grafici di confronto fra i dati ottenuti sperimentalmente durante la campagna misure e le curve di benchmark fornite dal costruttore, per ciascuna fase.

Forno a crogiolo

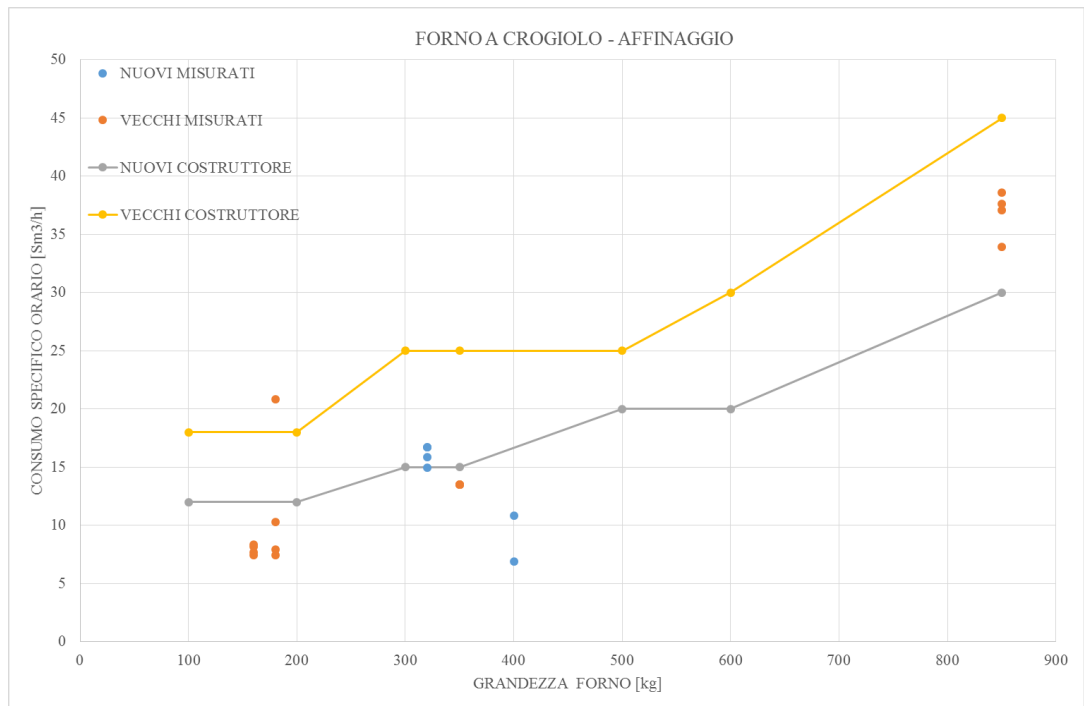


Figura 49 - Confronto consumi specifici orari tra misurazioni di forni recenti e obsoleti e le curve di consumo fornite dal produttore, per i forni a crogiolo in fase affinaggio

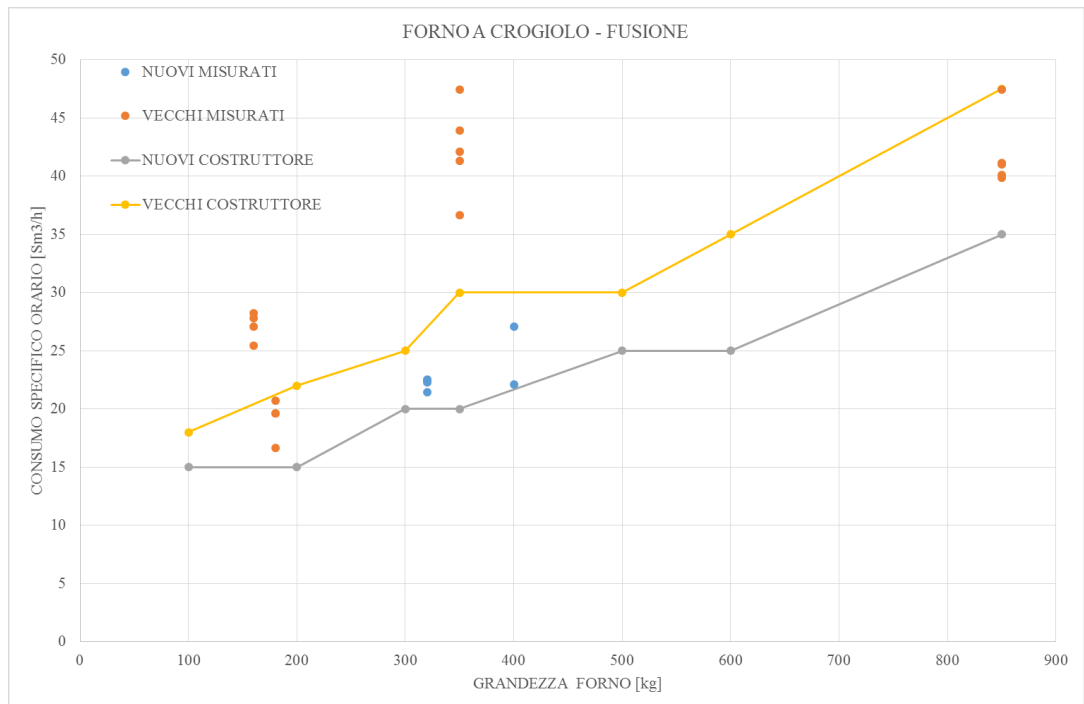


Figura 50 - Confronto consumi specifici orari tra misurazioni di forni recenti e obsoleti e le curve di consumo fornite dal produttore, per i forni a crogiolo in fase fusione

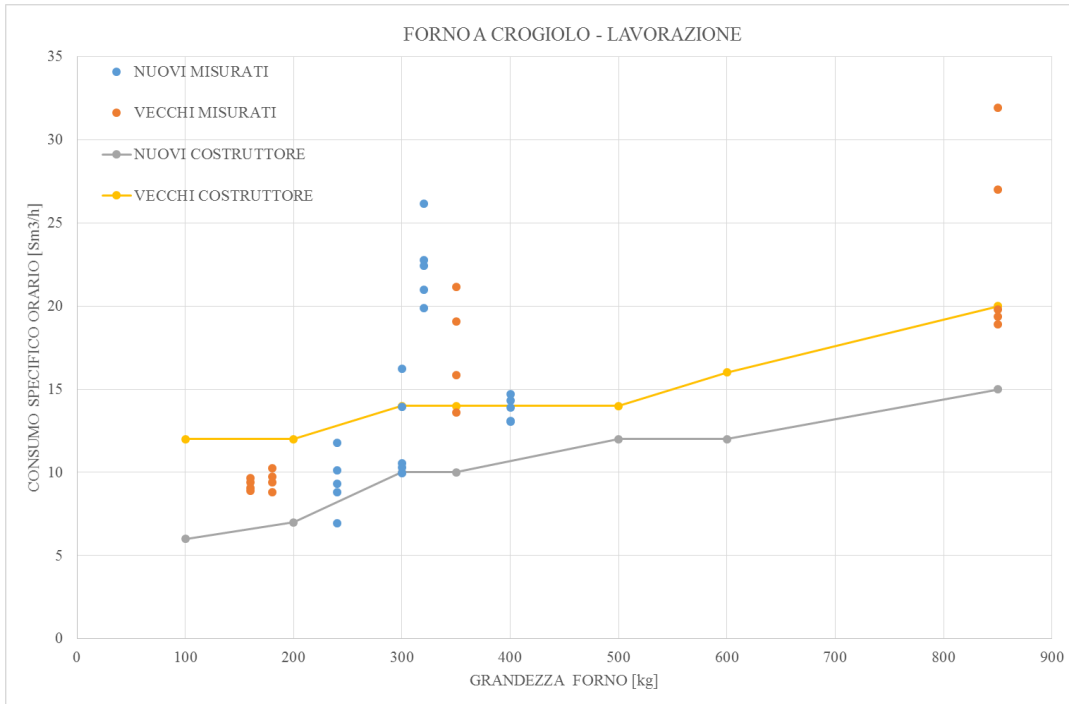


Figura 51 - Confronto consumi specifici orari tra misurazioni di forni recenti e obsoleti e le curve di consumo fornite dal produttore, per i forni a crogiolo in fase lavorazione

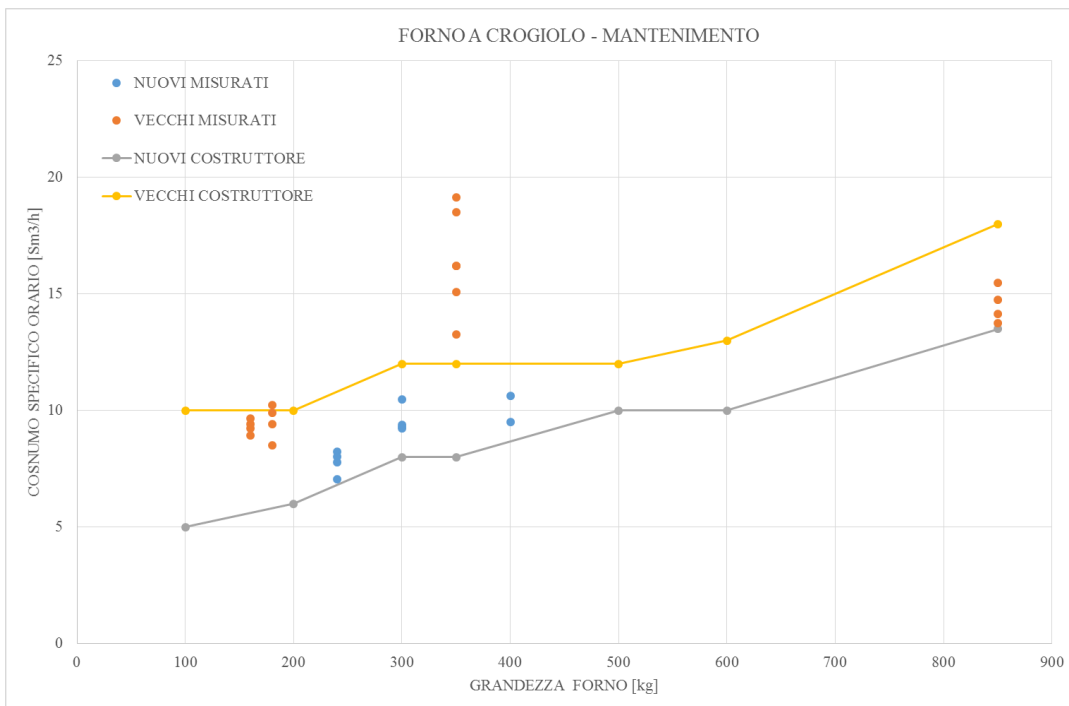


Figura 52 - Confronto consumi specifici orari tra misurazioni di forni recenti e obsoleti e le curve di consumo fornite dal produttore, per i forni a crogiolo in fase mantenimento

Per la totalità dei forni a crogiolo si nota la differenza tra le curve di consumo fornite dal costruttore, per ogni fase di lavorazione. Meno notevoli le differenze tra le misurazioni di

forni ritenuti vecchi, ovvero di tecnologia obsoleta e i forni nuovi, ovvero di tecnologia recente, durante la fase di affinaggio.

Per la fusione, i valori dei forni obsoleti si attestano ben al di sopra della curva fornita dal costruttore, mentre i forni nuovi si attestano in prossimità. È quindi osservabile quantitativamente il potenziale di efficientamento nella fase più energivora. Durante la lavorazione non è possibile stimare un risparmio direttamente dai valori misurati perché, come affermato in precedenza, la regolazione di fiamma dipende molto dal tipo di prodotto lavorato. Altra fase per cui è notevole il risparmio a livelli di consumo orario di gas naturale è il mantenimento: i valori per i forni obsoleti misurati si attestano al di sopra della curva costruttore, mentre per i forni recenti misurati si deve tenere conto che comunque non sono costruiti allo stato attuale dell'arte, quindi risultano avere consumi lievemente maggiori a quelli ottenibili con un forno aggiornato alla tecnologia attuale.

Day tank

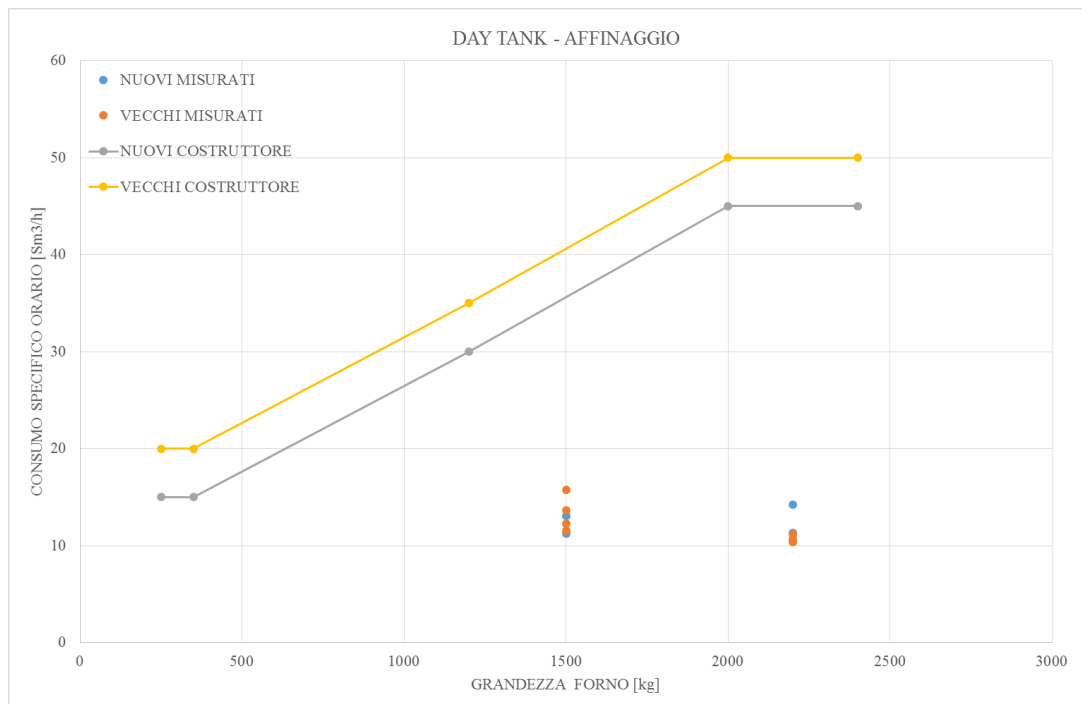


Figura 53 - Confronto consumi specifici orari tra misurazioni di forni recenti e obsoleti e le curve di consumo fornite dal produttore, per i forni Day Tank in fase affinaggio

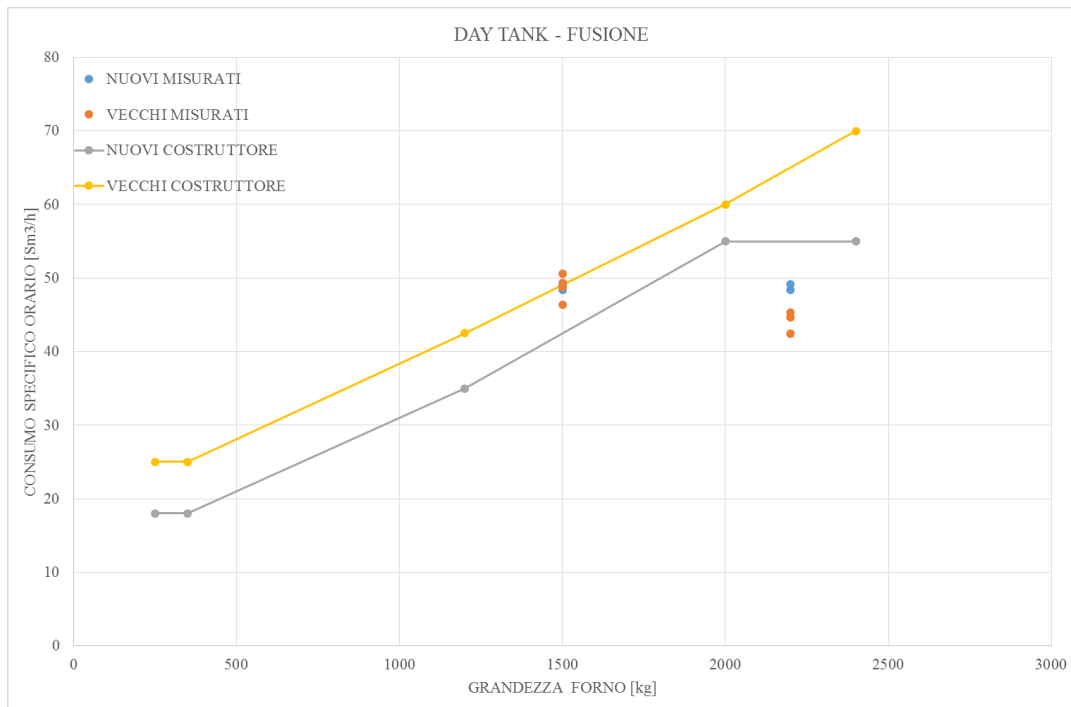


Figura 54 - Confronto consumi specifici orari tra misurazioni di forni recenti e obsoleti e le curve di consumo fornite dal produttore, per i forni Day Tank in fase fusione

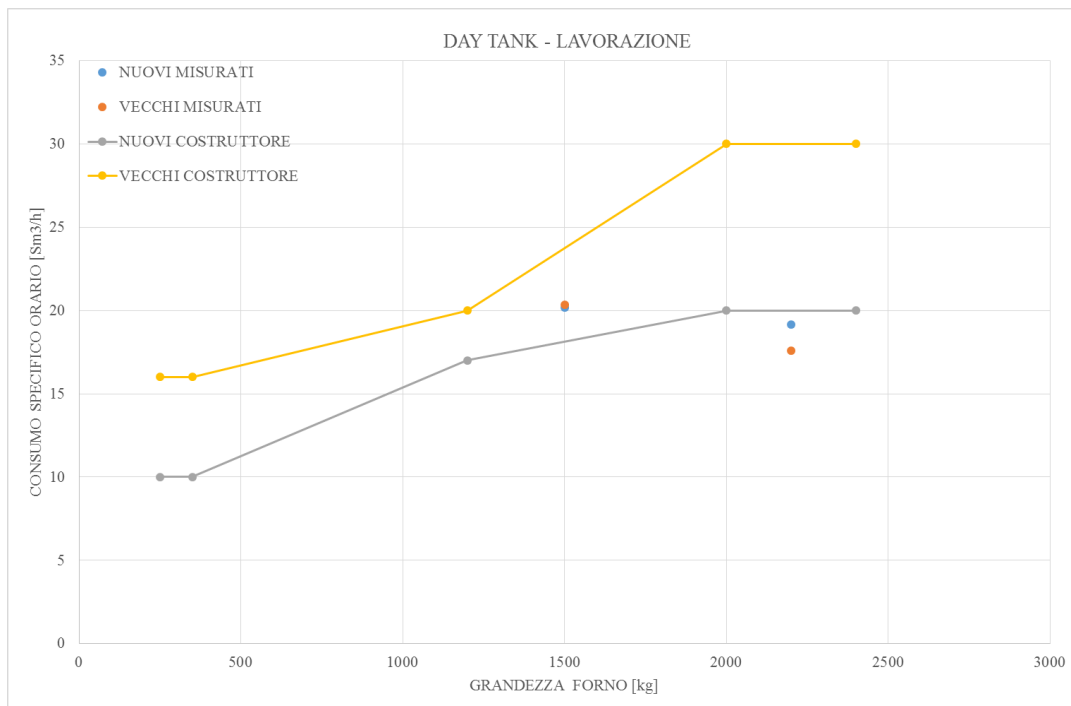


Figura 55 - Confronto consumi specifici orari tra misurazioni di forni recenti e obsoleti e le curve di consumo fornite dal produttore, per i forni Day Tank in fase lavorazione

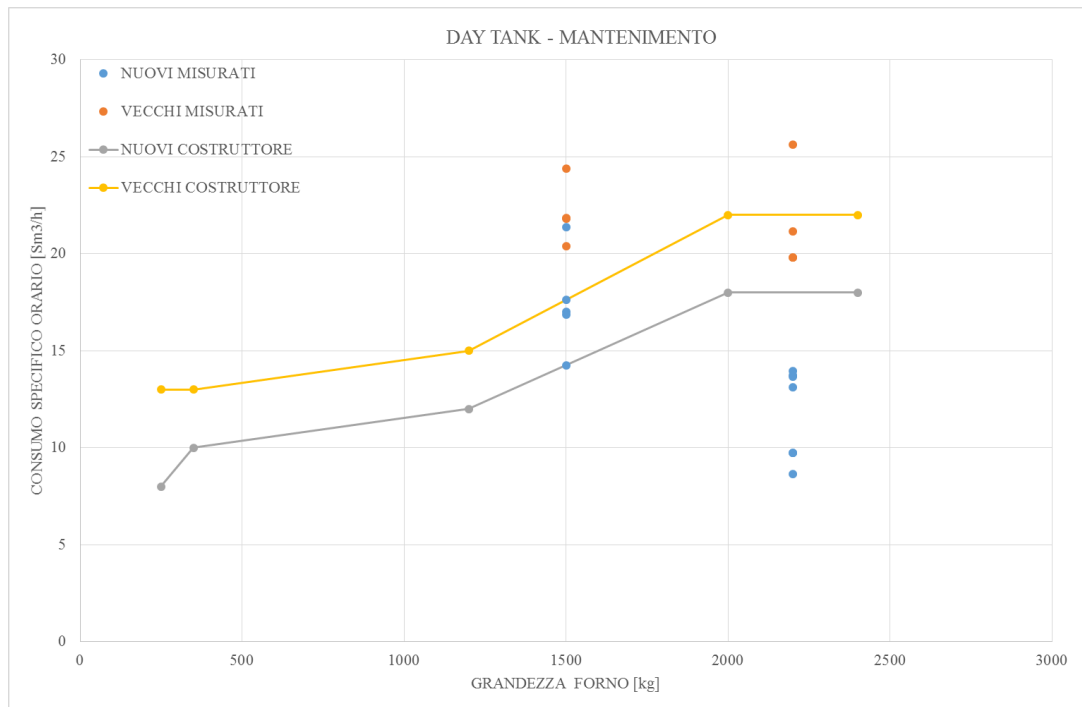


Figura 56 - Confronto consumi specifici orari tra misurazioni di forni recenti e obsoleti e le curve di consumo fornite dal produttore, per i forni Day Tank in fase mantenimento

Come per i forni a crogiolo, le considerazioni sui forni Day Tank sono simili. In questo caso, si nota un'assenza di misurazioni per taglie inferiori ai 1500 kg, dovuta all'indisponibilità di day tank di tali taglie nel campione disponibile per la misurazione. Per le fasi di fusione e lavorazione, i dati risultano essere poco significativi, mentre per l'affinaggio risultano essere fuorvianti. Il motivo potrebbe risiedere nel fatto che sono stati monitorati solamente due cicli di fusione e affinaggio e le condizioni ambientali esterne non erano favorevoli alle dispersioni di calore. I dati si rivelano interessanti per il mantenimento, nel quale sono state effettuate un numero maggiore di misure: in questo caso si possono notare consumi misurati da forni recenti anche notevolmente inferiori alla curva di consumi fornita dal costruttore, mentre i forni a tecnologia obsoleta ne confermano l'andamento.

Dalle considerazioni tecnologiche fatte nei paragrafi precedenti, il vantaggio della presenza del recuperatore e della regolazione automatica è innegabile. Inoltre, non si è discusso del vantaggio della sostituzione dei ventilatori di aspirazione e di immissione dell'aria comburente: la loro sostituzione con tecnologie con regolazione a Inverter garantiscono un guadagno a livello dei consumi elettrici notevole.

CAPITOLO 4 – ASPETTI TECNOLOGICI

4.1. Tipologie di forni: aspetti costruttivi e particolarità

FORNI A CROGIOLO

La fabbricazione di vetro in forni a crogiolo è stato l'unico modo di produrre vetro fino all'adozione dei forni a bacino e rimane ancor oggi il modo più conveniente di produrre alcuni tipi di vetro che richiedono frequenti variazioni di composizione e piccole quantità di materiale prodotto (vetri artistici, vetri d'ottica, vetri per usi scientifici). Fino al XIX secolo i forni a crogiolo avevano, con piccole modificazioni, una struttura a pianta circolare, con tre camere sovrapposte: una camera inferiore per la combustione del carbone, una centrale dove erano disposti i crogioli ed una superiore munita di camini per i prodotti della combustione che veniva impiegata anche come camera di ricottura. L'evoluzione di questi forni è avvenuta con l'introduzione del gas di gasogeno come combustibile (forni Siemens). L'entrata del gas e dell'aria di combustione avveniva in tali forni da un foro centrale, mentre i camini dei gas combusti erano disposti in corrispondenza a ciascun crogiolo, per avere tutti i crogioli avvolti dalla fiamma. La dimensione produttiva dei forni a crogiolo è funzione della dimensione del crogiolo e del numero di crogioli che vengono sistemati nella camera di combustione (attualmente sono 2 al massimo). (Dall'Igna, D'Este, & Maurina, 2012)

Il forno di fusione a crogiolo tradizionale muranese è particolarmente idoneo per le piccole vetrerie ed è principalmente utilizzato per produzioni artistiche manuali di vetri di elevata qualità.

Attualmente, il forno ospita due o tre crogioli, per esempio un crogiolo principale per il vetro trasparente e uno o due più piccoli per i vetri colorati. Il particolare disegno del forno consente di ottenere una ottima uniformità di temperatura al crogiolo ed al vetro in esso contenuto, a tutto vantaggio della qualità del vetro e della vita del crogiolo.

Costruttivamente, il forno a crogiolo è costituito da una base spessa di refrattario appoggiata al pavimento della fornace; per aumentare lo spessore della suola sottostante, attualmente si ricorre ad uno scavo del solaio (se possibile, quindi solo al piano terra) e quindi ad una creazione di una sottosuola e di una suola chiamata tradizionalmente "fredda". Tale suola fredda si estende oltre alla pianta del forno per circa 2 m rispetto all'ingresso del forno: oltre a garantire una sorta di taglio del ponte termico, permette di aumentare la sicurezza degli operatori e migliorare l'eventuale manutenzione straordinaria forno nel caso in cui vi fosse la rottura del crogiolo con conseguente

sversamento verso l'esterno del vetro fuso. Il forno quindi viene costruito con mattoni di refrattario di vario genere e spessore (tale argomento verrà trattato nel paragrafo dedicato), tenuto in sede da uno scheletro metallico costituito in carpenteria resistente a profilato in acciaio, attualmente si sta studiando una modalità di costruzione in cui la struttura è contenuta da un grigliato di dissipazione con alettature, per poter ridurre il più possibile la temperatura superficiale del forno.

All'interno del forno, vengono appoggiati sulla base, costituita da mattoni di refrattario opportunamente disposti, il crogiolo di refrattario, che conterrà il vetro fuso. I refrattari si differenziano per tipologia e composizione a seconda dei componenti del forno.



Figura 57 - Forno a crogiolo, vista frontale e interna in fase di costruzione (fonte Falorni s.r.l.)

In seguito alla posa del crogiolo, si provvede alla chiusura del forno con la costruzione della parte frontale, in cui sono poste una o più aperture verso l'interno del forno, chiamate bocche. Lo spessore della parte frontale del forno è sensibilmente minore al resto del forno; infatti deve permettere l'accesso agevole della canna con cui si va a cavare il vetro e un percorso breve verso la zona ad alta temperatura, altrimenti la lavorazione del vetro nelle fasi successive alla cavatura potrebbe rappresentare un problema, se il vetro si raffredda e perde la necessaria viscosità. Per la chiusura delle bocche di accesso al forno, si ricorre a portine in refrattario, poste manualmente dall'operatore. La movimentazione difficoltosa delle portine costituisce spesso un intralcio al lavoro e quindi il lavoratore tende ad evitare l'applicazione delle portine anche se necessarie con conseguente aumento indesiderato della dispersione di calore verso l'esterno.

La chiusura delle bocche con le portine, quindi, è effettuata solo nei periodi di mantenimento, di riscaldamento e di fusione.

La parte superiore del forno è chiusa da una volta a cupola. Superiormente, nei forni di nuova costruzione, si provvede all'installazione di una cappa mobile con frontalino, utile per ridurre la dispersione di calore verso l'alto in fondita.

L'ingresso del bruciatore è posto inferiormente, sotto al livello dei crogioli. La fiamma può essere di tre tipologie, che verranno discusse nel paragrafo riguardante la regolazione automatica della combustione.

La fiamma circonda il crogiolo, il vetro di qualità tale per poter essere lavorato si trova nei primi 10 cm, dopo tale profondità perde qualità a causa dell'erosione del refrattario, che provoca variazioni di composizione e quindi "corde" ben visibili nel vetro.

I fumi di combustione vengono convogliati lateralmente, per sfruttarne al massimo la potenzialità termica e quindi convogliati verso il camino. Tra il collettore e il camino si può trovare il recuperatore di calore, la tipologia più frequente è a tubi concentrici alettati, anche detto "a intercapedine". Infine i fumi vengono convogliati a tiraggio forzato verso i sistemi di abbattimento delle emissioni, ai sistemi di controllo delle emissioni (che sono registrabili) e quindi allo scarico verso l'esterno. L'eventuale regolazione si trova un pannello laterale.

Nelle figure seguenti sono rappresentate le caratteristiche costruttive del forno:

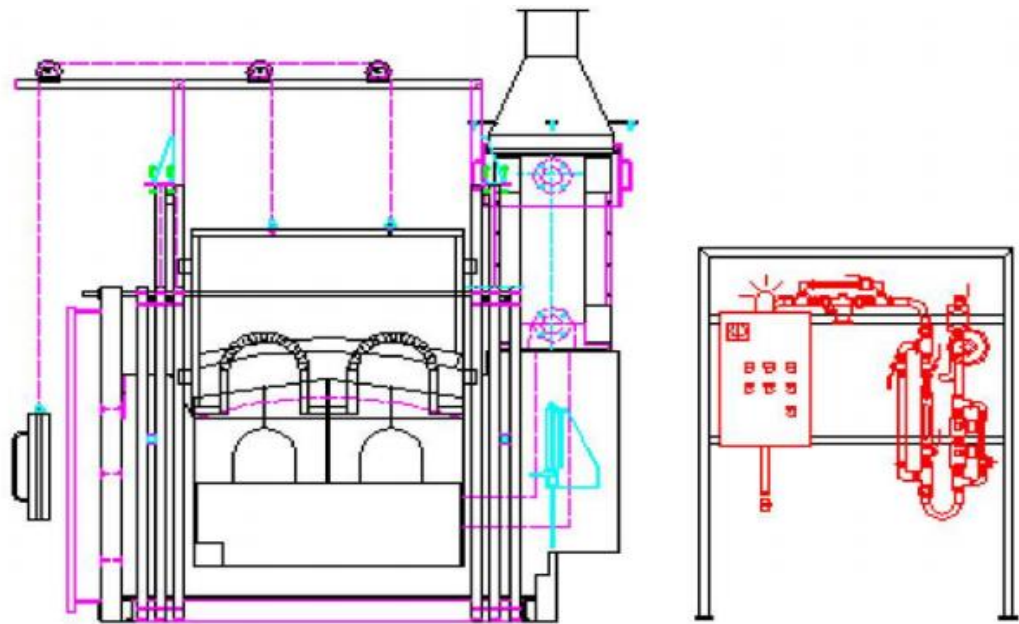


Figura 58 - Forno a crogiolo, vista frontale (Dall'Igna, D'Este, & Maurina, 2012)

Nella figura 58 è riportata la vista frontale di un tipico forno a crogiolo: si possono identificare gli ingressi, la struttura laterale in profilati di acciaio, la movimentazione servocomandata delle portine e della cappa isolante, il recuperatore e il camino.

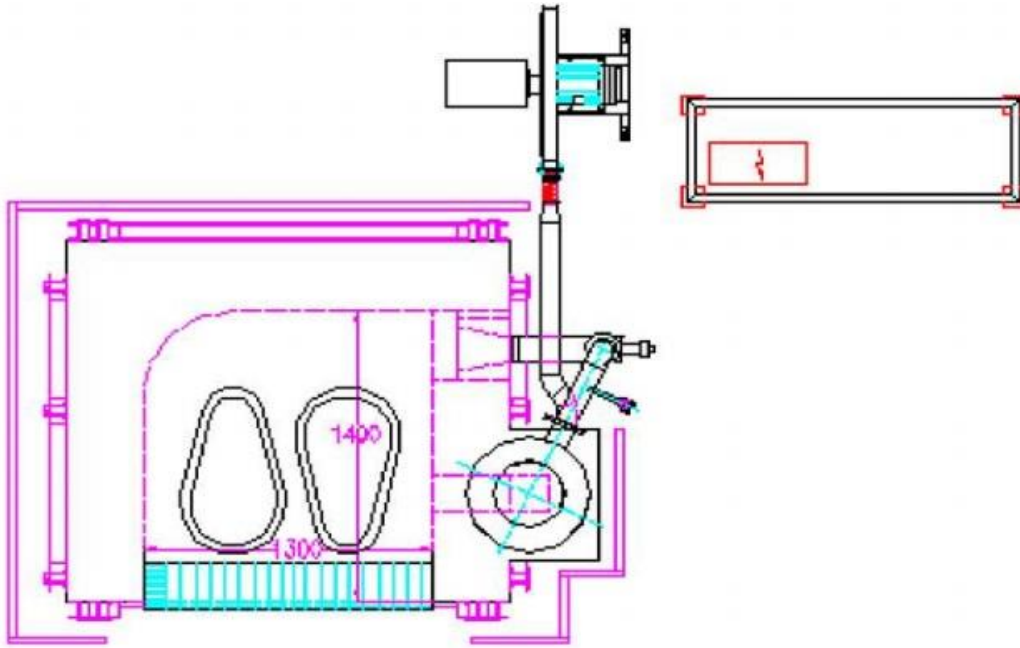


Figura 59 - Forno a crogiolo, vista dall'alto (Dall'Igna, D'Este, & Maurina, 2012)

Nella figura 59, si possono identificare i due crogioli a forma eccentrica (tale forma permette di avvicinare i crogioli e costruire quindi forni di dimensioni minori a parità di capacità), l'imbocco del bruciatore con aria comburente proveniente dal recuperatore a tubi concentrici.

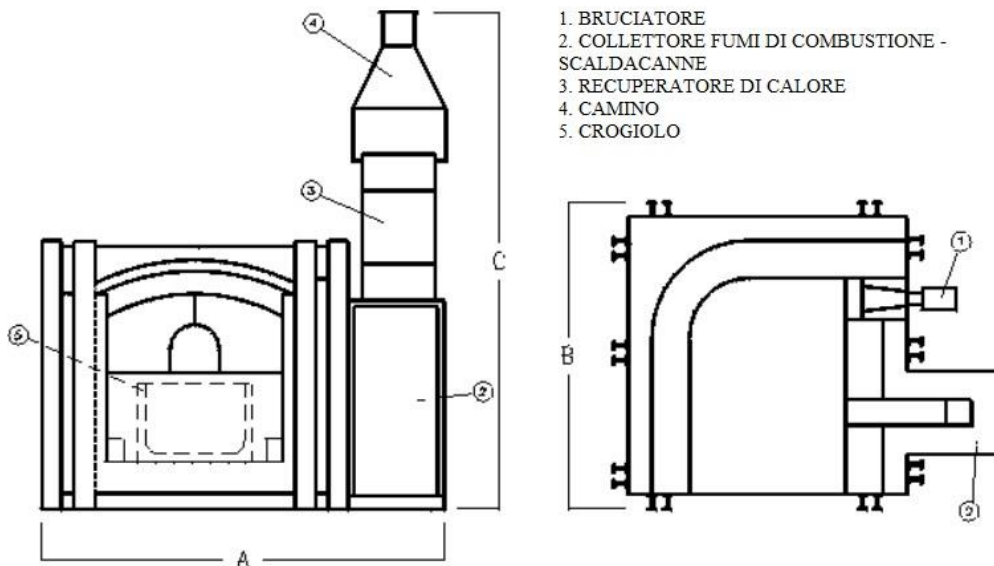


Figura 60 - Forno a crogiolo, schema di massima (fonte MT s.r.l.)

In figura 61, infine, vi è un'immagine di un tipico forno per il vetro artistico, in questo caso sono presenti le portine di refrattario alle bocche.



Figura 61 - Forno a crogiolo (fonte MT s.r.l.)

DAY TANK

I forni a vasca, nei quali una vasca di refrattario sostituisce il crogiolo, sono in continua diffusione.

I motivi per cui ci si orienta verso i forni a vasca sono: la sicurezza (la vasca non si rompe come il crogiolo) e la qualità; se è vero che la qualità massima ottenibile in un forno a vasca è inferiore alla qualità massima ottenibile in un forno a crogiolo, è anche vero che per quanto riguarda la qualità media è migliore quella dei forni a vasca per tutta una serie di ragioni, che coinvolgono il riscaldamento della massa fusa, la distribuzione del calore all'interno del forno e del vetro fuso, la posizione della fiamma rispetto alla vasca (cambia la modalità di trasmissione del calore) e la possibilità che il refrattario inquina il vetro fuso; hanno inoltre un prezzo di mercato inferiore. L'aspetto negativo principale è costituito dalla poca versatilità in termini di colore del vetro fuso, infatti sono più capienti e a vasca unica, pertanto è prevedibile l'uso per una grande quantità di vetro fuso dello stesso colore, più spesso vetro trasparente. La vasca unica garantisce una capacità produttiva fino ai 3000 kg/giorno, contro alla capacità produttiva di un forno a crogiolo, compresa tra i 150 e gli 850 kg/giorno.

I consumi specifici minori rispetto al forno a crogiolo, ma comunque elevati, derivano non solo dal basso grado di preriscaldamento dell'aria ma anche dal fatto che una buona parte (40 ÷ 50 %) del vetro contenuto a volte non viene lavorata ma rimane all'interno per partecipare ad una nuova fusione.

Costruttivamente, i forni day tank differiscono dai forni a crogiolo per la vasca che contiene il vetro fuso, infatti la vasca, detta anche *tank* è direttamente integrata con il forno, per cui non è il forno e l'atmosfera a riscaldare il crogiolo stesso, ma la vasca è strutturalmente e direttamente riscaldata.

La vasca in refrattario può essere di forma circolare o rettangolare, le geometrie diverse non implicano alcuna differenza nella qualità del vetro, mentre la forma circolare garantisce una distribuzione della temperatura più uniforme. L'altezza della vasca è di 30 – 35 cm.

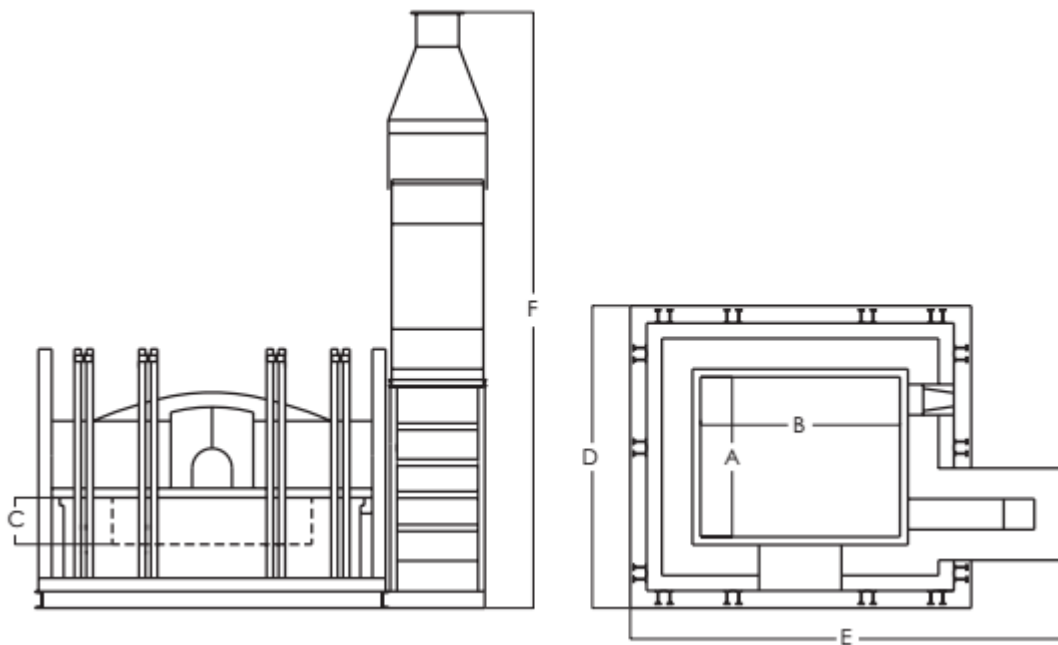


Figura 62 - Forno Day Tank a vasca rettangolare, vista frontale e dall'alto (fonte MT s.r.l.)

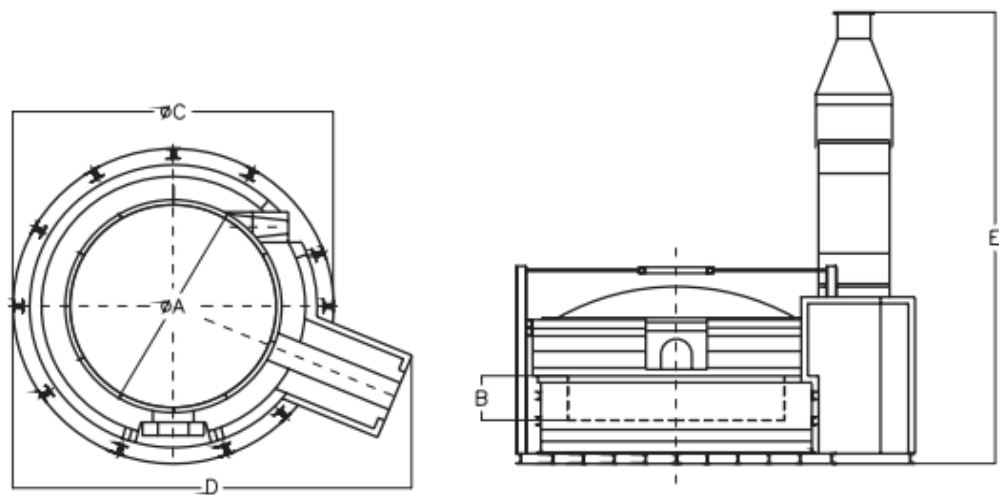


Figura 63 - Forno Day Tank a vasca circolare, vista dall'alto e frontale (fonte MT s.r.l.)

La fiamma del bruciatore è tangente alla superficie circolare del forno e posta al di sopra del livello del vetro fuso, seguendo una traiettoria a U.

Esistono in commercio vari tipi di forni Day Tank: a vasca fissa, per capacità comprese tra i 500 kg e i 4000 kg e a vasca mobile intercambiabile, con capacità tra i 90 kg e i 600 kg.



Figura 64 - Forno Day Tank, vasche fisse (fonte FALORNI s.r.l.)



Figura 65 - Forno Day Tank, vasche mobili intercambiabili (fonte Falorni s.r.l.)

Le vasche mobili sono trasportabili e compatte, l'intercambiabilità della vasca indipendentemente dalla sovrastuttura la rende versatile e facile da sostituire in manutenzione. Inoltre, i forni Day Tank a vasca intercambiabile, detti commercialmente mini Day Tank, offrono la possibilità di ridurre i consumi di energetici poiché sono stati studiati minimizzando la quantità di materiale refrattario impiegato nella costruzione. Infatti, l'inerzia termica di questo tipo di forni è molto minore rispetto ad un Day Tank tradizionale e il riscaldamento del refrattario incide meno sui consumi.

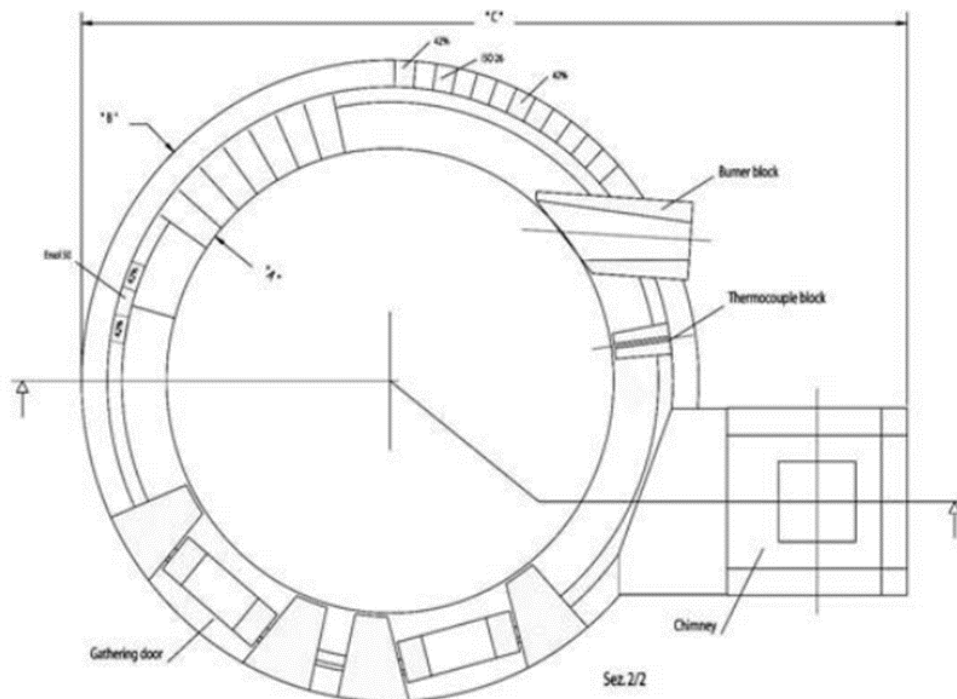


Figura 66 - Forno Day Tank, a vasca fissa (fonte Falorni s.r.l.)

Dalla figura 66, si nota che la posizione del bruciatore (*burner block*) è opposta rispetto alla bocca di entrata (*gathering door*) e che l'imbocco del camino si trova quasi a fianco

del bruciatore ma posto controcorrente, in tal modo si evitano corto-circuiti di flusso termico.

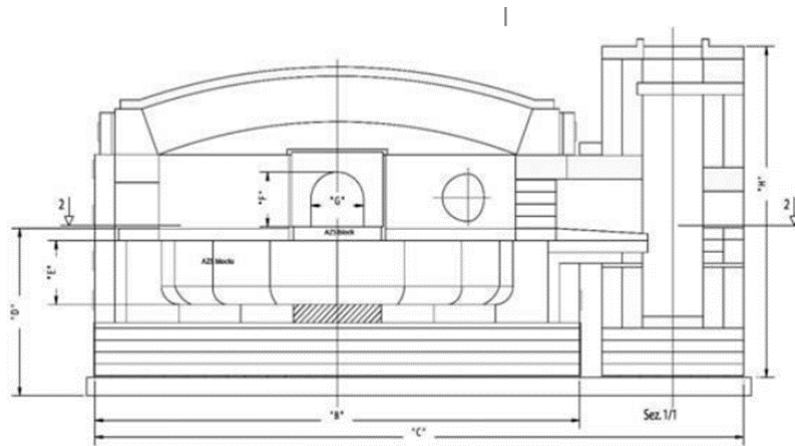


Figura 67 - Forno Day Tank, a vasca fissa, vista frontale (fonte Falorni s.r.l.)

L'aspetto esteriore del forno è simile al forno a crogiolo, con dimensioni maggiori.

4.2. Refrattario e Isolamento

I forni per la produzione di vetro, viste le temperature in gioco, sono costituiti soprattutto da materiali refrattari che sono così definiti perché rimangono stabili a temperature elevate; in particolare vengono impiegati solo quei refrattari che resistono all'ambiente in cui avviene la fusione del vetro.

L'isolamento è il primo step per migliorare l'efficienza energetica di un forno. Il flusso termico disperso dalle pareti verso l'esterno e il suolo è il preponderante. Essenziale quindi è la corretta scelta, dimensionamento e applicazione del materiale refrattario nella costruzione del forno.

Un refrattario è costituito da materie prime refrattarie che, dopo frantumazione e macinazione, sono allo stato di granelli di dimensioni che vanno, a seconda del prodotto, da qualche millimetro a pochi micron. La compattazione, più o meno spinta, di queste particelle e la loro successiva cottura (o sinterizzazione) dà luogo ad un prodotto che non è compatto, come può esserlo un materiale metallico, ma che possiede una certa porosità; questa porosità condiziona molte proprietà del refrattario. Se esaminiamo la struttura dei singoli granelli riscontriamo che la maggior parte dei prodotti refrattari è costituita da materiali polifasici con una fase vetrosa che circonda fasi cristalline.

I primi refrattari erano a base di argilla e quindi appartenevano al sistema silico-alluminoso; Successivamente con l'affermarsi della siderurgia (1800) si cominciò ad utilizzare la magnesite; poi si iniziò ad utilizzare la silice, la cromite, la grafite ed infine gli elettrofusi. In tabella 1 viene riportata il fabbisogno specifico di materiale da costruzione per tonnellata di vetro, mentre in tabella 2 viene riportata una prima classificazione dei refrattari. Il progresso delle caratteristiche dei refrattari ha consentito un miglioramento sia della qualità che della produttività.

Tabella 11 - Fabbisogno di materiale per tonnellata di vetro (Dall'Igna, D'Este, & Maurina, 2012)

Peso in Kg	Tipo di materiale	Posizione
0,5 ÷ 4,0	Refrattario AZS	contatto vetro - impilaggi camere
0,5 ÷ 1,0	Refrattario SiO ₂	sovrastuttura - volta
1,0 ÷ 3,0	Refrattario MgO	impilaggi e struttura camere
0,5 ÷ 1,0	Refrattario SiO ₂ - Al ₂ O ₃	placcaggi vari - isolamento
0,6	Acciaio	carpenteria

Tabella 12 - Classificazione dei materiali refrattari secondo UNI 4450

Tipo	Gruppo	Componenti caratteristici	
Silicei	Acidi	SiO ₂	94 %
Silicosi	Acidi	SiO ₂	75 ÷ 90 %
Silico alluminosi	Acidi	Al ₂ O ₃	20 ÷ 44 %
Alluminosi	Acidi	Al ₂ O ₃	≥ 50 %
Magnesiaci	Basici	MgO	≥ 80 %
Forsteritici	Basici	MgO SiO ₂	40 ÷ 55 % 30 ÷ 45 %
Cromo magnesiaci	Basici	MgO	30 ÷ 75 %
Magnesio cromiti	Basici	Cr ₂ O ₃	10 ÷ 45 %
Dolomitici	Basici	MgO CaO	40 % 40 ÷ 55 %
Cromitici	Neutri	Cr ₂ O ₃	35 ÷ 50 %
Di carbone	Neutri	C	90 %
Grafitici	Neutri	C	Variabile
Di carburo di silicio	Neutri	SiC	≥ 50 %
Zirconici	Neutri	ZrO ₂	≥55 %

Attualmente, il più usato dei refrattari sinterizzati è sicuramente la silice le cui caratteristiche principali sono riportate nella tabella 3; come si vede ci sono prodotti differenti a seconda del grado di porosità, che influisce sulla conducibilità termica, e della composizione mineralogica influenzata dal grado di cottura.

Tabella 13- Proprietà principali dei refrattari in Silice

		Silice	Silice porosa	Silice fusa
SiO ₂	% in ossidi	95 ÷ 97	91 ÷ 93	93 ÷ 99,8
Al ₂ O ₃		0,3 ÷ 0,8	1,1 ÷ 2,5	0,002 ÷ 0,6
Fe ₂ O ₃		0,2 ÷ 0,8	0,8 ÷ 1,2	0 ÷ 0,3
CaO		1,5 ÷ 2,7	3,5 ÷ 5,7	0 ÷ 5,5
TiO ₂		0,1 ÷ 0,2	0	0 ÷ 0,1
Alcali		0,1 ÷ 0,3	0,2 ÷ 0,4	0 ÷ 0,2
Tridimite	composizione mineralogica %	45 ÷ 55	nd	-
Cristobalite		35 ÷ 40	nd	< 1
Quarzo		0,5 ÷ 2	nd	0 ÷ 5
Wollastonite		3 ÷ 4	nd	-
Fase vetrosa (impurezze)		8 ÷ 12	nd	0 ÷ 1
Silice fusa		-	nd	94 ÷ 98
Densità	[g/cm ³]	1,75 ÷ 1,9	0,5 ÷ 1,25	1,7 ÷ 2,0
Porosità apparente	[%]	17 ÷ 25	> 45	10 ÷ 25
Resistenza compressione a freddo	[N/mm ²]	28 ÷ 40	2,0 ÷ 5,0	23 ÷ 88
Dilatazione dopo 2 h a 1600 °C	%	<0,5 ÷ 0,8	< 2,0	<0,5
Espansione a 1000 °C	%	1,2 ÷ 1,4	1,1 ÷ 1,4	0 ÷ 0,5
Resistenza a scorrimento viscoso carico di 0,2 N/mm ²	[°C]	~1500	nd	~1500

Per refrattari elettrofusi si intende una vasta gamma di prodotti con varia composizione chimica ma prodotti con la stessa tecnologia di fabbricazione: fusione in forno ad arco elettrico di una miscela e colaggio del fluido in appositi stampi.

L'origine degli elettrofusi risale al 1925, anno in cui fu brevettato dalla Corhart Glass un procedimento di lavorazione per ottenere prodotti essenzialmente costituiti da mullite ed ottenuti per fusione all'arco elettrico di miscele ad alto tenore di bauxite. L'applicazione di questi refrattari nei forni fusori per vetro portò a risultati sorprendenti; in essi era assente l'ossido di zirconio che venne aggiunto alla miscela in tempi successivi. Oggi il più vasto impiego dei refrattari elettrofusi è per il rivestimento dei forni fusori per vetro. Durante la fusione si raggiungono temperature dell'ordine di 2000 ÷ 2200 °C. I refrattari elettrofusi più diffusi sono riportati, con il nome commerciale e la composizione in tabella 4.

Tabella 14 - Composizione chimica di refrattari elettrofusi

Comp. Chim.	ER 1681	ER 1711	ER 216	ER 1195	Jargal M	Jargal H	REF 1532	REF 1334	REF 1240
Al ₂ O ₃	50,6	45,9	28,3	0,85	95,0	94,5	50,3	51,3	45,8
Cr ₂ O ₃	-	-	28,0	-	-	-	-	-	-
ZrO ₂	32,5	40,8	28,0	94	-	-	32,7	34,0	40,8
SiO ₂	15,7	12,3	14,5	4,5	1,2	0,1	15,8	13,5	12,3
Na ₂ O	1,1	0,8	1,1	0,35	3,5	5,2	1,05	0,98	0,92
Fe ₂ O ₃	0,08	0,08	0,05		0,05	0,05	0,08	0,08	0,08
TiO ₂	0,07	0,08	0,05		tracce	tracce	0,07	0,08	0,08

Le proprietà più importanti sono il coefficiente di dilatazione, la conducibilità termica ed ovviamente la resistenza alle condizioni di utilizzo ad alte temperature.

Il coefficiente di dilatazione determina la risposta strutturale del materiale alle variazioni di temperatura; tenere conto del coefficiente di dilatazione è importantissimo durante la fase di preriscaldamento del forno; infatti bisogna permettere ai vari materiali di dilatarsi senza aprire eccessive vie di fuga al vetro o ai prodotti di combustione e senza creare tensioni eccessive.

Un'analisi semplificata dello studio dell'applicazione di diversi spessori di refrattari può prevedere la trattazione a Pollici Equivalenti di Refrattario (*Equivalent Inches of Firebricks*) (Correll, Charles M., s.d.), secondo la trattazione svolta da (Greens, 1959).

Per i vari tipi di refrattario si indicano gli E.I.F, partendo dal valore corrispondente all'unità per il mattone pieno di refrattario pesante e il refrattario pesante a colata.

Nella tabella 15 sono riportati gli E.I.F dei vari materiali.

Tabella 15 - E.I.F. per varie tipologie di refrattario

MATERIALE	E.I.F.
Refrattario in mattone – pesante	1
Refrattario a colata – pesante	1
Refrattario a colata – t esercizio: 1370 - 1650 °C	2.92
Refrattario a colata – t esercizio: 1204 °C	4.80
Refrattario in mattone – leggero – t esercizio: 1093° C	4.30
Refrattario in mattone – leggero – t esercizio: 1426° C	3.70
Refrattario in mattone – leggero – t esercizio: 1537° C	3.15
Refrattario in Vermiculite – t esercizio: 871 °C	12.00
Refrattario in fibra ceramica – t esercizio: 1315 °C	12.00

Per Correll, si procede alla moltiplicazione del E.I.F. per lo spessore di ogni refrattario in pollici o in centimetri (comunque si tratta di una relazione tra materiali), ottenendo l'E.I.F. totale con cui confrontare le varie stratigrafie possibili.

Tabella 16 - stratigrafia tipica di un forno per il vetro artistico muranese

Strato	Materiale	Spessore [cm]	E.I.F.	Prodotto
1	Allumina – mattoni pieni	22	1	22
2	Refrattario in mattone leggero t esercizio: 2600° C	11	3.7	40.7
Totale		33	4.7	62.7

Tabella 17 - Stratigrafia con aggiunto refrattario in fibra ceramica

Strato	Materiale	Spessore [cm]	E.I.F.	Prodotto
1	Allumina – mattoni pieni	22	1	22
2	Refrattario in mattone leggero t esercizio: 1426° C	11	3.7	40.7

3	Refrattario in fibra ceramica t esercizio: 1315 °C	2.5	12	30
Totale		35.5	16.7	92.7

Tabella 18 – Stratigrafia di forno con refrattario proposto da Correll

Strato	Materiale	Spessore [cm]	E.I.F.	Prodotto
1	Allumina – mattoni pieni	5.1	1	5.1
2	Refrattario a colata t esercizio: 1648 °C	5.1	2.9	14.8
3	Refrattario in Vermiculite t esercizio: 871 °C	17.7	12	212.4
Totale		27.9	15.9	232.3

Dallo studio emerge che, modificare il tipo di refrattario, porterebbe ad una diminuzione del flusso termico disperso (a cui il fattore E.I.F. è legato in maniera inversamente proporzionale), a parità di differenza di temperatura, del 47 % con la sola aggiunta di 2.5 cm di fibra di ceramico e del 270 % se si “rivoluziona” la struttura con materiali ad altissimo indice E.I.F. a spessore ridotto. (Ferry, McMahon, Portnoy, & Troiano, 2006). Le perdite dovute alle dispersioni attraverso l’involucro costituiscono il 20 – 30% sul totale delle perdite.

Le considerazioni positive sulla modifica della stratigrafia del forno da vetro vengono però mitigate dal fatto che la maggior parte delle dispersioni di calore avvengono tramite la bocca aperta del forno e anche dal fatto che un aumento dell’isolamento provoca un aumento dei tempi per il riscaldamento del forno, dovuto dall’inerzia termica delle pareti. Se l’isolamento risulta sovradimensionato, infatti, si incorre in difficoltà di smaltimento calore nel passaggio tra la fusione e la lavorazione, che richiede temperature minori. Il corretto dimensionamento, quindi, permette al forno sia di limitare le dispersioni di calore verso l’esterno che di poter raggiungere in tempi adeguati le temperature richieste.

Per i forni di nuova installazione, si prevede la seguente stratigrafia:

Tabella 19 - Stratigrafia di forno di nuova generazione

Strato	Materiale	Spessore [cm]	E.I.F.	Prodotto
1	Refrattario siliceo in mattone pieno	23	1	23
2	Refrattario siliceo in mattone leggero	6.5	3.70	24.05
3	Refrattario in mattone leggero	11.5	3.15	36.225
4	Refrattario in fibra ceramica	2	12	24
Totale		43	19.85	107.275

Per tale stratigrafia, si prevede un miglioramento teorico del 72% rispetto alla stratigrafia della tabella 16. Da notare che tale stratigrafia è stata studiata con materiali adatti all'interruzione del flusso termico, per esempio tra lo strato 1 e 3. Considerando che, nella costruzione del forno, è inclusa la creazione di una suola al terreno più spessa costituita da pavimento in mattoni in refrattario (figura 68) e che il poggialino (mensola posta all'apertura del forno) viene costruito in materiale refrattario con taglio termico, per evitare dannosi ponti termici verso l'esterno, la leva di miglioramento costituita dal refrattario è di gran lunga quella che offre una potenzialità di efficientamento maggiore, anche a prescindere dall'utilizzo.

È possibile calcolare le dispersioni di calore con la seguente formula:

$$\dot{Q} = \frac{S}{\left(\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{l_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha}\right)} * (T_{interna} - T_{ambiente})$$

$$\lambda = \text{conducibilità termica} \left[\frac{W}{mK}\right]; l = \text{spessore [m]}; S = \text{superficie [m}^2\text{]};$$

$$\alpha = \text{coefficiente di convezione e irraggiamento in ambiente}; \dot{Q} = \text{flusso termico disperso [W]}$$

Per disperdere il calore in eccesso dalla superficie del forno, si è applicato un grigliato metallico alettato, come in figura 69.



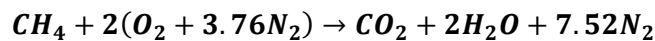
Figura 68 - Parte frontale inferiore, da notare suola in materiale refrattario e sistemi per lo scarico del vetro in caso di rottura del crogiolo



Figura 69 - Forno a crogiolo di nuova costruzione: dettaglio di grigliato esterno disperdente

4.3. Combustione: principi e regolazione automatica

Per ottenere una combustione corretta ed efficiente, è necessario mantenere un rapporto di miscela aria comburente/gas naturale in prossimità del rapporto stechiometrico. Teoricamente, la migliore miscela è costituita da aria in quantità sufficiente per fornire abbastanza ossigeno per bruciare completamente la totalità del combustibile, tale rapporto è noto come rapporto stechiometrico. Se la quantità di ossidante è maggiore rispetto alla quantità per il rapporto stechiometrico, la miscela si dice *povera* o *lean* e l'atmosfera si dice "ossidante"; se la quantità di ossidante è inferiore a quella richiesta dalla proporzione stechiometrica, la miscela si dice *ricca* o *rich* e la miscela si dice "riducente". Il rapporto stechiometrico si ottiene da semplici considerazioni sulla reazione di combustione, per il metano CH₄, componente principale del gas naturale, la relazione stechiometrica può essere rappresentata come:



(Turns, 2012)

In entrambi i casi, ovvero con fiamme non stechiometriche, si verificano perdite di efficienza nella fiamma e di conseguenza un uso inefficiente del carburante.

Per poter regolare adeguatamente il rapporto stechiometrico, è necessario regolare la quantità di combustibile e di aria comburente in ingresso al forno. La regolazione può essere manuale, dal lato combustibile agendo semplicemente sulla valvola della rete del gas naturale, mentre lato aria agendo sul ventilatore. In genere, la linea dell'aria ha diametro nominale 1 1/2" o 2". Il gas ha una linea con diametro nominale 3/4".

Esistono principalmente tre metodi per produrre tale miscela:

- **Premiscelazione di aria comburente e combustibile**

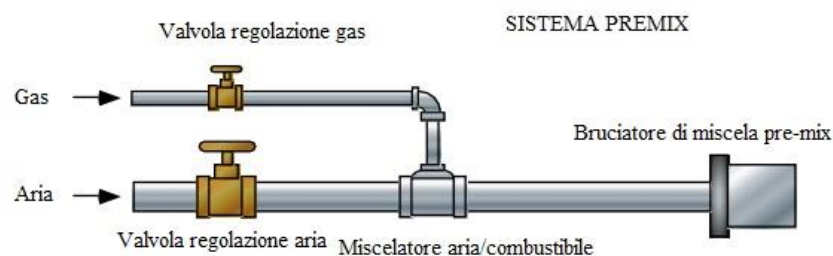


Figura 70 - Sistema di premiscelazione aria/combustibile (fonte Correll)

In questo sistema, aria e combustibile vengono premiscelate nel miscelatore. La miscela viene poi inviata al bruciatore.

- **Sistema di miscelazione ad ugello**

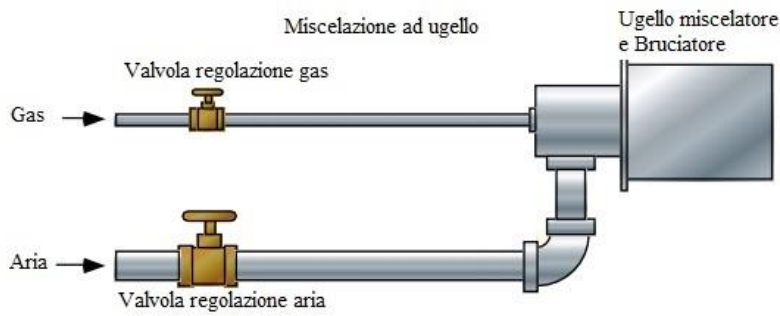


Figura 71 - Sistema di miscelazione ad ugello (fonte Correll)

In questo sistema, aria e combustibile vengono inviati in maniera indipendente all'ugello miscelatore, che realizza la miscela in prossimità del bruciatore. Ugello miscelatore e bruciatore sono integrati e si trovano all'interno del forno.

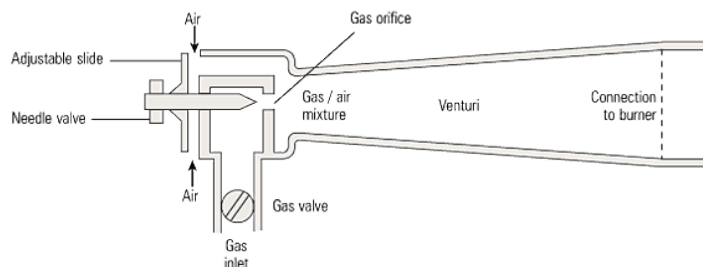


Figura 72 - Ugello miscelatore e bruciatore (fonte spiraxsarco.com)

A seconda della miscelazione indotta dall'ugello, la fiamma può avere ancora caratteristiche da fiamma non premiscelata o diffusiva.

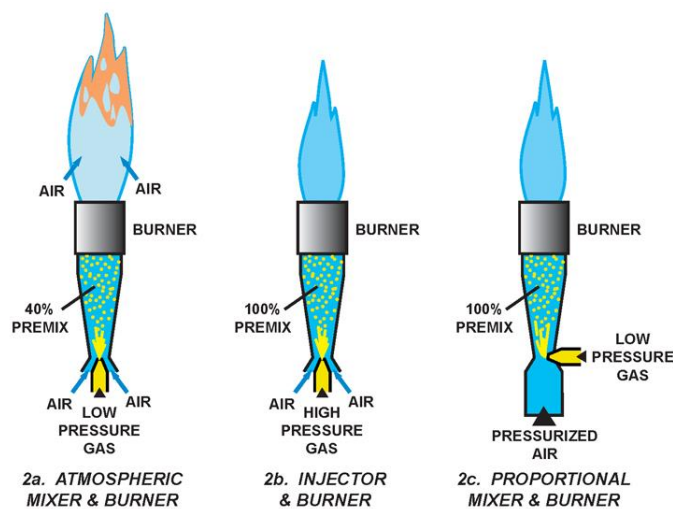


Figura 73 - Confronto fiamme a diverse % di premiscelazione

In molte applicazioni pratiche, l'aria comburente viene introdotta in maniera coassiale rispetto al combustibile e minimizzando la velocità relativa tra il flusso di combustibile e il flusso di aria comburente, il bruciatore produce una fiamma lunga e luminosa.

Anche questo sistema può essere regolato manualmente, attraverso le valvole di regolazione.

- **Regolazione proporzionale e regolazione automatica di combustione**

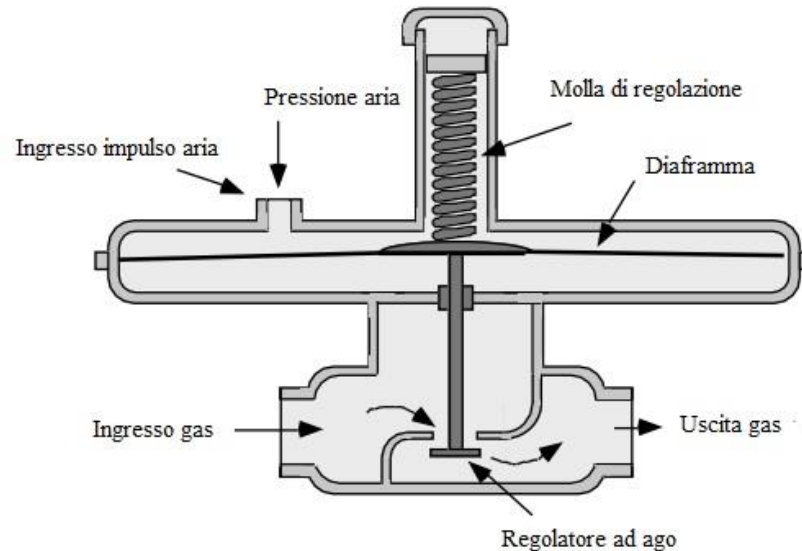


Figura 74 – Valvola proporzionale di regolazione (fonte Correll)

La regolazione proporzionale è la regolazione più complessa e avviene grazie alla presenza della valvola proporzionale di regolazione. Tale valvola consente la regolazione proporzionale in modalità pressoché automatica con l'impostazione corretta della stessa. La valvola proporzionale è installata sulla linea del gas che alimenta il bruciatore. Si compone di una valvola del gas e un diaframma ed è simile a un regolatore di pressione del gas.

Essa infatti regola la pressione del gas, ma il controllo è calettato alla tubazione dell'aria nella linea che va al bruciatore. La regolazione quindi avviene con impulso di pressione proveniente dalla tubazione dell'aria ed agisce direttamente sul diaframma, aprendo o chiudendo l'area di passaggio del gas tramite un ago. Il principio di funzionamento prevede che, all'aumentare della pressione della tubazione dell'aria, dalla quale proviene il controllo, il diaframma si abbassi, aprendo di conseguenza un passaggio maggiore di gas.

Questa valvola è la base per l'implementazione della regolazione automatica di combustione.

La valvola può essere applicata ai due sistemi precedentemente esposti (Figura 75).

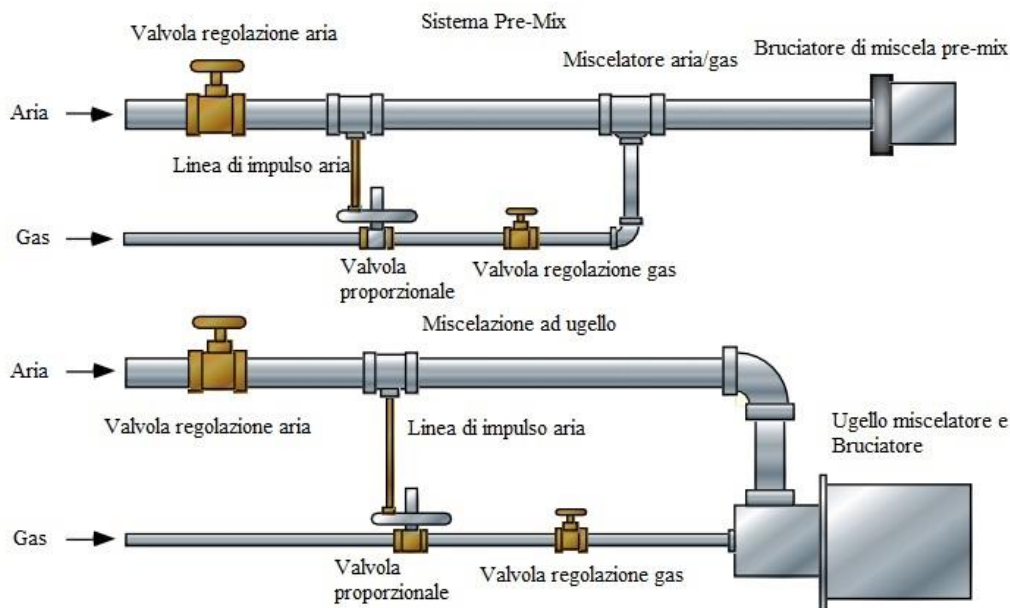


Figura 75 - Regolazione proporzionale dei due sistemi (fonte Correll)

In un forno fusorio per il vetro, vi è una grande differenza dei flussi di combustibile e di aria tra la fase di fusione e la fase di lavorazione, proprio per la richiesta di apporto di calore e la fiamma, ciò provoca un complicazione della regolazione proporzionale. Una cattiva regolazione proporzionale, sottodimensionata o sovradimensionata, potrebbe rendere il forno difficile da gestire a livello di temperatura. Inoltre, nell'utilizzo del forno, sono molti i fattori che influenzano la regolazione, quali: la dimensione del forno, la quantità di fumi combusti e il loro smaltimento, la temperatura di ingresso dell'aria, diversa dalla temperatura ambiente e di adduzione del gas, la pressione differenziale positiva dell'interno del forno e la dimensione delle tubature di adduzione.

Per regolare adeguatamente l'adduzione di combustibile e di aria, si applica una valvola proporzionale provvista di bias variabile, denominato successivamente ABPV (Adjustable Bias Proportional Valve).

La valvola a bias variabile ha al suo interno una vite di regolazione dello stelo o ago e può regolare il flusso di gas in modo che intervenga solo nella diminuzione di richiesta da parte del forno. Tale sistema può evitare variazioni di composizione al variare della richiesta di carico termico.

Per esempio, si suppone che in fase di riscaldamento, carico e fusione sia richiesta una fiamma considerevole "massima", poiché richiede il flusso massimo. Si fa seguire alla fusione una fase di lavorazione, si procede alla chiusura della valvola dell'aria, per impostare un livello minimo o comunque minore della fiamma. La pressione dell'aria a valle della valvola scende e di conseguenza si abbassa la pressione nella linea d'impulso

che conduce al diaframma della valvola ABPV, causando la chiusura proporzionale della valvola a ago.

Se la miscela, nel passaggio di regime, mantiene la caratteristica stechiometrica, la regolazione tramite ABPV sta lavorando come una normale valvola proporzionale. Tuttavia, è più probabile che la miscela non sia esattamente stechiometrica. Per poter ottenere una miscela stechiometrica sarà necessario rettificare la valvola ABPV, per esempio la pressione dell'aria dell'impulso di regolazione potrebbe non essere sufficiente a ottenere un'apertura adeguata dello stelo della valvola proporzionale. Se si usa una valvola a bias variabile, basterà agire sulla vite di regolazione della stessa, che andrà a ritardare la pressione sul diaframma. Le valvole a bias variabile offrono maggiori vantaggi in regolazione dei minimi.

A questo punto, è importante ricordare che la pressione dell'aria e il flusso d'aria non sono la stessa cosa, né sono necessariamente proporzionali tra loro. Il flusso è misurato in termini di volume, ovvero la quantità di aria o gas combustibile, in volume, in adduzione al forno. La pressione invece può essere riferita in termini di resistenza di flusso.

A volte non basta regolare il bias della valvola proporzionale, al quale lavora con segnale di pressione dalla condotta, per esempio quando viene esaurito il campo di regolazione. Si potrebbe pensare di agire sulla valvola di regolazione del gas, ma tale intervento altererebbe tutta la regolazione a valle e a monte.

Per poter regolare ulteriormente i flussi, specialmente ai minimi e ai massimi del range di regolazione, è necessario installare un'ulteriore valvola a valle della linea di impulso per la regolazione della ABPV, detta valvola di limitazione a orifizio o ALOR (Adjustable Limiting Orifice Valve).

Utilizzando valvole a bias variabile e valvole di limitazione a orifizio, si hanno gli strumenti idonei a regolare in modo indipendente e corretto la miscela tra aria e gas naturale nell'intero range di regolazione della combustione.

Le curve tipiche di regolazione per le valvole ABPV e ALOR sono esponenziale, ad andamento inversamente proporzionale.

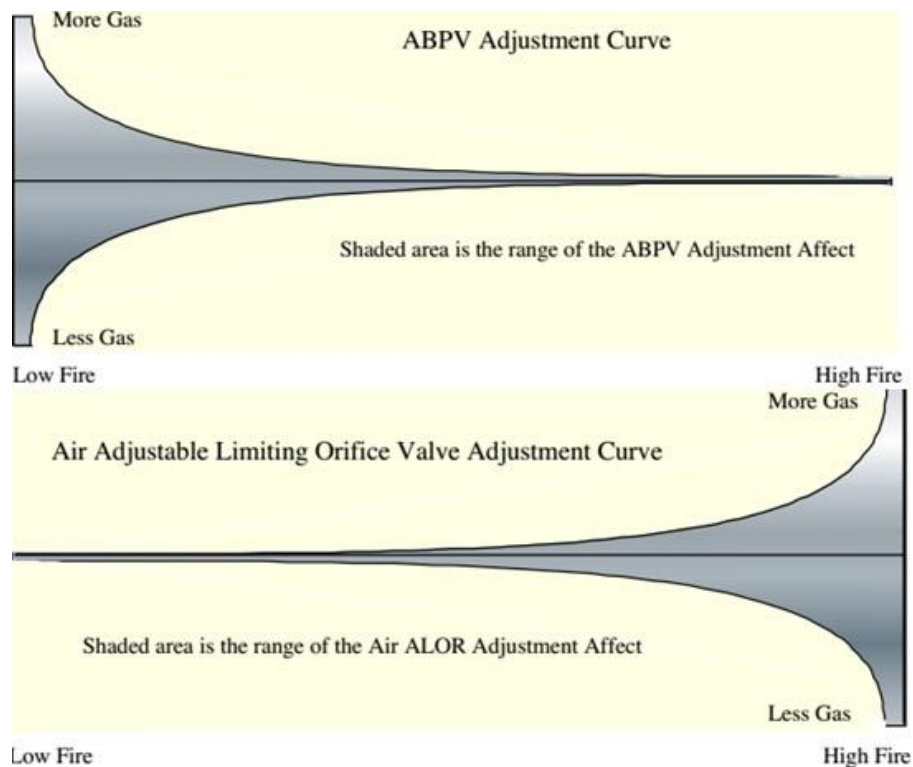


Figura 76 - Curve di regolazione ABPV e ALOR (fonte Correll)

Con questo sistema di valvole di regolazione, è possibile l'installazione di un sistema automatico di regolazione, composto dal controller con uscita proporzionale, un ventilatore regolabile con inverter (che garantisce un inseguimento dei punti di lavoro migliore, evitando continui cicli di on-off e una riduzione dei consumi elettrici e di conseguenza la spesa per l'energia elettrica), una valvola a farfalla per la regolazione del flusso dell'aria a monte della regolazione (al posto della valvola manuale) e una termocoppia in platino per il controllo della temperatura all'interno del forno.

Il funzionamento del sistema di regolazione automatica della combustione avrà il seguente funzionamento: il controller rileva la temperatura misurata dalla termocoppia e la compara al setpoint impostato dal programma. Se la temperatura del forno è inferiore alla temperatura di set point, il controller invia un segnale al motore elettrico attuatore, che apre la valvola a farfalla della condotta dell'aria e/o agisce sulla velocità del ventilatore, aumentando così il flusso verso il forno e l'aumento della temperatura. Viceversa, se la temperatura è superiore al setpoint, il controller fa chiudere la valvola e/o diminuisce la velocità del ventilatore. Sarà quindi possibile programmare il ciclo termico del forno e controllarlo automaticamente in tutte le sue fasi, ovvero quando saranno richieste alte temperature durante il carico, la fusione e l'affinaggio e quando saranno richieste temperature minori, nelle fasi di mantenimento e lavorazione, garantendo un arrivo corretto alle temperature richieste.

Il risultato impiantistico finale sarà simile a quello rappresentato in figura 77.

(Correll, Charles M., s.d.)

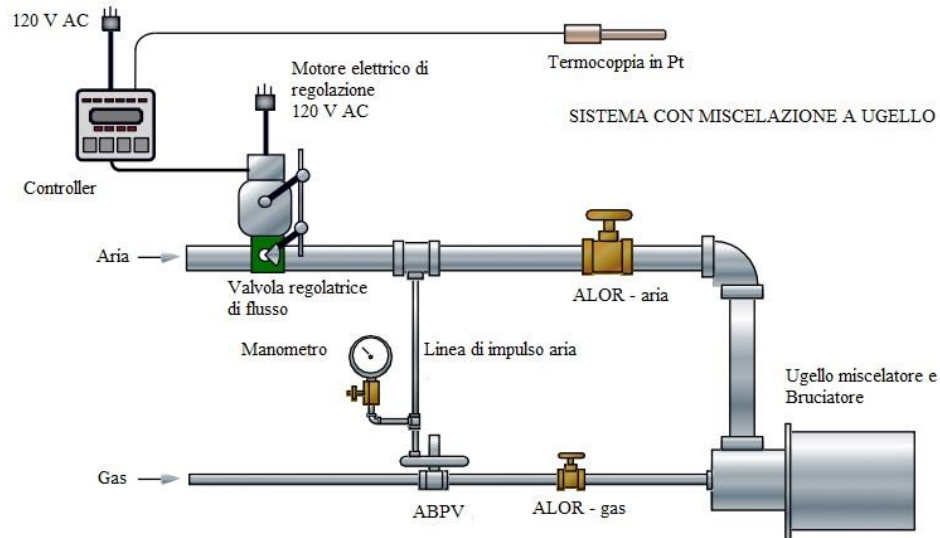


Figura 77 - Sistema con miscelazione a ugello e regolazione automatica (fonte Correll)

Nei forni di nuova costruzione è prevista la presenza del controllo automatico di combustione: i segnali, derivanti dai sensori opportunamente sistemati, vengono trattati dal controller centrale situato nel pannello di controllo, dal quale si può controllare l'intero impianto, grazie alla presenza di: termometri digitali, flussometri digitali per gas naturale e aria comburente, manometro digitale per il controllo della pressione interna del forno e processore PLC per l'acquisizione dei segnali e la registrazione dei dati.

Il controllo del flusso d'aria avviene tramite la regolazione del ventilatore con inverter e con valvole a farfalla poste sul bruciatore.

I bruciatori sono ricoperti internamente da materiale refrattario e ammettono una temperatura massima di ingresso aria di 550 °C. Inoltre è possibile regolare manualmente la distanza tra il mixer e l'ugello del gas per poter controllare la miscela e controllare la lunghezza della fiamma. Nel caso in cui servisse atmosfera ossidante, è possibile aumentare comunque l'eccesso d'aria a prescindere dalla regolazione stechiometrica. La regolazione infine consente di avere una qualità di combustione migliore, tale aspetto incide favorevolmente sulla qualità delle emissioni.

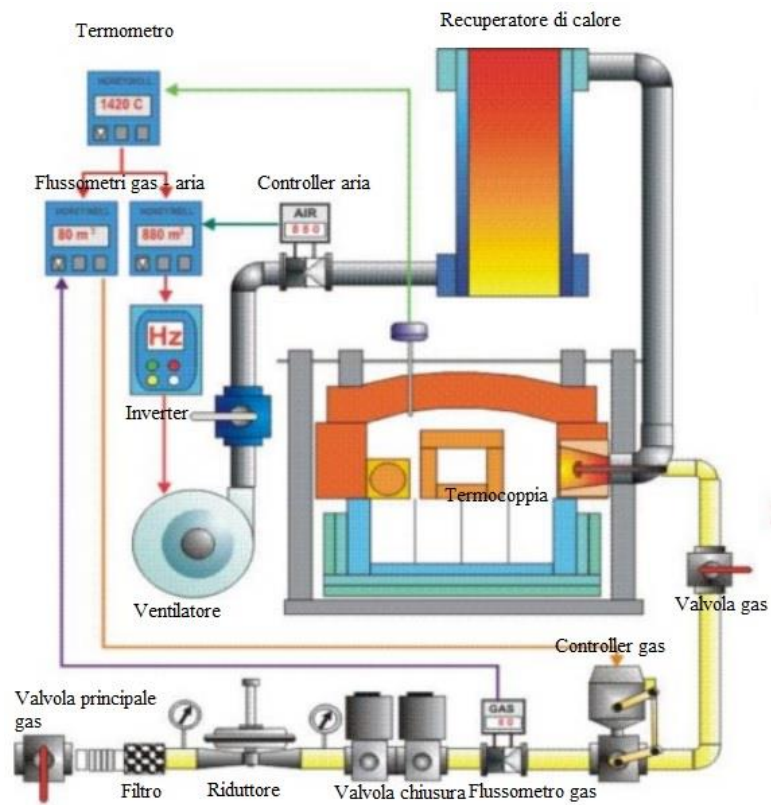


Figura 78 - schema di impianto di regolazione (fonte Falorni s.r.l.)



Figura 79 - Bruciatori e vista esterna (fonte Falorni s.r.l.)

4.4. Recupero del calore: uso del recuperatore, criticità e limiti, tipi di recuperatore

Dal bilancio energetico di un forno per il vetro, come da figura 80, si evince che il recupero dell'energia termica dei fumi di combustione è essenziale per ottenere risparmio energetico, costituisce infatti circa il 60 – 70% delle perdite totali.

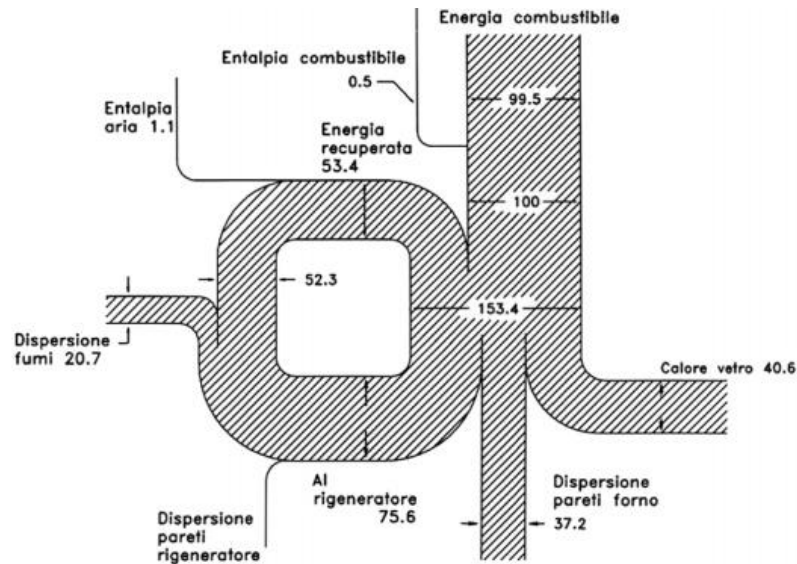


Figura 80 - Diagramma di Sankei per un forno per il vetro (Dall'Igna, D'Este, & Maurina, 2012)

Per recupero di calore dai fumi di combustione si intende l'uso dei fumi di combustione, inviati al camino, per preriscaldare l'aria comburente in ingresso al forno. Ciò permette un risparmio, poiché parte dell'energia derivante dalla combustione non viene sfruttata per il riscaldamento dell'aria all'interno del forno. Tutti i tipi di recuperatore vengono installati dopo il collettore dei fumi di combustione.

Esistono vari tipi di recuperatori, differenziati per materiale di costruzione, ma tutti afferiscono alla geometria a tubi concentrici, più o meno alettati, per aumentare la superficie di scambio:

- **Recuperatori di calore a irraggiamento:** in ghisa refrattaria (riduzione fino al 30% dei consumi) e in acciaio a intercapedine (riduzione fino al 40% dei consumi): i fumi passano nel tubo interno e riscaldano l'aria che fluisce nell'intercapedine tra i due tubi concentrici. L'eventuale alettatura all'interno della camicia aumenta lo scambio termico, anche se il principale meccanismo di scambio termico è per irraggiamento. I recuperatori sono dotati di un sistema di dilatazione indipendente della camicia interna ed una coibentazione in fibra ceramica e fibra minerale. L'altezza tipica di un recuperatore è di 1.5

m. I principali vantaggi di questo tipo di recuperatore sono: la lunga durata, la facilità di installazione (e quindi la sua economicità), la grande sicurezza di esercizio, le ridotte perdite di carico, le dimensioni compatte per elevate capacità e il costo contenuto, che rende l'applicazione tecnica del recuperatore economicamente vantaggiosa.

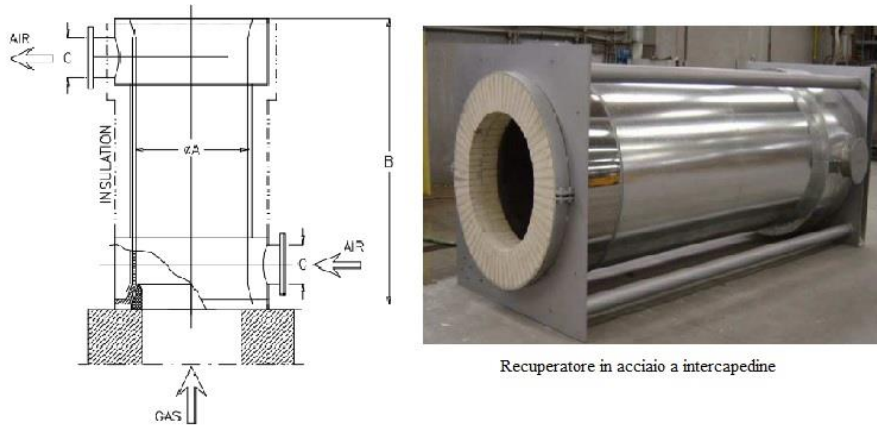


Figura 81 - Recuperatore a tubi concentrici, schema e recuperatore in acciaio a intercapedine (fonte MT s.r.l.)

- **Recuperatori a fascio tubiero (poco utilizzati nei forni per il vetro destinati al mercato muranese)**

Il limite di utilizzo del recuperatore risiede proprio dalle diverse temperature richieste nelle varie fasi di ciclo termico: infatti sebbene siano desiderabili temperature dell'aria preriscaldata nell'ordine dei 500 – 550 °C durante la fusione, tali temperature non verranno mai raggiunte, altrimenti si avranno difficoltà di gestione delle temperature in lavorazione. Per evitare il surriscaldamento dell'aria comburente, è necessario sottodimensionare notevolmente alla portata minima di aria, ottenendo così temperature che raggiungono al limite massimo i 200 °C.

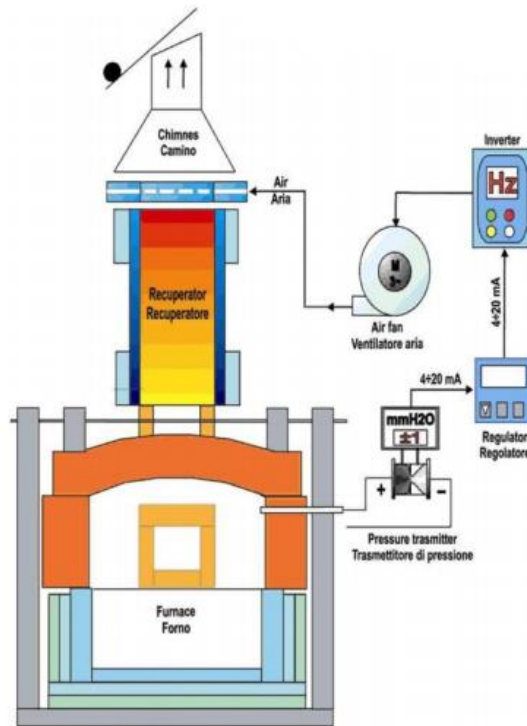


Figura 82 - Sistema di regolazione di pressione e recupero di calore (fonte Falorni s.r.l.)

4.5. Altri aspetti per l'efficiamento energetico: accorgimenti costruttivi e comportamentali

Come è facile immaginare, l'applicazione di comportamenti idonei nell'uso del forno può comportare anch'esso un margine di potenzialità di efficientamento. L'adozione di particolari accorgimenti costruttivi, molti dei quali derivanti dall'esperienza del costruttore, permettono un risparmio sui consumi di gas naturale, poiché impattano soprattutto sulle dispersioni.

Un esempio è l'applicazione di cappe isolanti movimentabili, provviste di frontalino, da calare sul forno mentre è in fondita, ciò permette un risparmio difficile da stimare ma tangibile sui consumi della fase più energivora (figura 83)



Figura 83 - Forno a crogiolo di nuova costruzione, da notare la cappa isolante sovrastante il forno e il sistema servoassistito di movimentazione delle portine e dei riduttori di apertura bocche

Altro accorgimento, utile per applicare comportamenti idonei da parte dell'operatore del forno, è la movimentazione laterale servoassistita delle portine di chiusura delle bocche: infatti, con una movimentazione facilitata, aumenta la frequenza delle chiusure delle bocche se non più necessarie e quindi del risparmio energetico derivante dalla diminuzione delle dispersioni attraverso le aperture. C'è però da tenere conto che in lavorazione non è possibile una continua apertura e chiusura del forno, infatti è la fase in cui il forno è più utilizzato da parte degli operatori e quella in cui si hanno spesso le temperature minime; la chiusura frequente del forno in questa fase porta ad un innalzamento indesiderato delle temperature e quindi ad un'eccessiva viscosità superficiale del vetro fuso.

Per poter facilitare il carico del materiale da fondere durante la fondita e quindi ridurre notevolmente i periodi di apertura delle bocche del forno, si ricorre a sistemi di carico automatico a coclea.



Figura 84 - Caricatore a coclea per materiale da fonderia

Ulteriore accorgimento utile, per evitare l'uso improprio delle bocche per il riscaldamento delle canne utilizzate dagli operatori per cavare, lavorare e soffiare il vetro, è la creazione di cavità scalda canne poste sul collettore dei fumi di combustione, poste precedentemente il recuperatore, come si nota dalla figura 85, dove è presente una portina che ne chiude l'accesso.



Figura 85 - Scalda canne

L'adozione di comportamenti atti alla riduzione dei consumi è sempre stata leva di efficientamento detta "a costo zero", poiché intervenire sulle azioni degli operatori, dei manutentori e l'organizzazione aziendale non richiede alcun investimento economico, ma solo un investimento sull'informazione e formazione del personale per accrescere la sensibilità verso i temi di efficienza energetica.

Per esempio, una maggiore attenzione sul posizionamento dei crogioli all'interno del forno permette un accesso migliore alla canna con cui si preleva il vetro fuso, consentendo un'uniformità del calore migliore e quindi una riduzione dei consumi di gas naturale.

Dal punto di vista dell'organizzazione aziendale di produzione, l'aumento dei giorni di lavoro e/o dei turni, con conseguente aumento della produzione, ridurrebbe il consumo di gas naturale nella fase di mantenimento, ovvero in una fase in cui il vetro non viene cavato e il forno è in stand-by. La gestione della produzione potrebbe risultare fondamentale, poiché il consumo specifico è inversamente proporzionale alla quantità di vetro cavato: evitando ridondanza di forni contenenti colori uguali, oppure gestendo la produzione a livello di consorzio (cosa che però si prospetta improponibile per un fattore di proprietà intellettuale e artistica dei prodotti).

CAPITOLO 5 – ANALISI TECNICO-ECONOMICA E ATTIVITA’ A SOSTEGNO DEGLI INVESTIMENTI PER L’EFFICIENTAMENTO ENERGETICO

5.1. Analisi economica dell’intervento di efficientamento

Dati di input:

Costo investimento iniziale

È il costo corrispettivo nel preventivo. Nell’analisi di investimento, si suppone la sostituzione di due tipologie e grandezze di forni:

- Forno a crogiolo, capacità 300 kg, con recuperatore a intercapedine, regolazione automatica di combustione, isolamento e contatore con controllo in remoto = 40000 € IVA inclusa
- Forno Day Tank, capacità 1500 kg, con recuperatore a intercapedine, regolazione automatica di combustione, isolamento e contatore con controllo in remoto = 70000 € IVA inclusa

L’IVA si attesta al 22% (aprile 2016).

Ore di funzionamento

Nello stabilire i cicli di lavoro con le relative fasi, si assume il seguente ciclo termico settimanale, prendendo le durate delle fasi dalle durate medie del capitolo 3, ovvero 8 ore in lavorazione, 10 ore in mantenimento nei giorni di fondita, 16 ore di mantenimento dei giorni dove non si fonde, 10 ore di fusione e 2 ore di affinaggio. Si suppone inoltre una frequenza di fusione pari a 2 volte alla settimana, nelle analisi a costo del vettore energetico gas naturale variabile

Nello stabilire i giorni attivi del forno, si deve ricordare che nei weekend non è possibile lo spegnimento del forno. Considerando i periodi di spegnimento dovuti a ferie, i giorni in cui il forno è considerato inattivo sono 60 (dicembre e metà luglio - agosto) per un totale di circa 305 giorni lavorativi, di cui 85 trascorsi in mantenimento. Si possono quindi considerare circa 43 settimane a ciclo come da tabella 20.

Tabella 20 – Ciclo termico settimanale tipo

Ciclo termico Forni	Fusione	Affinaggio	Mantenimento	Lavorazione
Lunedì	6	0	10	8
Martedì	4	2	10	8
Mercoledì	0	0	16	8
Giovedì	6	0	10	8

Venerdì	4	2	10	8
Sabato	0	0	24	0
Domenica	0	0	24	0
Totale Settimanale [h]	20	4	104	40
Totale annuale [h]	860	172	4472	1720

Dal conteggio delle ore totali, le ore di attività del forno coprono circa l'82% del monte ore totale annuale.

Consumi orari e annuali di gas naturale per le tipologie di forno

Per le due tipologie di forno in esame, si identificano i consumi per le due tecnologie, secondo i consumi dichiarati dal costruttore. Con forno vecchio si intende la media dei forni privi di recuperatore e regolazione automatica, antecedenti il 2008. Con forno nuovo si intende il forno di nuova costruzione, con recuperatore ad alta efficienza, la regolazione automatica e grado di isolamento maggiore.

Tabella 21 – Consumi specifici orari tra le due tipologie di forno indagate

Consumi orari GAS NATURALE [Sm ³ /h]	CROGIOLO VECCHIO 300 kg	CROGIOLO NUOVO 300 kg	DAY TANK VECCHIO 1500 kg	DAY TANK NUOVO 1500 kg
AFFINAGGIO	25	15,0	40	35
FUSIONE	25	20,0	49	43
LAVORAZIONE	14	10,0	24	19,5
MANTENIMENTO	12	8,0	17,5	14,3

Per calcolare i consumi di gas naturale totali annuali, è sufficiente applicare la seguente formula:

$$Consumi\ gas_{annuali} = \frac{h\ fase}{anno} * consumo\ fase \quad [5.1]$$

Tabella 22 – Consumi di Gas naturale totali annuali per le tipologie di forno indagate

Consumi GAS NATURALE TOTALI ANNUALI [Sm ³ /anno]	CROGIOLO VECCHIO 300 kg	CROGIOLO NUOVO 300 kg	DAY TANK VECCHIO 1500 kg	DAY TANK NUOVO 1500 kg
AFFINAGGIO	4300	2580,0	6880	6020
FUSIONE	21500	17200,0	42140	36980
LAVORAZIONE	24080	17200,0	41280	33540
MANTENIMENTO	53664	35776,0	78260	63949,6
TOTALE	103544	72756	168560	140489,6
DIFFERENZA NUOVO-VECCHIO	30788		28070,4	

Consumi annuali di energia elettrica per la ventilazione

Si considera solo il consumo annuale di energia elettrica impegnata dal ventilatore, poiché il potenziale di efficientamento energetico, dal lato elettrico, coinvolge solo la regolazione del ventilatore stesso tramite tecnologia a Inverter. Noto il valore di targa, si calcola l'energia consumata annualmente dal ventilatore tramite la formula:

$$Energia\ elettrica\ consumata_{ventilatore} = P_{targa_{ventilatore}} * fattore\ di\ carico * h_{anno} [5.2]$$

Con fattore di carico pari a 0.7

Per il calcolo dell'energia consumata da un ventilatore di pari potenza dotato di Inverter, si deve supporre un risparmio di consumo di energia elettrica del 25% rispetto al caso privo di Inverter. Si ottiene quindi il consumo di energia elettrica in entrambi i casi e il risparmio alle condizioni ipotizzate.

Tabella 23 – Consumi di energia elettrica del ventilatore annuali

Potenza elettrica VENTILATORE [kW]	2,2
Energia elettrica consumata VENTILATORE [kWh anno]	11124,96
Energia elettrica consumata VENTILATORE con INVERTER [kWh anno]	8343,72
Differenza CON/SENZA INVERTER [kWh/anno]	2781,24

Costo dei vettori energetici

Il costo dei vettori energetici è una variabile molto importante per la determinazione della convenienza dell'investimento, per il calcolo del flusso di cassa, del risparmio annuo, del tempo di ritorno semplice, del TIR e del VAN.

La forte variabilità dei costi dei vettori energetici negli ultimi anni, intesi al ribasso, rende difficoltosa l'analisi economica. Pertanto, l'analisi verrà iterata con varie possibilità di incremento e decremento dei costi dei vettori energetici, specialmente per il costo del gas naturale.

Come si nota da figura 1, i prezzi di acquisto PUN rilevati dal GME (Gestore Mercati Energetici) per l'energia elettrica hanno avuto un calo specialmente ai massimi, mentre per i minimi e i medi il valore è quasi rimasto costante.

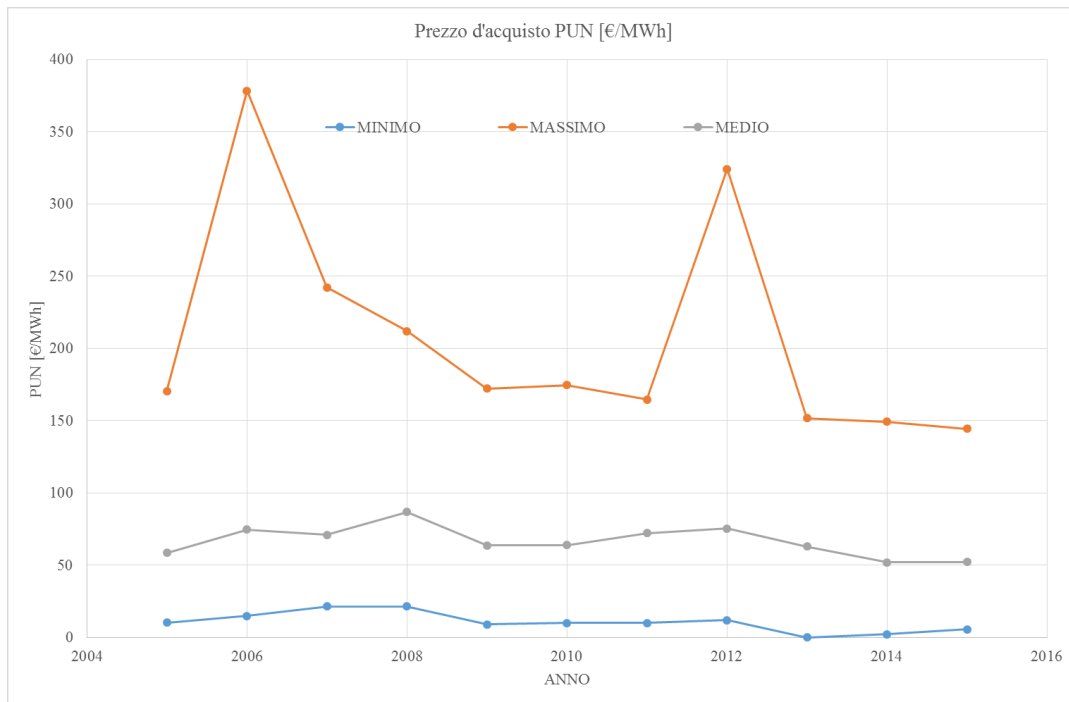


Figura 86 – Andamento del prezzo di acquisto PUN per l'energia elettrica

Per il gas, il GME fornisce dati per anno termico, con prezzi che si riferiscono al prezzo per negoziazione continua e per asta.

Il prezzo assunto per il vettore energia elettrica è di 160 €/MWh, ovvero 0.16 €/kWh

Per i dati di sintesi per il gas, il GME si avvale di molteplici mercati e piattaforme di scambio, quali il MGP-GAS, MI-GAS, P-GAS e PB-GAS.

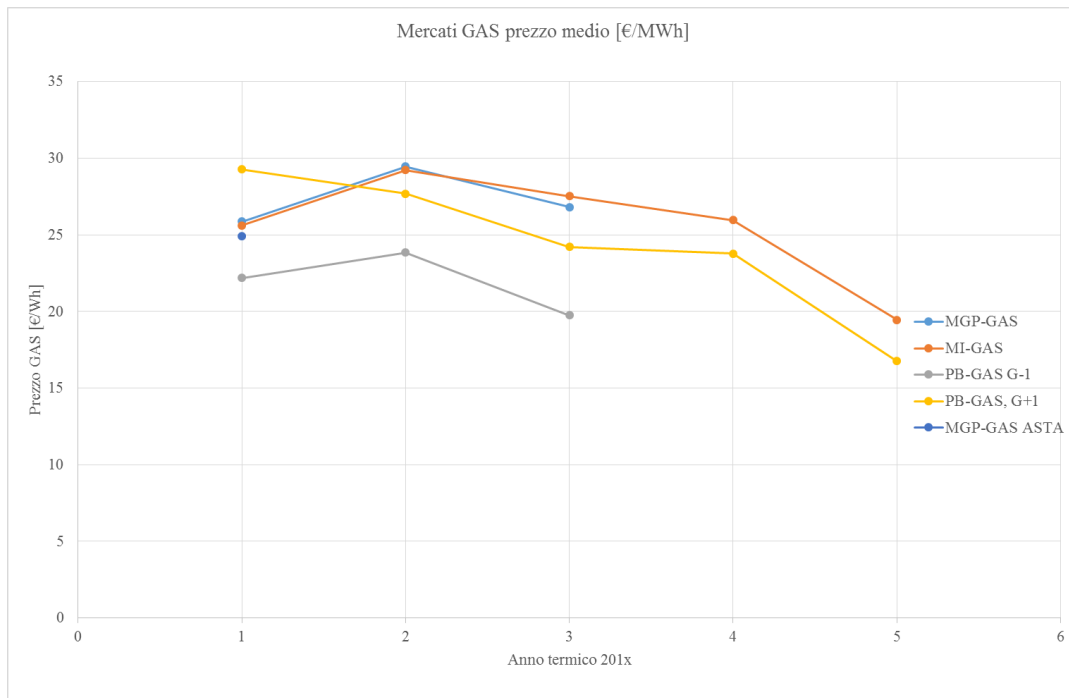


Figura 87 – Andamento del prezzo di acquisto Gas Naturale nei mercati GME

Per ogni tipo di mercato, si nota che nel corso degli anni il prezzo del gas è diminuito notevolmente, passando da un massimo di 29 €/MWh ai 16 €/MWh.

Pertanto la scelta del prezzo del vettore energetico gas naturale dev'essere fatta con molta attenzione, un'errata valutazione del prezzo iniziale potrebbe falsare l'analisi economica. Comunque bisogna ricordare che il prezzo considerato in fase di analisi è omnicomprendente di tasse, accise e oneri di distribuzione ecc.

Per il quadriennio 2013-2017, sono stati forniti i prezzi medi dal fornitore di gas naturale, suddivisi tra le utenze a connessione alla rete di distribuzione locale e le utenze connesse direttamente alla rete Snam:

Tabella 24 – Costo medio annuale per il gas naturale (Accise e servizi inclusi)

COSTO GAS NATURALE [€/Sm ³]						
ANNO TERMICO	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	MEDIA 2013-2017	MEDIA TOTALE
DISTRIBUTORE LOCALE	0,42	0,38	0,35	0,28	0,36	0,34
COLLEGAMENTO SNAM	0,39	0,35	0,33	0,25	0,33	

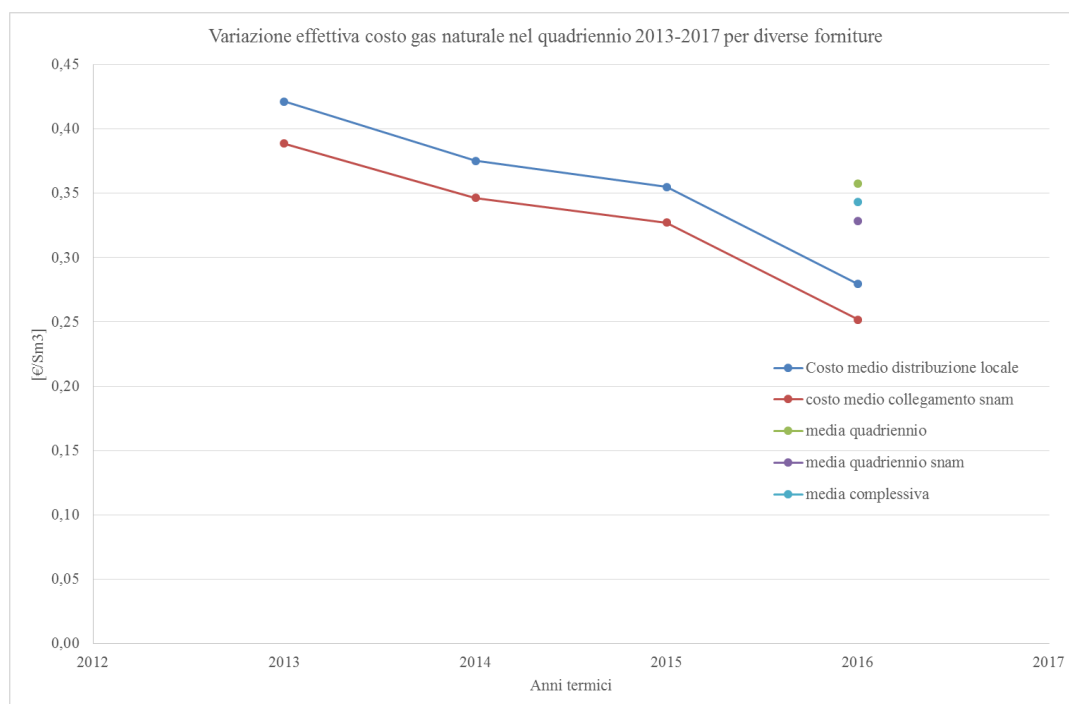


Figura 88 - Variazione costo gas naturale per diverse forniture

Il prezzo assunto come valore di partenza per l'analisi economica per il vettore gas è di 0.33€/Sm³, pari alla media 2013-2017 delle utenze connesse direttamente alla rete di distribuzione Snam, ovvero 0.34 €/MWh (PCI=9.59 kWh/Sm³).

CONTO ECONOMICO

RICAVI

- Risparmio economico gas naturale
- Risparmio economico energia elettrica
- TEE o altre incentivazioni

COSTI

- Costo combustibile
- Costo manutenzione: 1% dell'investimento, all'anno
- Costo assicurazione
- Costi amministrativi ed altri costi

MARGINE OPERATIVO LORDO o FLUSSO DI CASSA OPERATIVO NETTO

Questo margine esprime la capacità dell'impresa di coprire con i ricavi d'esercizio dell'impianto, il costo degli investimenti. Si calcola tramite la formula:

$$MARGINE OPERATIVO LORDO = \sum ricavi - \sum costi d'esercizio$$

FLUSSO DI CASSA LORDO

Il flusso di cassa lordo è la ricostruzione dei flussi monetari (differenza tra tutte le entrate e le uscite MONETARIE) di un progetto nell'arco del periodo di analisi. Più semplicemente il flusso di cassa è l'ammontare di liquidità generato da un investimento.

$$FLUSSO DI CASSA LORDO = reddito netto + quota di ammortamento$$

CAPITALE PROPRIO INVESTIMENTO

Quota che compare solo al virtuale "anno zero", che rappresenta la copertura finanziaria con mezzi propri.

RATA FINANZIAMENTO

Riguarda la parte dell'eventuale rata del finanziamento che va a coprire il capitale finanziato e quindi non comprende la parte della rata dovuta dagli interessi del finanziamento, che ricade direttamente negli oneri finanziari.

FLUSSO DI CASSA NETTO

Il flusso di cassa netto è il flusso di cassa lordo, decurtato del rimborso quota capitale del finanziamento. Per l'"anno zero" è quantificabile come la quota dell'investimento con mezzi propri.

Flusso di cassa NETTO

$$= \text{Flusso di cassa operativo netto} + \text{capitale} + \text{rata} + \text{incentivi}$$

FLUSSO DI CASSA CUMULATO

Il flusso di cassa cumulato è la somma dei flussi di cassa degli anni antecedenti all'anno considerato e dell'anno per cui si calcola.

$$\text{Flusso di cassa cumulato} = \sum_{n \text{ anni}} \text{Flusso di cassa netto}$$

TEMPO DI RECUPERO SEMPLICE - TR

Nell'analisi dei grafici risultanti dall'analisi economica, è chiaramente rappresentato il momento in cui il flusso di cassa monetario ritorna ad essere >0, il tempo a cui avviene il passaggio da flussi di cassa negativi a flussi di cassa positivi è il TR, ovvero il Tempo di Recupero semplice.

FLUSSO DI CASSA ATTUALIZZATO

Il flusso di cassa attualizzato è il flusso di cassa netto presente e quello futuro, attualizzandolo all'anno in corso.

Flusso di cassa ATTUALIZZATO (n = anno di attualizzazione)

$$= \frac{\text{flusso di cassa netto}_n}{(1 - \text{tasso attualizzazione})^n}$$

VALORE ATTUALE NETTO - VAN

Il Valore Attuale Netto definisce il valore attuale di una serie di flussi di cassa, non solo attraverso la loro forma ma attualizzandoli sulla base del tasso di rendimento.

$$VAN = \sum FLUSSI DI CASSA ATTUALIZZATI$$

(se nei flussi di cassa attualizzati è compreso $- I_0$)

Il VAN permette di stabilire la convenienza attesa di un singolo investimento, oppure permette di confrontare la convenienza tra due o più investimenti in concorrenza. Ciò però è possibile solo se il periodo di attualizzazione è lo stesso per tutti gli investimenti considerati e solo se il capitale investito inizialmente è uguale in tutte le alternative di investimento.

Nel caso di un investimento, il VAN consente di calcolare il valore del beneficio atteso dall'investimento come se fosse disponibile nel momento in cui la decisione dell'investimento viene assunta, ovvero attualizza i flussi di cassa anche temporalmente lontani (più lontano temporalmente è il beneficio, meno valore ha, poiché è meno esigibile e meno concreto). Il tasso a cui viene attualizzato il flusso di cassa è 5%.

Il VAN è un criterio fondamentale per l'accettazione di un investimento.

$$VAN > 0 \text{ INVESTIMENTO}$$

$$VAN < 0 \text{ NO INVESTIMENTO}$$

I vantaggi del criterio del Valore Attuale Netto sono: il VAN quantifica il contributo di un investimento all'incremento di valore del capitale proprio in valori monetari e che può essere utilizzato in situazioni dove il tasso di rendimento minimo non rimane costante durante il ciclo di vita di un progetto.

Gli svantaggi principalmente sono rappresentati dalle difficoltà connesse alla scelta del tasso di attualizzazione e dell'inadeguatezza del metodo a giudicare investimenti aventi rilevanza strategica.

INTERNAL RATE OF RETURN - IRR o TIR

L'Internal Rate of Return, detto anche TIR (acronimo italiano per Tasso Interno di Rendimento), rappresenta il tasso composto annuale di ritorno EFFETTIVO generato dall'investimento.

Dato l'intervallo temporale di durata n (anni) e il Flusso di Cassa ATTUALIZZATO, l'Internal Rate of Return deriva dal VAN. L'IRR è definibile come il tasso di sconto o tasso di attualizzazione al quale un progetto ha $VAN=0$.

$$VAN = \sum_1^{n \text{ (anni)}} \frac{\text{flusso di cassa netto}_n}{(1 - IRR)^n} - INVESTIMENTO INIZIALE = 0$$

Da cui si ricava l'IRR.

Rappresenta il costo massimo finanziario (debito e capitale) che l'azienda può assumere in relazione ad un determinato progetto di investimento.

INDICE DI PROFITABILITA' - IP

L'indice di profittabilità di un investimento è il rapporto:

$$IP = \frac{VAN}{INVESTIMENTO INIZIALE}$$

Rappresenta la misura della profittabilità relativa dell'investimento, ovvero del rapporto tra benefici e costi di un progetto. Il criterio di decisione di basa su $IP>0$, nel caso in cui l'impresa avesse limitata disponibilità di capitale e molteplici progetti con VAN positivo, l'IP permette di classificarli secondo la loro profittabilità.

LEGENDA ANALISI ECONOMICA:

TR: Tempo di ritorno semplice

TIR: Tasso Interno di Rendimento

VAN: Valore Attuale Netto

IP: Indice di Profittabilità

ANALISI ECONOMICA

Nell'analisi economica si è analizzato il conto economico di due tipologie di forni: forno a crogiolo, con capacità 300 kg e day tank da 1500 kg.

Per il confronto dei consumi della tecnologia obsoleta e nuova, ci si è riferiti ai valori forniti dal costruttore:

Tabella 25 – Consumi orari per tipologia di forno, tecnologia e fase di ciclo termico

Consumi orari [Sm ³ /h]	CROGIOLO VECCHIO 300 kg	CROGIOLO NUOVO 300 kg	DAY TANK VECCHIO 1500 kg	DAY TANK NUOVO 1500 kg
AFFINAGGIO	25	15	40	35
FUSIONE	25	20	49	43
LAVORAZIONE	14	10	24	19,5
MANTENIMENTO	12	8	17,5	14,3

Variabilità del costo del combustibile

Il vettore energetico preponderante in questo tipo di investimento è rappresentato dal gas naturale, il quale ha subito notevoli ribassi in termini di costo. Per prevedere l'andamento sia nel caso di calo che nel caso di aumento (non essendo noti gli andamenti futuri dei mercati energetici), si sono simulate due situazioni:

Tutti i risultati sono stati ottenuti per una frequenza di due fusione alla settimana.

Si è analizzata una variabilità del costo vettore energetico gas naturale in valore assoluto, +10%, +20%, +30%; -10%, -20%, -30%;

I risultati ottenuti sono i seguenti:

- Forno a crogiolo da 300 kg

Tabella 26 – Incidenza aumento e diminuzione costo del gas naturale sull'investimento

%	I	Costo Gas [€/Sm ³]	Costo EE [€/kWh]	Flusso cassa cumulato	Risparmio Annuo [€]	TR	TIR	VAN	IP
-30%	40000	0,23	0,16	67355,40	7157,03	5,59	0,16	34287,49	0,86
-20%	40000	0,26	0,16	82595,46	8173,03	4,89	0,19	44833,26	1,12
-10%	40000	0,30	0,16	97835,52	9189,03	4,35	0,22	55379,03	1,38
0%	40000	0,33	0,16	113075,58	10205,04	3,92	0,25	65924,81	1,65
10%	40000	0,36	0,16	128315,64	11221,04	3,56	0,27	76470,58	1,91
20%	40000	0,40	0,16	143555,70	12237,05	3,27	0,30	87016,36	2,18
30%	40000	0,43	0,16	158795,76	13253,05	3,02	0,33	97562,13	2,44

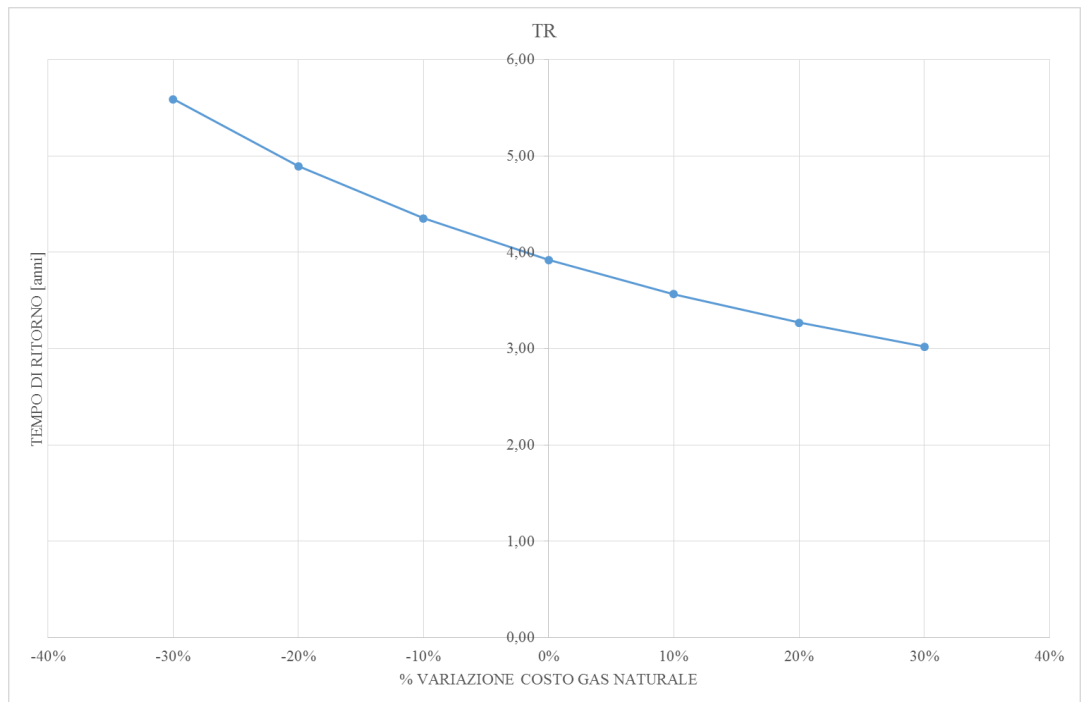


Figura 89 – Variazione del tempo di ritorno sulla variazione percentuale del costo del gas naturale

L'importanza che assume la variazione del costo dell'energia è importante: basti notare che all'aumentare del costo, l'investimento in ottica di efficienza energetica ha parametri finanziari migliori: il tempo di ritorno si abbassa, portandosi ben al di sotto della vita utile del forno (3.92 anni contro 10), il tasso interno di rendimento si dimostra, per i forni a crogiolo, nettamente positivo per tutto il range di variazione del costo. In questo caso, il risparmio energetico, per due fusioni alla settimana, si attesta sui 30788 Sm³/anno, se si confrontano i dati di consumo forniti dal costruttore.

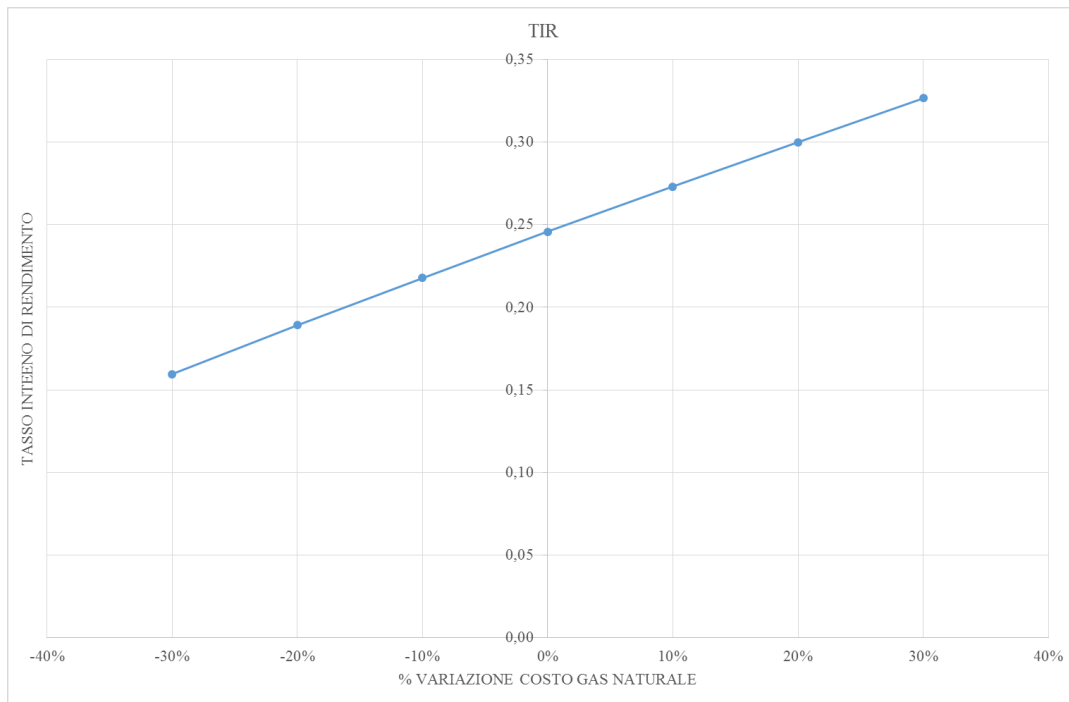


Figura 90 - Variazione del tasso interno di rendimento sulla variazione percentuale del costo del gas naturale

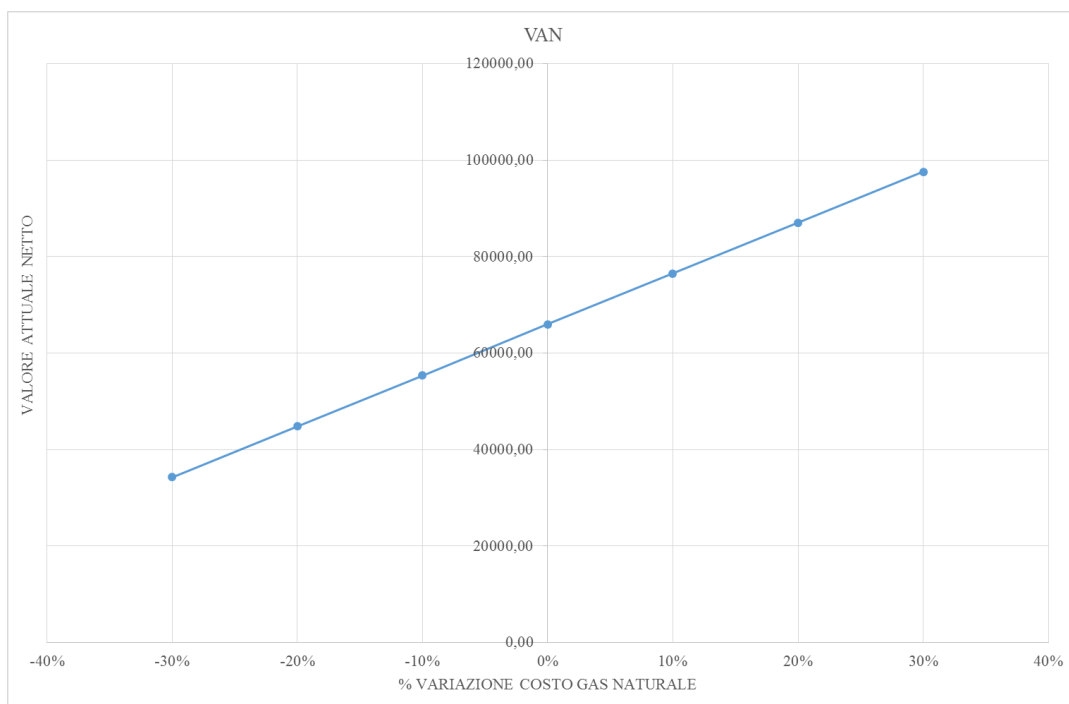


Figura 91 - Variazione del valore attuale netto sulla variazione percentuale del costo del gas naturale

Il Valore Attuale Netto è positivo per tutto il range e con l'Indice di Profitabilità, indica che l'investimento di efficientamento energetico, per tale tipologia di forni e tale grandezza, è profittevole e ha convenienza anche nel caso in cui non ci fossero piani per

il sostegno economico dell'iniziativa, come Titoli di Efficienza Energetica o altri strumenti economici.

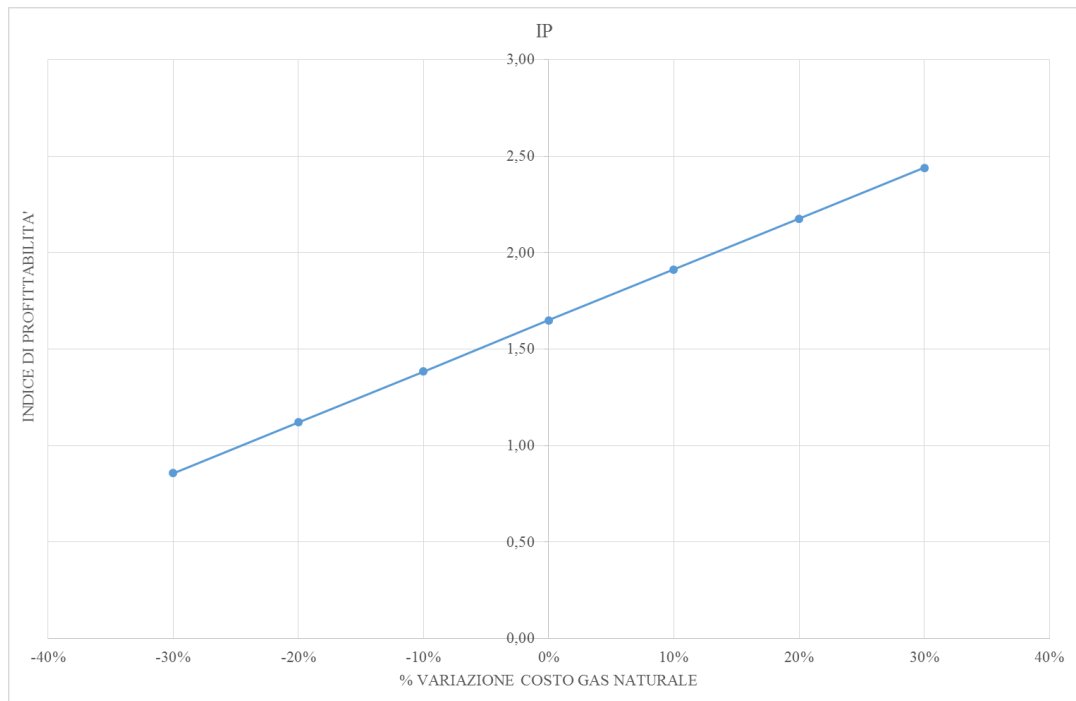


Figura 92 - Variazione dell'indice di profittabilità sulla variazione percentuale del costo del gas naturale

Si deve notare che il costo attuale del gas si aggira attorno a $0.25 - 0.28 \text{ €/Sm}^3$, ovvero - 15% / - 25%, pertanto in ottica attuale, gli investimenti hanno un tempo di ritorno attorno ai 4,5 anni, comunque molto al di sotto della vita utile del forno (10 anni).

- Day Tank da 1500 kg

Tabella 27 – Incidenza aumento e diminuzione costo del gas naturale sull'investimento

%	I	Costo Gas [€/Sm ³]	Costo EE [€/kWh]	Flusso cassa cumulato	Risparmio Annuo [€]	TR	TIR	VAN	IP
-30%	70000	0,23	0,16	23438,91	6229,26	11,24	0,04	-5342,40	-0,08
-20%	70000	0,26	0,16	37333,76	7155,58	9,78	0,06	4272,51	0,06
-10%	70000	0,30	0,16	51228,61	8081,91	8,66	0,08	13887,43	0,20
0%	70000	0,33	0,16	65123,46	9008,23	7,77	0,10	23502,35	0,34
10%	70000	0,36	0,16	79018,30	9934,55	7,05	0,11	33117,27	0,47
20%	70000	0,40	0,16	92913,15	10860,88	6,45	0,13	42732,19	0,61
30%	70000	0,43	0,16	106808,00	11787,20	5,94	0,15	52347,11	0,75

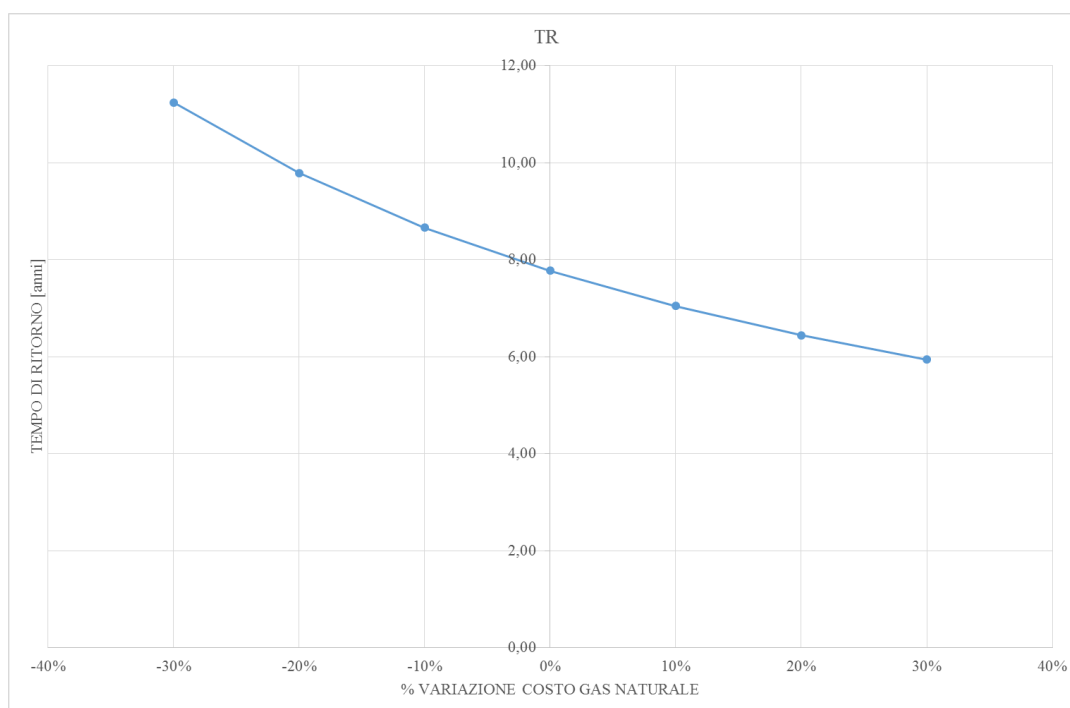


Figura 93 - Variazione del tempo di ritorno sulla variazione percentuale del costo del gas naturale

L'analisi economica per il forno Day Tank da 1500 kg, invece, presenta alcune criticità dal punto di vista finanziario e temporale.

Infatti, i risparmi conseguibili di gas naturale annui, sebbene raggiungano i 28070 Sm³/anno, si dimostrano non sufficienti a giustificare l'investimento nel caso in cui il costo del vettore energetico gas calasse al 30%, attestandosi attorno ai 0,23 €/Sm³. Per il valore massimo di sconto rispetto al prezzo iniziale, si registrano parametri finanziari negativi (VAN, IP) e uno scarso tasso di rendimento interno. Inoltre, si avrebbe un tempo di ritorno superiore alla vita media di un forno di queste caratteristiche.

Per prezzi crescenti o di molto superiori al prezzo medio attuale (0.33 €/Sm³), l'investimento di rende profittevole, ma in maniera minore rispetto alla sostituzione del forno a crogiolo, a cui, quindi, ci si orienterà come prima scelta: infatti i parametri finanziari sono nettamente maggiori.

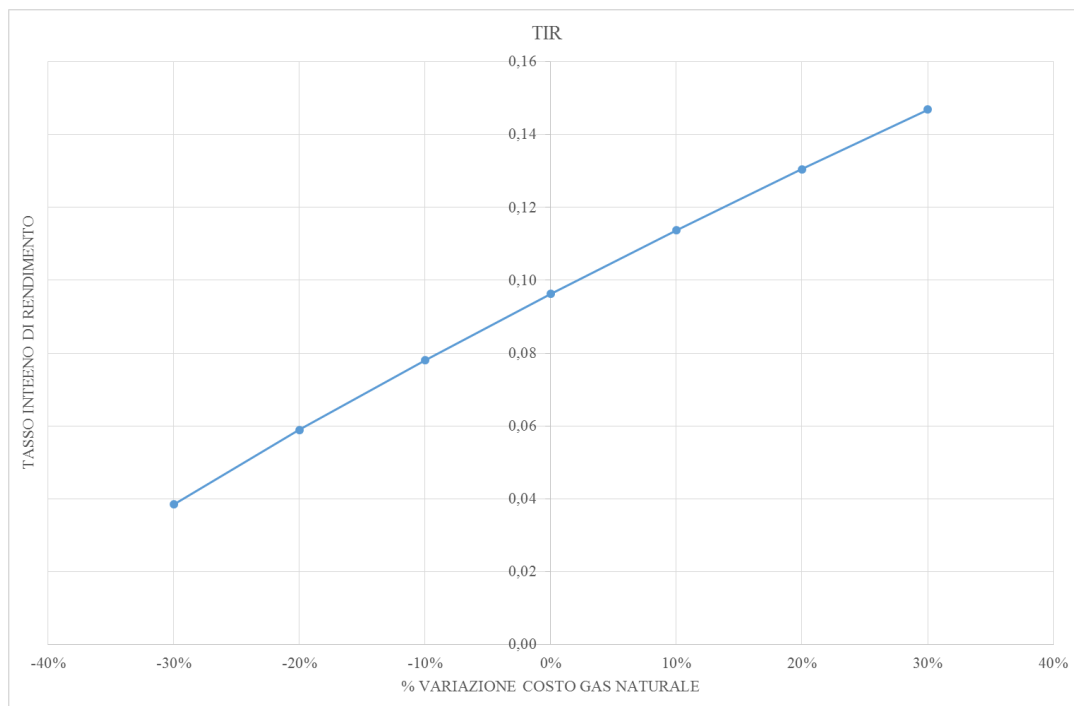


Figura 94 - Variazione del tasso interno di rendimento sulla variazione percentuale del costo del gas

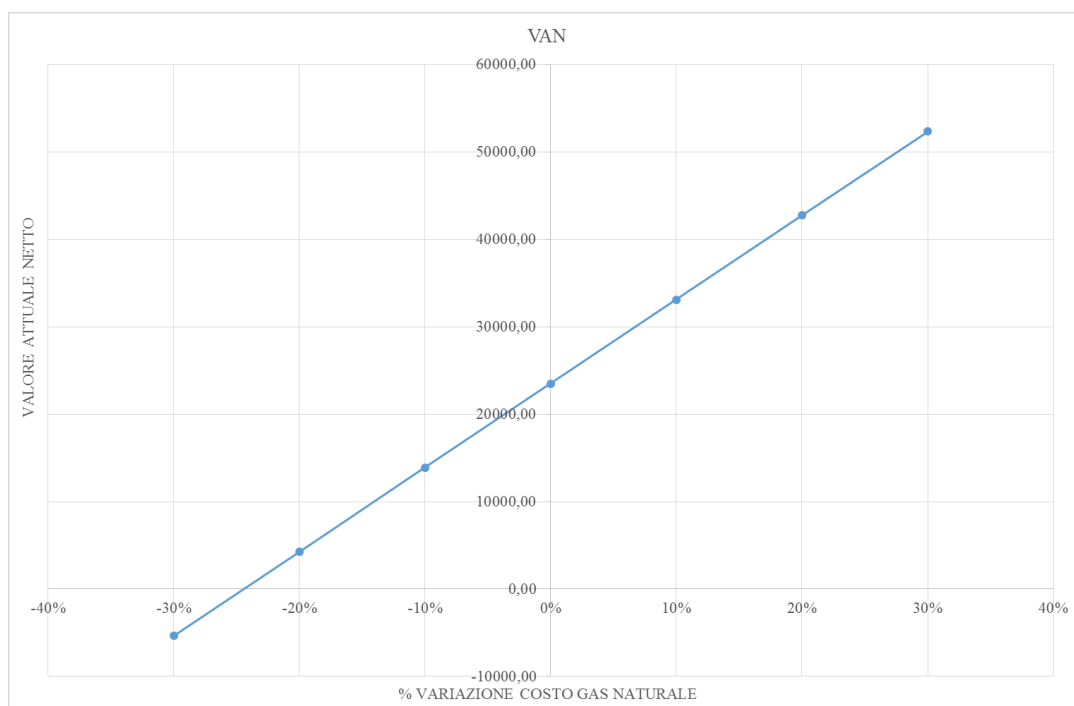


Figura 95 - Variazione del valore attuale netto sulla variazione percentuale del costo del gas

C'è comunque da considerare che la sostituzione di un forno si rende necessaria ai raggiunti limiti di età e tecnologici, pertanto la sostituzione, anche se non presenta una grande rendita finanziaria, può essere comunque incentivata e quindi avere un riscontro positivo.

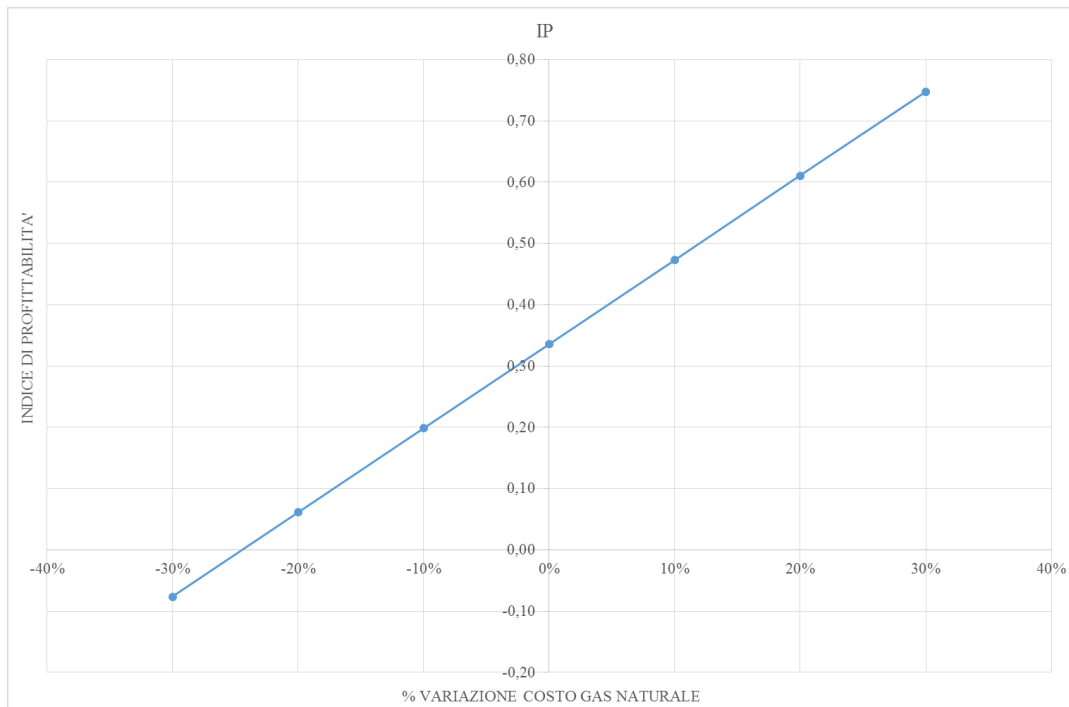


Figura 96 - Variazione dell'indice di profittabilità sulla variazione percentuale del costo del gas naturale

Si deve notare che il costo attuale del gas si aggira attorno a $0.25 - 0.28 \text{ €/Sm}^3$, ovvero -15% / -25%, pertanto in ottica attuale, gli investimenti hanno un tempo di ritorno attorno ai 9 anni, molto vicino alla vita utile del forno (10 anni). Con questi prezzi del gas naturale si deve valutare attentamente l'investimento.

Variabilità sul numero di fusioni

Nota la varietà di produzioni e di tipi di azienda, si è valutato di analizzare varie frequenze di fondita, per 1 – 2 – 3 fondite alla settimana, mantenendo i prezzi di partenza attuali (0.16 €/kWh per l'energia elettrica, 0.33 €/Sm³).

Si sono indagati i cicli di funzionamento diversi nel caso di numero di fondite diverse, per poter calcolare il numero di ore delle fasi nell'arco di un anno, in rosso sono indicati i giorni coinvolti nella fusione:

Una fusione alla settimana:

Tabella 28 – Ciclo termico (una fusione/settimana)

Ciclo termico Forni	Fusione	Affinaggio	Mantenimento	Lavorazione
Lunedì	0	0	16	8
Martedì	0	0	16	8
Mercoledì	0	0	16	8
Giovedì	6	0	10	8
Venerdì	4	2	10	8
Sabato	0	0	24	0
Domenica	0	0	24	0
Totale Settimanale	10	2	116	40
Totale annuale	430	86	4988	1720

Due fusioni alla settimana:

Tabella 29– Ciclo termico (due fusioni/settimana)

Ciclo termico Forni	Fusione	Affinaggio	Mantenimento	Lavorazione
Lunedì	6	0	10	8
Martedì	4	2	10	8
Mercoledì	0	0	16	8
Giovedì	6	0	10	8
Venerdì	4	2	10	8
Sabato	0	0	24	0
Domenica	0	0	24	0
Totale Settimanale	20	4	104	40
Totale annuale	860	172	4472	1720

Tre fusioni alla settimana:

Tabella 30 – Ciclo termico (tre fusioni/settimana)

Ciclo termico Forni	Fusione	Affinaggio	Mantenimento	Lavorazione
---------------------	---------	------------	--------------	-------------

Lunedì	6	0	10	8
Martedì	10	2	4	8
Mercoledì	4	2	10	8
Giovedì	6	0	10	8
Venerdì	4	2	10	8
Sabato	0	0	24	0
Domenica	0	0	24	0
Totale Settimanale	30	6	92	40
Totale annuale	1290	258	3956	1720

- **Forno a crogiolo da 300 kg**

Il risultato dell'analisi economica, ottenuta con la variazione della frequenza delle fusioni, per il forno a crogiolo di capacità 300 kg è la seguente:

Tabella 31 - Incidenza del numero di fusioni sull'investimento

n°fusioni/ settimana	I	Flusso di cassa cumulato	Risparmio Annuo [€]	TR	TIR	VAN	IP
1	40000	103284,48	9552,30	4,19	0,23	59149,59	1,48
2	40000	113075,58	10205,04	3,92	0,25	65924,81	1,65
3	40000	117758,28	10517,22	3,80	0,25	69165,13	1,73

Come era prevedibile, i risultati dell'aumento della frequenza di fusioni, quindi l'aumento del numero di ore trascorse nella fase del ciclo termico più energivora, porta guadagni sempre maggiori, con parametri finanziari ben sopra lo zero.

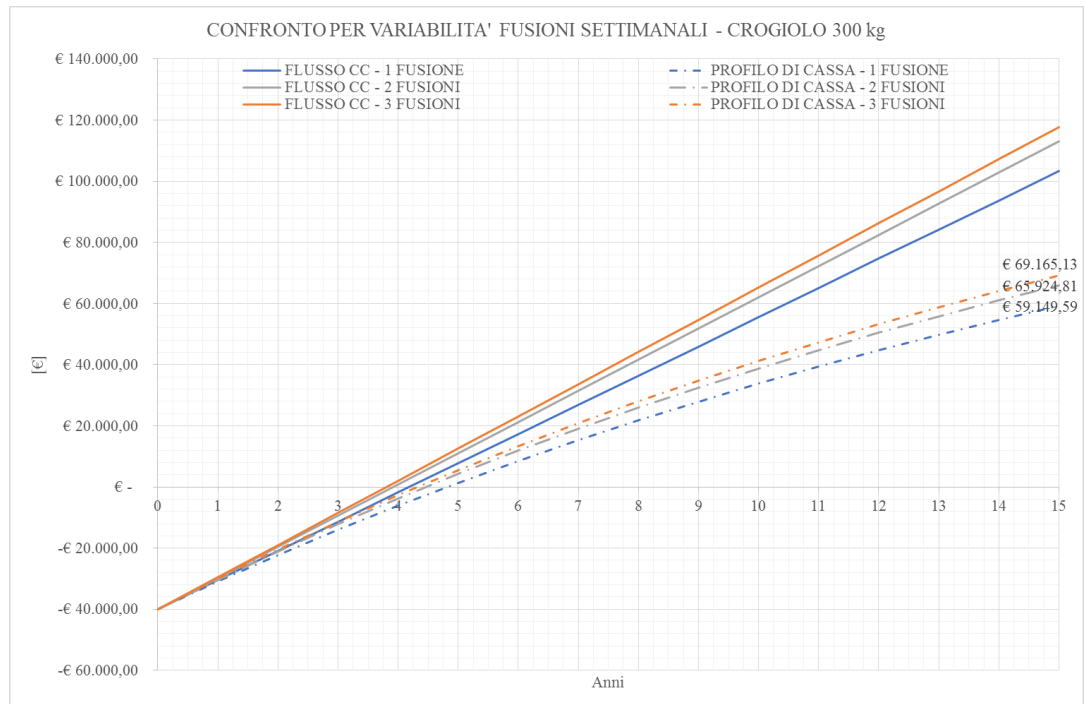


Figura 97 - Flusso di cassa cumulato (Flusso CC), VAN e profilo di cassa in funzione del numero di fusioni

Dal flusso di cassa cumulato, dal profilo di cassa e dal VAN, mostrano convenienza le sostituzioni di forni a crogiolo impegnati in più fusioni alla settimana, in maniera proporzionale. Da punto di vista delle aziende, quindi, vi sarà la convenienza di compiere più cicli di fusione sul forno più efficiente e spostare, per esempio, il vetro fuso in un forno che non è ancora stato reso efficiente.

- **Day Tank da 1500 kg**

Il risultato dell'analisi economica, ottenuta con la variazione della frequenza delle fusioni, per il forno Day Tank di capacità 1500 kg, considerando i tre cicli a frequenza di fusione differente è la seguente:

Tabella 32 – Incidenza del numero di fusioni sull'investimento

n°fusioni/ settimana	I	Flusso di cassa cumulato	Risparmio Annuo [€]	TR	TIR	VAN	IP
1	70000	58397,40	8559,83	8,18	0,09	18848,07	0,27
2	70000	65123,46	9008,23	7,77	0,10	23502,35	0,34
3	70000	71849,52	9456,63	7,40	0,10	28156,63	0,40

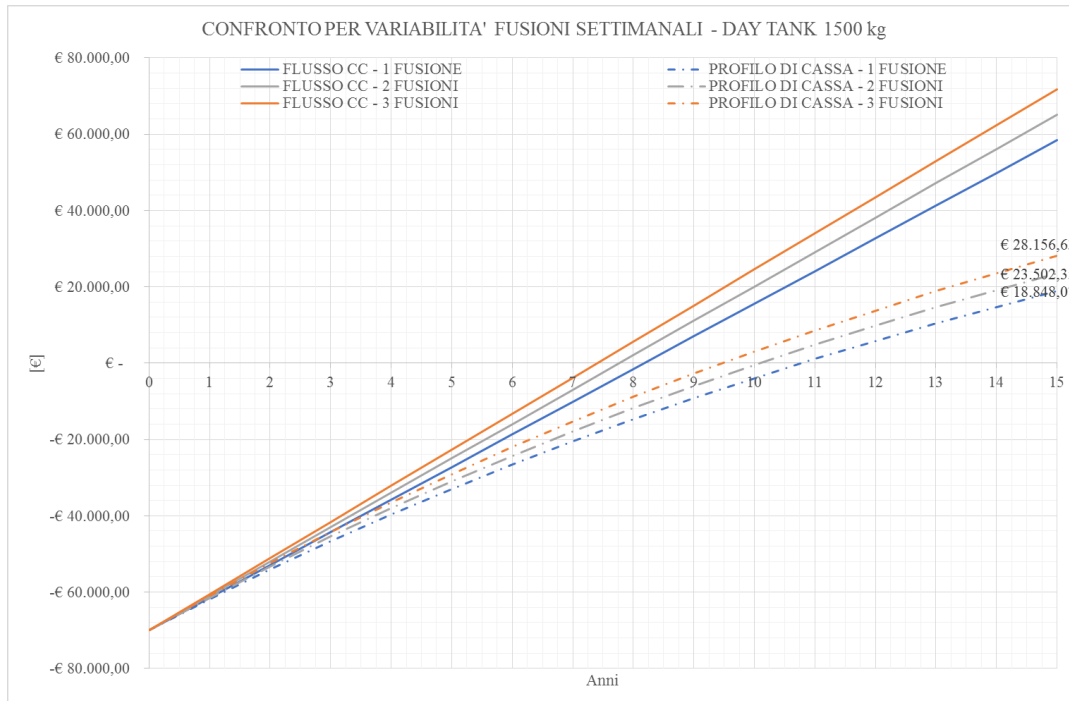


Figura 98 - Flusso di cassa cumulato (Flusso CC), VAN e profilo di cassa in funzione del numero di fusioni

I parametri finanziari per la sostituzione del forno Day Tank sono più scarsi, rispetto al forno al crogiolo, ma a prezzo del gas costante a 0.33 €/Sm^3 , presentano comunque una situazione conveniente se il numero di fusioni è maggiore o uguale di due, condizione che spesso è verificata, dal momento che i Day Tank sono usati come forni fusori per il riempimento dei crogioli.

Applicazione di forme incentivanti

L'obiettivo della campagna misure effettuata sui forni attualmente installati è stato di fissare un benchmark per confrontare, in ottica di applicazione di forme incentivanti, i forni di nuova installazione con la media attuale, sulla quale quindi calcolare il risparmio ottenibile e quantificare di conseguenza i TEE disponibili per singolo forno, nei casi di sostituzione di un forno a crogiolo da 300 kg e di un Day Tank da 1500 kg. (Per dettagli sui Titoli di Efficienza Energetica, si rimanda al paragrafo 5.2).

Per procedere al calcolo, si è ipotizzato un valore medio di mercato **TEE=100€/tep** e un coefficiente **tau= 1.87**, quest'ultimo coefficiente rappresenta il rapporto tra vita utile (e quindi energia risparmiata totale) e durata dell'incentivazione (5 anni).

I risultati sono i seguenti:

- Forno a crogiolo da 300 kg

Tabella 33 - Incidenza del numero di fusioni sull'investimento, con TEE= 100 €/tep

n°fusioni/ settimana	I	TEE annui [€]	Flusso di cassa cumulato	Risparmio Annuo [€]	TR	TIR	VAN	IP
1	40000	4701,13	126790,13	9552,30	3,14	0,30	78533,82	1,96
2	40000	4847,08	137310,96	10205,04	2,98	0,32	85910,81	2,15
3	40000	4993,02	142723,38	10517,22	2,90	0,33	89752,91	2,24

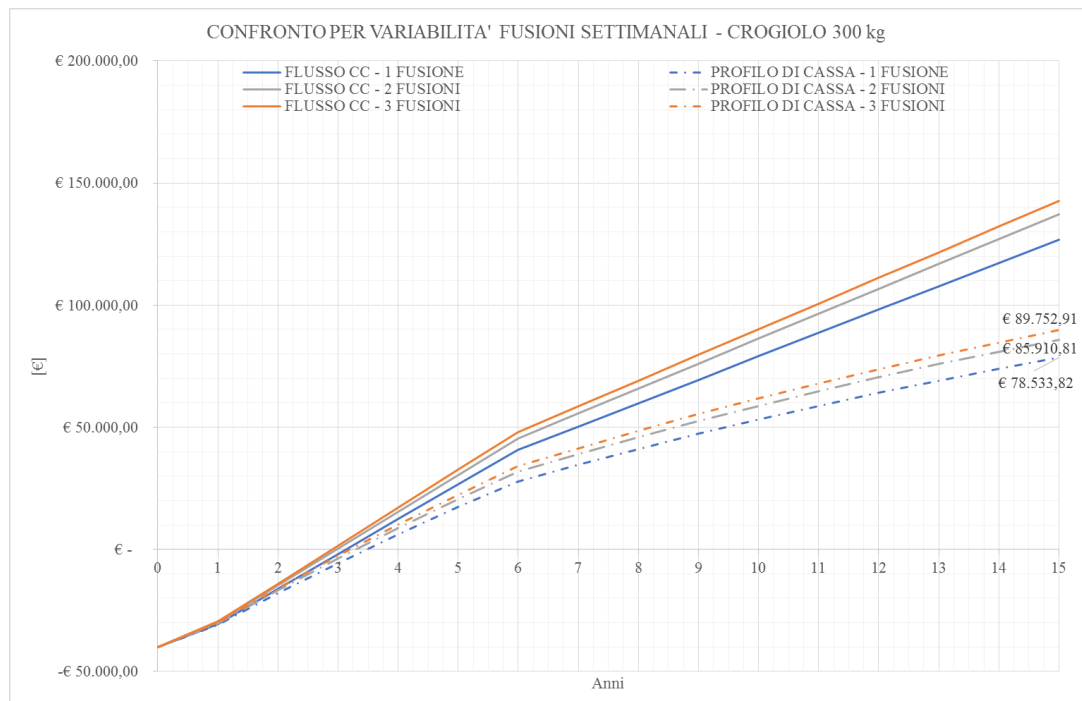


Figura 99 - Flusso di cassa cumulato (Flusso CC), VAN e profilo di cassa in funzione del numero di fusioni, con TEE= 100 €/tep

Risulta quindi ovvio che, in presenza di sostegni economici, l'investimento risulta ancora più conveniente, con tempi di ritorno che si abbassano sotto la soglia dei tre anni.

- Day Tank da 1500 kg

Tabella 34 - Incidenza del numero di fusioni sull'investimento, con TEE= 100 €/tep

n°fusioni/ settimana	I	TEE annui [€]	Flusso di cassa cumulato	Risparmio Annuo [€]	TR	TIR	VAN	IP
1	70000	4218,19	79488,34	8559,83	5,81	0,13	36240,98	0,52
2	70000	4427,82	87262,55	9008,23	5,54	0,14	41759,62	0,60
3	70000	4637,45	95036,75	9456,63	5,30	0,15	47278,27	0,68

Per il caso rappresentato dal Day Tank, i parametri finanziari migliorano decisamente, anche se dimostrano un livello minore di qualità dell'investimento rispetto alla sostituzione di un forno a crogiolo. L'incentivazione si prospetta, in questo caso, il motore principale per l'efficiamento, poiché riduce il tempo di ritorno a circa la metà della vita utile e rende l'investimento finanziariamente conveniente.

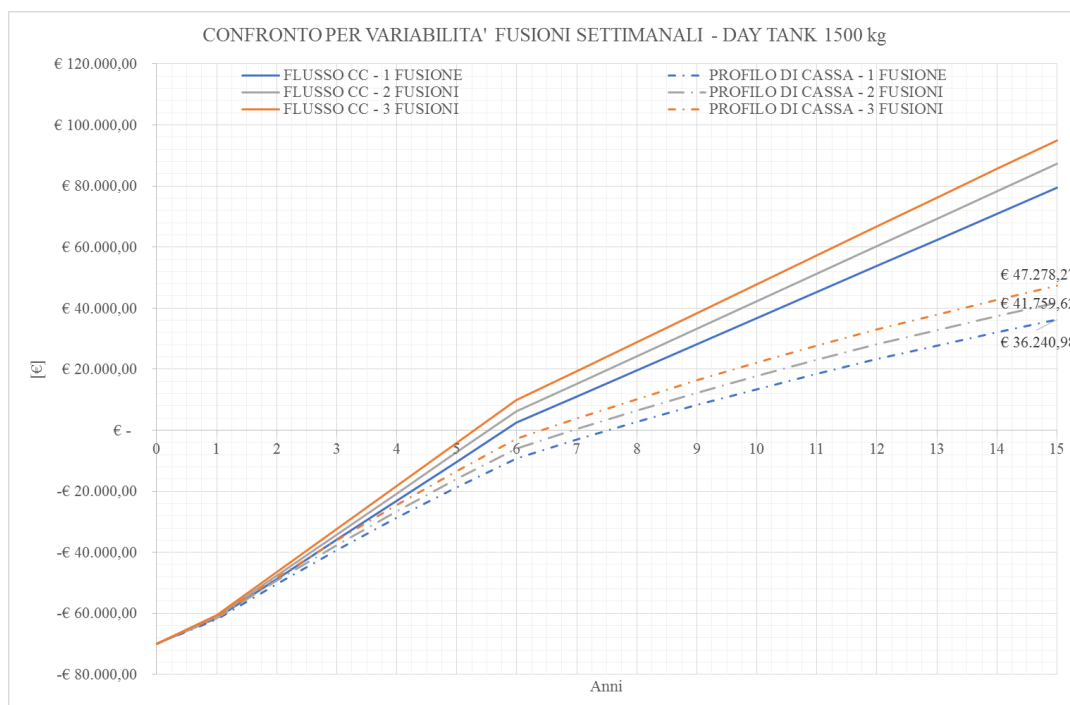


Figura 100 - Flusso di cassa cumulato (Flusso CC), VAN e profilo di cassa in funzione del numero di fusioni, con TEE= 100 €/tep

5.2. ESCo, Forme contrattuali EPC e interventi a sostegno dell'investimento

ESCo

La ESCo (*Energy Service Company*) è un nuovo tipo di impresa si è affermata negli ultimi anni, proprio in contemporanea alla nascita degli strumenti di incentivazione e degli investimenti di tipo energetico. Scopo principale della ESCo è finanziare, sviluppare e installare progetti rivolti al miglioramento dell'efficienza energetica ed al mantenimento dei costi relativi alle attrezzature installate a tale scopo. Il fondamento economico delle ESCo si basa sul risparmio dell'energia. Infatti tale risparmio ha un valore sufficiente a rimborsare il costo degli investimenti in un tempo considerato ragionevole. La ESCo funge anche da intermediario tra i fornitori di tecnologia, gli istituti finanziari (che finanziano con prestiti i progetti e le aziende) e il cliente. La natura dei contratti ESCo – cliente è di tipo “associativo” (Lorenzoni, 2014).

La direttiva 2006/32/CE, recepita dal D.L. n. 115 del 30 maggio 2008, chiarisce la figura delle ESCo come “persona fisica o giuridica che fornisce servizi energetici ovvero altre misure di miglioramento dell'efficienza energetica nelle installazioni o nei locali dell'utente e, ciò facendo, accetta un certo margine di rischio finanziario. Il pagamento dei servizi forniti si basa, totalmente o parzialmente, sul miglioramento dell'efficienza energetica conseguito e sul raggiungimento degli altri criteri di rendimento stabili” e chiarisce anche il significato di servizio energetico “la prestazione materiale, l'utilità o il vantaggio derivante dalla combinazione di energia con tecnologie ovvero con operazioni che utilizzano efficacemente l'energia, che possono includere le attività di gestione, di manutenzione e di controllo necessarie alla prestazione del servizio, la cui fornitura è effettuata sulla base di un contratto e che in circostanze normali ha dimostrato di portare a miglioramento dell'efficienza energetica e a risparmi energetici primari verificabili e misurabili o stimabili”. Il decreto n. 115 introduce anche le definizioni di contratto di rendimento energetico, come “accordo contrattuale tra il beneficiario e il fornitore riguardante una misura di miglioramento dell'efficienza energetica, in cui i pagamenti a fronte degli investimenti in siffatta misura sono effettuati in funzione del livello di miglioramento dell'efficienza energetica stabilito contrattualmente”, il significato di finanziamento tramite terzi, ovvero “accordo contrattuale che comprende un terzo, oltre al fornitore di energia e al beneficiario della misura di miglioramento dell'efficienza energetica, che fornisce i capitali per tale misura e addebita al beneficiario un canone pari a una parte del risparmio energetico conseguito avvalendosi della misura stessa. Il terzo può essere una ESCO” e introduce le definizioni di strumento finanziario per i risparmi

energetici “qualsiasi strumento finanziario, reso disponibile sul mercato da organismi pubblici o privati per coprire parzialmente o integralmente i costi del progetto iniziale per l'attuazione delle misure di miglioramento dell'efficienza energetica” e di certificato bianco “titolo di efficienza energetica attestante il conseguimento di risparmi di energia grazie a misure di miglioramento dell'efficienza energetica e utilizzabile ai fini dell'adempimento agli obblighi di cui all'articolo 9, comma 1, del decreto legislativo 16 marzo 1999, n. 79, e successive modificazioni, e all'articolo 16, comma 4, del decreto legislativo 23 maggio 2000, n. 164”.

Al di là delle definizioni, il mercato delle ESCo è in continua crescita, ma presenta una forte disomogeneità in termini di dimensione e solidità finanziaria, servizi offerti, esperienza nel settore. (Cattarin, Pagliano, & Roscetti, 2013)

Le barriere per lo sviluppo di attività per l'efficientamento energetico sono molteplici e da non sottovalutare e si riassumono in: tempi di ritorno notevoli, ritardi dei pagamenti, scarsa attrattività economica dei piccoli progetti di efficienza energetica, difficile accesso al prestito bancario, la concentrazione sui core business (i risparmi energetici non sono considerati driver principali per l'intrapresa di nuovi investimenti), complessità delle procedure burocratiche, l'instabilità legislativa, l'interazione tra diversi schemi di sussidio, l'interpretabilità legislativa, la scarsa diffusione della certificazione UNI/CEI 11352, la scarsa autonomia dei soggetti pubblici investitori. Ulteriori barriere possono essere di tipo tecnico, per esempio la non indifferenziazione tra la riqualificazione e la fornitura di combustibili, la mancanza di un protocollo comune di misura e verifica, la mancanza di coefficienti correttivi comuni e la presenza di “split incentive”; o di tipo comunicativo, ad esempio la mancata conoscenza legale e tecnica sui contratti EPC, la mancanza di dati sui consumi di energia effetti e la mancanza di un approccio al Ciclo di Vita, ovvero dei consumi e dei costi di manutenzione oltre al solo risparmio in termini di investimento iniziale.

La “sopravvivenza” delle ESCo, quindi, non sembra cosa semplice. Per incentivare lo sviluppo del mercato dei contratti di rendimento energetico e quindi stabilizzare il mercato delle ESCo è necessario che il legislatore offra delle soluzioni finanziarie, istituzionali, tecniche e comunicative. Gli interventi più interessanti potrebbero essere (o sono già in essere): la creazione di fondi rotativi e di garanzia, gli incentivi basati su parametri socio-economici, il co-finanziamento da parte del cliente, la semplificazione burocratica, la promozione di Partnership Pubblico-Private (PPP), una maggiore autonomia di spesa dei soggetti pubblici, l'obbligo di efficientamento e/o di diagnosi per le grandi imprese e le imprese energivore, la creazione di strumenti semplici per la valutazione economica, l'adozione di un protocollo comune di misura e verifica e la creazione di effetti scala.

Sono anche soluzioni, già implementate in parte, la promozione in campagne informative ed educative per la sensibilizzazione e la creazione di un database di buone pratiche.

Il target naturale del mercato delle ESCo è rappresentato dal settore pubblico, anche se il settore industriale presenta un potenziale molto elevato, derivante dall'abbattimento dei costi e dell'efficientamento dei processi (basti pensare che l'efficientamento di alcuni settori come l'industria siderurgica, della plastica e della carta possono conseguire risparmi fino al 30%). Il settore terziario presenta una complessità elevata di applicazione degli interventi per l'efficienza.

EPC

È chiaro che la definizione di ESCo fornita dal legislatore include l'accettazione di rischi tecnici e finanziari. Un progetto ESCo, pertanto, deve basarsi sull'effettivo successo degli interventi di risparmio, dato che a essi è legata la compensazione e il ritorno del capitale. La tipologia classica di contratto stipulato tra la ESCo e il cliente è nella forma EPC (*Energy Performance Contract*), col quale si forniscono uno o più servizi che abbiano come risultato uno specifico livello di efficienza, in ottica di salvaguardia del cliente dai principali rischi tecnici e finanziari.

Gli elementi di un contratto EPC comprendono:

- L'investimento sostenuto dalla ESCo
- La durata del contratto
- Il risparmio conseguibile
- La definizione della baseline per il confronto dei consumi ante e post intervento
- Il piano delle manutenzioni
- Le eventuali variazioni della baseline

La stipula di un contratto EPC dev'essere sempre valutata correttamente da parte della ESCo, pertanto sono necessari riferimenti per la baseline sicuri e l'attenta analisi economica, tecnica e gestionale dell'investimento.

I soggetti finanziatori dei progetti per l'efficienza energetica sono tre (ESCo, cliente/utilizzatore energetico e terze parti), i finanziamenti possono essere esclusivi o condivisi tra essi.

La forma di finanziamento tramite terzi (acronimo FTT o TPF – *third part financing*), propone il recupero del finanziamento con il risparmio di energia, il quale costituisce anche la garanzia dell'investimento. Il soggetto finanziatore può essere remunerato in tre meccanismi:

- Shared saving: in questo caso è l'ESCO ad assumersi le responsabilità di finanziamento, i risparmi vengono divisi per un tempo stabilito di tempo in percentuali accordate tra cliente e società.
- First out: in questo caso il risparmio energetico conseguito va interamente alla ESCo per tutto il tempo della durata del contratto. Inoltre ha la titolarità degli impianti e l'intero rischio finanziario e tecnico. Al termine del contratto, l'impianto diventa interamente proprietà del cliente. È il contratto di minor durata, circa 3 – 5 anni
- Guaranteed saving: in questo tipo di contratto, la ESCo e il cliente concordano una soglia di risparmio minimo garantito dai risultati della diagnosi energetica e dagli studi di fattibilità degli interventi.

TEE

I certificati bianchi, anche noti come “Titoli di Efficienza Energetica”, sono stati istituiti dal D.M. 20/7/04 e successivamente modificati e integrati con i D.M. 21/12/07 e D.M. 28/12/12.

I TEE sono emessi dal Gestore dei Mercati Energetici in favore di: distributori di energia elettrica e gas e società controllate (con più di 50000 clienti finali), i distributori non obbligati, le società operanti nel settore dei servizi energetici (ESCO), le imprese e gli enti che si dotino di un energy manager o di un sistema di gestione ISO 50001.

Per poter ottenere i TEE, è necessaria la diagnosi energetica per l'individuazione e la quantificazione dei possibili interventi di risparmio e per la quantificazione dei TEE derivanti; la realizzazione degli interventi; la presentazione della domanda al Gestore dei Servizi Energetici (GSE); la consuntivazione dei risparmi effettivi generati, il riconoscimento dei TEE generati da parte del GSE e la vendita/valorizzazione economica dei TEE generati.

La valorizzazione dei TEE avviene all'interno del mercato dei TEE, in cui i distributori possono acquistare i titoli mancanti alla quota obbligatoria annua o vendere titoli in caso di titoli in eccesso e consente la vendita di titoli ottenuti tramite progetti autonomi da parte delle ESCo o altri soggetti non obbligati ma aventi diritto. Il GME gestisce il Mercato e il registro TEE. (www.mercatoelettrico.org, s.d.).

L'Autorità per l'energia pubblica inoltre rapporti annuali e semestrali sui risultati del meccanismo, previsioni future e proposte sul miglioramento dell'efficacia e l'efficienza con il concerto di ENEA (Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo

sviluppo economico sostenibile) e del GME. Le linee guida, quindi, diventano lo strumento di regolazione principale del sistema, poiché indicano criteri per l'impostazione di attività sulla base di presentazione di richieste di verifica e certificazione dei risparmi conseguiti, del calcolo dei risparmi energetici e la certificazione di tali risparmi ottenuti tramite progetti con l'emissione di Titoli di Efficienza Energetica.

Per poter presentare i progetti per l'ottenimento dei TEE è necessario raggiungere soglie limite:

Tabella 35 – Soglie minime per la presentazione di progetti per l'ottenimento di TEE

PROGETTO	SOGGETTI OBBLIGATI	SOGGETTI DIVERSI
	[tep/anno]	[tep/anno]
STANDARDIZZATO	20	20
ANALITICO	40	40
A CONSUNTIVO	60	60

Nel calcolo dei TEE risparmiati, si deve tenere conto di un coefficiente di durabilità moltiplicativo tau, che permette di riconoscere un numero maggiore di TEE in grado di generare risparmi energetici nel corso di molti anni. Per il progetto soggetto della tesi si è ipotizzato un tau pari a 1.87, poiché è un intervento che genera risparmio energetico per un numero di anni superiore alla vita "convenzionale".

CONCLUSIONI

Dall'indagine conoscitiva si è visto che il potenziale di nuove installazioni nel consorzio Vetro Energia è elevato, si potrebbe quindi presumere che l'impatto di eventuali interventi di sostegno economico statali e regionali diventino leva per il miglioramento dell'efficienza nel distretto del vetro artistico.

Infatti, il 54% dei forni a crogiolo è privo di qualsiasi tecnologia presentata nel capitolo 4, mentre la situazione tecnologica dei Day Tank è nettamente migliore, ben il 55% presenta sia sistemi di recupero di calore che la regolazione della combustione.

Il risparmio ottenibile tra la tecnologia obsoleta e la tecnologia delle nuove installazioni può arrivare fino al 50%, per alcune taglie e per alcune fasi del ciclo termico.

Lo sviluppo di un modello predittivo dei consumi potrebbe garantire, nel prossimo futuro l'accesso a incentivazioni di origine statale, come i Titoli di Efficienza Energetica.

I risultati dell'analisi economica rendono comunque risultati positivi, per quanto riguarda i forni a crogiolo e leggermente meno positivi per i forni Day Tank: la forte variabilità e il calo importante del costo del gas naturale, rende questi interventi meno remunerativi dal punto di vista del risparmio energetico, se non affiancati a una politica di incentivazione.

Se valutati dal punto di vista dei cicli termici settimanali, la convenienza economica aumenta con l'aumentare del numero di fusioni: lo sfruttamento del forno nuovo per la fusione e la redistribuzione del vetro fuso nei forni a minore efficienza potrebbe far risparmiare ulteriormente e ottimizzare le risorse tecnologiche disponibili. Altri accorgimenti sono di tipo gestionale e operativo e alcuni di essi sono considerabili a costo zero: la sensibilizzazione dei responsabili di produzione al tema dell'efficienza energetica e la formazione degli operatori potrebbero garantire ulteriori risultati.

Dal punto di vista ambientale è ovvio che le tecnologie migliori, oltre a garantire risparmi in termini di combustibile, impattano in misura minore sull'ambiente, soprattutto in termini di emissioni.

È comunque necessario far notare che la filiera del vetro artistico di Murano rappresenta l'artigianalità italiana nel Mondo e i suoi prodotti unici sono riconosciuti per la loro qualità e ricerca: quindi è essenziale patrocinarne il saper-fare italiano e le professionalità uniche nel loro genere.

BIBLIOGRAFIA

- Cattarin, G., Pagliano, L., & Roscetti, A. (2013). *Potenziale per l'efficienza energetica in Italia, prospettive per i contratti a rendimento energetico - PROGRAMME/4CE499P3, CENTRAL EUROPE. CENTRAL EUROPE PROGRAMME/4CE499P3.*
- Confartigianato Venezia; Consorzio Provometro Murano. (2015). *Murano: un'economia fragile? I numeri, le problematiche, le prospettive.* Venezia: Sintesi Centro Studi.
- Correll, Charles M. (s.d.). *www.correllglassstudio.com.* Tratto da Correll Glass Studio.
- Dall'Igna, R., D'Este, A., & Maurina, S. (2012, novembre 25). *I forni da vetro. I forni da vetro: corso per tecnici vetrai.* Venezia, Italia: Stazione Sperimentale del Vetro.
- Ferry, K., McMahon, N., Portnoy, A., & Troiano, J. (2006). *Murano Energy Reduction - An investigation of technologies to reduce fuel consumption in artistic glass furnaces.* Worcester Polytechnic Institute. Venezia: Worcester Polytechnic Institute.
- Greens, A. P. (1959). *A Simplified Method for Calculating Heat Transfer Through Refractory Walls.*
- Lorenzoni, A. (2014). *Appunti di Economia dell'Energia .*
- Turns, S. R. (2012). *An introduction to Combustione, Concepts and Applications.* McGraw Hill Education.

SITOGRAFIA

- www.autorita.energia.it.
- www.enea.it.
- www.mercatoelettrico.org
- www.agenziaefficienzaenergetica.it

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare innanzitutto il professor Arturo Lorenzoni, per aver supportato sin dall'inizio il lavoro di questa tesi.

Ringrazio il consorzio Vetro Energia, sponsor del progetto e le aziende che hanno reso possibile con la loro disponibilità questo lavoro.

Ringrazio l'Ing. Santino e l'Ing. Ferrari di ENEA, per la loro continua attenzione verso il progetto, Gino Cester, "miniera" di informazioni e di esperienza, la Falorni s.r.l., Diego Favarato e Gino Ongaro di S.E.I. ESCo, ideatori e promotori dell'efficientamento nel settore del vetro artistico di Murano.

Ringrazio l'Ing. Fabio Minchio, per gli insegnamenti che mi ha dato in questi anni, per la costante disponibilità e per la passione per il lavoro che mi ha trasmesso.

Ringrazio mia madre, che mi ha sempre sostenuta e sopportata in questi anni di università e mio padre, che mi ha aiutata a non mollare quando le cose si sono rese difficili.

Grazie a tutti i miei amici e ai miei compagni di università, di squadra e di coro, mi avete illuminato anche i giorni più grigi.

Infine ringrazio mia sorella e le dedico questa Tesi.

Vola solo chi osa farlo (L. Sepulveda)