

Università degli studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi  
Industriali

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

**APPROCCI MULTI-OBIETTIVO PER IL  
BILANCIAMENTO DELLE LINEE DI ASSEMBLAGGIO  
MIXED MODEL**

**MULTI-OBJECTIVE APPROACHES FOR MIXED  
MODEL ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM**

**RELATORE:** CH.MO PROF. FABIO SGARBOSSA

**LAUREANDO:** CARLOTTA MILANI

ANNO ACCADEMICO 2015/2016



*A tutti coloro che hanno sempre creduto in me..*

*A tutti coloro che non avrebbero mai scommesso su di me..*

*A Mauro e Daniela, i miei genitori..*

*Alla mia famiglia..*

*Ad Alberto..*

*Agli amici che mi hanno sempre sostenuto..*

*A me stessa..perchè non ci credo mai abbastanza..*



# SOMMARIO

---

---

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>LETTERATURA</b> .....	<b>3</b>
2.1	INTRODUZIONE ALLE LINEE DI ASSEMBLAGGIO.....	3
2.2	INTRODUZIONE DELL'ERGONOMIA NELLE LINEE DI ASSEMBLAGGIO.....	6
2.3	APPROCCI PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLE LINEE DI ASSEMBLAGGIO IN TERMINI DI PRODUTTIVITÀ .....	7
2.3.1	METODI EURISTICI.....	8
2.3.2	METODO DI PROGRAMMAZIONE LINEARE .....	13
2.4	APPROCCI PER LA VALUTAZIONE ERGONOMICA DELLE LINEE DI ASSEMBLAGGIO .....	16
2.5	APPROCCI PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLE LINEE DI ASSEMBLAGGIO CONSIDERANDO L' ERGONOMIA E LA PRODUTTIVITÀ.....	25
<b>3</b>	<b>APPROCCI MULTI-OBIETTIVO</b> .....	<b>33</b>
3.1	MODELLO DI PROGRAMMAZIONE LINEARE PER UN CASO MIXED MODEL.....	33
3.2	MODELLO EURISTICO PER UN CASO MIXED MODEL .....	39
3.3	INDICI DI VALUTAZIONE PER GLI APPROCCI MULTI-OBIETTIVO 42	
3.3.1	INDICI DI VALUTAZIONE DAL PUNTO DI VISTA TEMPORALE.....	42
3.3.2	INDICI DI VALUTAZIONE DAL PUNTO DI VISTA ENERGETICO ....	45

<b>4</b>	<b>CASO STUDIO</b> .....	49
4.1	PRESENTAZIONE CASO NUMERICO .....	49
4.2	ANALISI CON IL MODELLO DI PROGRAMMAZIONE LINEARE ....	53
4.3	ANALISI CON IL MODELLO EURISTICO.....	71
4.3.1	RIPENSAMENTO DEL BILANCIAMENTO CON IL MODELLO EURISTICO IN TERMINI ENERGETICI.....	87
4.3.2	ANALISI CON IL MODELLO EURISTICO CON LIMITE ENERGETICO VARIABILE .....	89
4.3.3	ANALISI CON IL MODELLO EURISTICO CON IL RAPPORTO ENERGIA E TEMPO VARIABILE .....	97
4.3.4	ANALISI CON IL MODELLO EURISTICO CON IL RAPPORTO ENERGIA E TEMPO COSTANTE E CON COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE VARIABILE .....	104
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONI</b> .....	113
	<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b> .....	117
	<b>APPENDICE A</b> .....	119
	<b>APPENDICE B</b> .....	121

# INDICE FIGURE

---

---

Figura 2.1 rappresentazione della linea di assemblaggio single model, multi-model e mixed-model .....	5
Figura 2.2 : procedimento di risoluzione Kottas & Lau .....	13
Figura 2.3 : foglio di valutazione rula.....	17
Figura 3.1: rappresentazione della frontiera efficiente di Pareto (FE).....	38
Figura 4.1: rappresentazione del modello M1 (manca il task G poiché ha tempo nullo in tabella).....	50
Figura 4.2: rappresentazione del modello M2 (manca il task L poiché ha tempo nullo in tabella).....	50
Figura 4.3: rappresentazione del modello M3 (manca il task D poiché ha tempo nullo in tabella).....	51
Figura 4.4 : rappresentazione del modello M4 (manca il task P poiché ha tempo nullo in tabella).....	51
Figura 4.5 : rappresentazione degli indici M-MST e M-MSE e della frontiera efficiente di Pareto .....	53
Figura 4.6: rappresentazione degli indici SX-T e SX-E e della frontiera efficiente di pareto.....	54
Figura 4.7 : rappresentazione del tempo ciclo e di $\phi_1$ .....	55
Figura 4.8: rappresentazione del tempo ciclo e di $\phi_2$ .....	55
Figura 4.9: rappresentazione del tempo ciclo e di $\phi_5$ .....	56
Figura 4.10 : rappresentazione del tempo ciclo e di $\phi_6$ .....	56
Figura 4.11: rappresentazione del tempo ciclo e di $\phi_6''$ .....	57
Figura 4.12: rappresentazione del tempo ciclo e di $\phi_7$ .....	57
Figura 4.13 : rappresentazione del tempo ciclo e di $\phi_7''$ .....	58
Figura 4.14: rappresentazione del limite energetico e di $\gamma_1$ .....	59
Figura 4.15: rappresentazione del limite energetico e di $\gamma_2$ .....	60
Figura 4.16: rappresentazione del limite energetico e di $\gamma_5$ .....	60
Figura 4.17: rappresentazione del limite energetico e di $\gamma_6$ .....	61
Figura 4.18: rappresentazione del limite energetico e di $\gamma_6''$ .....	61
Figura 4.19: rappresentazione del limite energetico e di $\gamma_7$ .....	62
Figura 4.20: rappresentazione del limite energetico e di $\gamma_7''$ .....	62
Figura 4.21 : rappresentazione di $\phi_1$ e $\gamma_1$ .....	63

Figura 4.22 : rappresentazione di $\phi_2$ e $\gamma_2$ .....	64
Figura 4.23 : rappresentazione di $\phi_1$ e $\gamma_2$ .....	65
Figura 4.24: rappresentazione di $\phi_2$ e $\gamma_1$ .....	65
Figura 4.25: rappresentazione di $\phi_5$ e $\gamma_5$ .....	66
Figura 4.26 : rappresentazione di $\phi_6$ e $\gamma_6$ .....	66
Figura 4.27: rappresentazione di $\phi_6''$ e $\gamma_6''$ .....	67
Figura 4.28: rappresentazione di $\phi_7$ e $\gamma_7$ .....	67
Figura 4.29 : rappresentazione di $\phi_7''$ e $\gamma_7''$ .....	68
Figura 4.30: rappresentazione di $\phi_5$ e SX-T .....	69
Figura 4.31 : rappresentazione di $\gamma_5$ e SX-E .....	69
Figura 4.32 : rappresentazione degli indici M-MST e M-MSE con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	74
Figura 4.33: rappresentazione degli indici SX-T e SX-E con evidenza dello scenario trovato con l'euristico.....	74
Figura 4.34 : rappresentazione degli indici $\phi_1$ e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	75
Figura 4.35 : rappresentazione degli indici $\phi_2$ e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	75
Figura 4.36 : rappresentazione degli indici $\phi_5$ e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	76
Figura 4.37 : rappresentazione degli indici $\phi_6$ e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	76
Figura 4.38: rappresentazione degli indici $\phi_6''$ e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	77
Figura 4.39 : rappresentazione degli indici $\phi_7$ e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	77
Figura 4.40 : rappresentazione degli indici $\phi_7''$ e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	78
Figura 4.41 : rappresentazione degli indici $\gamma_1$ e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	79
Figura 4.42 : rappresentazione degli indici $\gamma_2$ e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	79
Figura 4.43 : rappresentazione degli indici $\gamma_5$ e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	80

Figura 4.44 : rappresentazione degli indici $\gamma_6$ e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	80
Figura 4.45: rappresentazione degli indici $\gamma_6''$ e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	81
Figura 4.46 : rappresentazione degli indici $\gamma_7$ e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	81
Figura 4.47 : rappresentazione degli indici $\gamma_7''$ e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	82
Figura 4.48 : rappresentazione degli indici $\phi_1$ e $\gamma_1$ con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	83
Figura 4.49 : rappresentazione degli indici $\phi_2$ e $\gamma_2$ con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	83
Figura 4.50 : rappresentazione degli indici $\phi_5$ e $\gamma_5$ con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	84
Figura 4.51 : rappresentazione degli indici $\phi_6$ e $\gamma_6$ con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	84
Figura 4.52 : rappresentazione degli indici $\phi_6''$ e $\gamma_6''$ con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	85
Figura 4.53 : rappresentazione degli indici $\phi_7$ e $\gamma_7$ con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	85
Figura 4.54 : rappresentazione degli indici $\phi_7''$ e $\gamma_7''$ con evidenza dello scenario trovato con l'euristico .....	86
Figura 4.55 : rappresentazione del valore scelto come massimo limite energetico accettabile e $\gamma_1$ .....	90
Figura 4.56 : rappresentazione del valore scelto come massimo limite energetico accettabile e $\gamma_2$ .....	91
Figura 4.57 : rappresentazione del valore scelto come massimo limite energetico accettabile e $\gamma_5$ .....	91
Figura 4.58 : rappresentazione delle soluzioni dei vari con limite energetico variabile nel grafico che mette a confronto M-MST e M-MSE degli scenari ottenuti con la programmazione lineare.....	92
Figura 4.59 : rappresentazione delle soluzioni dei vari con limite energetico variabile nel grafico che mette a confronto M-MST e M-MSE degli scenari ottenuti con la programmazione lineare.....	93

Figura 4.60 : rappresentazione di $\gamma_1$ e del limite energetico degli scenari ottenuti con la programmazione lineare e dei vari casi ottenuti con l'euristico al variare del limite energetico .....	93
Figura 4.61 : rappresentazione di $\gamma_2$ e del limite energetico degli scenari ottenuti con la programmazione lineare e dei vari casi ottenuti con l'euristico al variare del limite energetico .....	94
Figura 4.62 : rappresentazione di $\gamma_5$ e del limite energetico degli scenari ottenuti con la programmazione lineare e dei vari casi ottenuti con l'euristico al variare del limite energetico .....	94
Figura 4.63 : rappresentazione di $\phi_1$ e $\gamma_1$ degli scenari ottenuti con la programmazione lineare e dei vari casi ottenuti al variare del limite energetico.....	95
Figura 4.64 : rappresentazione di $\phi_2$ e $\gamma_2$ degli scenari ottenuti con la programmazione lineare e dei vari casi ottenuti al variare del limite energetico.....	95
Figura 4.65 : rappresentazione di $\phi_5$ e $\gamma_5$ degli scenari ottenuti con la programmazione lineare e dei vari casi ottenuti al variare del limite energetico.....	96
Figura 4.66 : rappresentazione di M-MSE al variare di ET .....	99
Figura 4.67 : rappresentazione di SX-E al variare di ET .....	100
Figura 4.68 : rappresentazione di $\gamma_1$ al variare di ET .....	100
Figura 4.69 : rappresentazione di $\gamma_2$ al variare di ET .....	101
Figura 4.70 : rappresentazione di $\gamma_5$ al variare di ET .....	101
Figura 4.71 : rappresentazione di $\gamma_6$ al variare di ET .....	102
Figura 4.72 : rappresentazione di $\gamma_6''$ al variare di ET .....	102
Figura 4.73 : rappresentazione di $\gamma_7$ al variare di ET .....	103
Figura 4.74 : rappresentazione di $\gamma_7''$ al variare di ET .....	103
Figura 4.75 : rappresentazione di M-MSE al variare di R .....	107
Figura 4.76 : rappresentazione di SX-E al variare di R .....	107
Figura 4.77 : rappresentazione di $\gamma_1$ al variare di R .....	108
Figura 4.78 : rappresentazione di $\gamma_2$ al variare di R .....	108
Figura 4.79 : rappresentazione di $\gamma_5$ al variare di R .....	109
Figura 4.80 : rappresentazione di $\gamma_6$ al variare di R .....	109
Figura 4.81 : rappresentazione di $\gamma_6''$ al variare di R.....	110
Figura 4.82 : rappresentazione di $\gamma_7$ al variare di R .....	110
Figura 4.83 : rappresentazione di $\gamma_7''$ al variare di R .....	111

# INDICE TABELLE

---

---

Tabella 2.1 : rappresentazione delle tipologie di assembly line balancing problem....	8
Tabella 2.2 : valutazione del punteggio RULA .....	17
Tabella 2.3 : valutazione del punteggio OCRA .....	19
Tabella 2.4 : punteggi OWAS per i vari distretti .....	20
Tabella 2.5: tabella ad entrata multipla per determinare la classe di rischio in base alla postura .....	21
Tabella 2.6: valori indici di rischio OWAS e livelli di esposizione.....	22
Tabella 3.1: schema utilizzato per l'assegnazione dei task alle varie stazioni per il modello euristico.....	40
Tabella 4.1: rappresentazione dei tempi ( $t_{mx}$ ) e delle energie ( $e_{mx}$ ) di ogni singolo modello e del tempo ( $t_j'$ ) e dell'energia ( $e_j'$ ) relativi al VAM .....	49
Tabella 4.2: rappresentazione di $E_j'$ e $L_j'$ .....	52
Tabella 4.3: rappresentazione dei task in maniera decrescente da quello con la durata temporale maggiore al minore .....	71
Tabella 4.4: rappresentazione della soluzione trovata con l'euristico .....	72
Tabella 4.5 : rappresentazione degli indici energetici e di tempo della soluzione trovata con l'euristico.....	73
Tabella 4.6 : rappresentazione della configurazione trovata cercando di sfruttare l'energia massima disponibile in ogni stazione .....	87
Tabella 4.7: indici M-MST, M-MSE, SX-T e SX-E dei due casi trovati con l'euristico messi a confronto .....	88
Tabella 4.8 : rappresentazione dei casi con limite energetico massimo accettabile variabile.....	89
Tabella 4.9 : rappresentazione degli indici di tempo dei vari casi con limite energetico massimo accettabile variabile.....	89
Tabella 4.10 : rappresentazione degli indici energetici dei vari casi con limite energetico massimo accettabile variabile.....	89
Tabella 4.11 : rappresentazione di casi studio con $e_j'$ variabile e quindi con il rapporto energia e tempo variabile (ET) .....	98
Tabella 4.12 : rappresentazione degli indici di tempo con i rispettivi valori costanti per i dodici casi con ET variabile.....	99

Tabella 4.13 : rappresentazione di casi studio con $e_j$ variabile e quindi con il rapporto energia e tempo variabile (ET) .....	99
Tabella 4.14 : rappresentazione di casi studio con ET costante e con R variabile...	105
Tabella 4.15 : rappresentazione del valore di correlazione in ordine crescente.....	105
Tabella 4.16 : rappresentazione dell'assegnazione dei task alle stazioni con R variabile .....	106
Tabella 4.17 : rappresentazione degli indici energetici dei casi con R variabile .....	106
Tabella 5.1 : rappresentazione riassuntiva del modello di programmazione lineare introdotto nel trattato con valutazione dei risultati ottenuti .....	114
Tabella 5.2 : rappresentazione riassuntiva del modello euristico introdotto nel trattato con valutazione dei risultati ottenuti .....	115

# 1 INTRODUZIONE

---

---

L'ottimizzazione della produttività è sempre stato un principio conduttore del funzionamento di ogni fabbrica. Al giorno d'oggi, quando si parla di linee di assemblaggio, è fondamentale riuscire a trovare il giusto compromesso tra ottimizzazione dei tempi/costi e del livello ergonomico della linea.

L'obiettivo di questo testo è quello di fornire due approcci multi-obiettivo (uno di programmazione lineare ed uno euristico) utili alla risoluzione di problemi legati al bilanciamento delle linee di assemblaggio (*Assembly Line Balancing Problem - ALBP*) includendo l'aspetto ergonomico oltre a quello legato all'ottimizzazione del tempo, ricercando una soluzione trade off tra i due obiettivi.

In particolare, si cercherà di adattare i modelli alle linee di assemblaggio che forniscono come output produttivo un mix di prodotti la cui domanda è definita a priori (*assembly line mixed model*).

Il trattato ha come argomento principale le linee di assemblaggio ed è organizzato nella seguente maniera: si provvederà ad una definizione del concetto di linea di assemblaggio; si introdurrà l'importanza dell'ergonomia nelle linee stesse; si passerà ad una rappresentazione di metodi euristici e metodi di programmazione lineare utilizzati per risolvere problemi relativi alla produttività; si elencheranno inoltre i principali criteri di valutazione ergonomica utilizzati; infine verranno evidenziate le metodologie della letteratura il cui obiettivo è quello di ottimizzare le linee di assemblaggio sia dal un punto di vista della produttività, che dal punto di vista ergonomico ed energetico. Si introdurranno poi due approcci multi-obiettivo innovativi per risolvere problemi mixed model. Si passerà infine ad un caso studio in cui si applicano i due modelli presentati per capirne l'utilità.



## 2 LETTERATURA

---

---

### 2.1 INTRODUZIONE ALLE LINEE DI ASSEMBLAGGIO

---

Una linea di assemblaggio è un insieme di lavoratori, utensili, macchine, elementi di congiunzione, operazioni (task) e stazioni che permettono di eseguire un processo manifatturiero il cui obiettivo è quello di partire da un elemento base a cui aggiungere di volta in volta, stazione dopo stazione, delle parti (solitamente intercambiabili) che andranno a costituire l'assemblato finale; tutte le parti costitutive vengono aggiunte in sequenza nel momento in cui attraversano le varie stazioni fino ad ottenere il prodotto finito. Ogni assemblato è caratterizzato da una distinta base più o meno complessa che richiede una corretta gestione dell'approvvigionamento dei componenti per ogni stazione. In ogni stazione poi si effettuano delle operazioni di assemblaggio diverse compiute tutte da un'unica risorsa che può essere un'operatore o una macchina automatica. Dal momento che non sempre è possibile sostituire lavori manuali con automatismi, è importante che il contributo umano sia agevolato il più possibile in modo tale che l'assemblaggio possa procedere in maniera rapida; fondamentali in merito sono le interconnessioni tra le varie stazioni mediante carrelli elevatori, gru a ponte (se il peso dell'assemblato è elevato), gravità, nastri trasportatori ma altrettanto fondamentale è fornire all'operatore le migliori condizioni di lavoro: negli ultimi anni, come si vedrà più avanti nell'elaborato, il fattore ergonomico è diventato fondamentale e parte integrante nella progettazione di una nuova linea di assemblaggio.

I principi fondamentali di funzionamento delle linee di assemblaggio sono stati per la prima volta definiti ed introdotti da Henry Ford nel dicembre del 1913: come risultato si arrivò a ridurre il tempo di produzione di una macchina da 12 a 2 ore e mezza, più del 80% di risparmio, aumentando di conseguenza la produttività. Da quel momento in poi la domanda dei vari prodotti aumentò a dismisura. Per riuscire a soddisfare quindi la domanda le linee di assemblaggio venivano progettate per essere efficienti solamente in termini di costo riuscendo quindi a produrre enormi quantità di pezzi standardizzati a prezzi contenuti: da questo nacque la così detta *mass production* o produzione di massa. Oggigiorno però, la domanda è variata e si

richiede maggiore personalizzazione, i consumatori desiderano poter scegliere tra varie opzioni di configurazione e pertanto i sistemi di produzione e in particolare le linee di assemblaggio devono essere in grado di rispondere a tale richiesta. Per poter produrre questa enorme varietà di prodotti senza disperdere i benefici in termini di efficienza interrelati alla produzione continua (*flow-production*) vengono introdotte le linee di assemblaggio mixed-model. Questo sistema di produzione non è stato introdotto solo in campo automobilistico ma anche nel mondo della produzione dei beni di qualsiasi genere (mobili, vestiti, apparecchi elettronici etc.).

In una linea di assemblaggio mixed-model l'utilizzo di risorse flessibili porta ad una sostanziale riduzione del tempo di setup e dei costi; in generale i prodotti possono essere fabbricati congiuntamente tramite una precisa sequenza produttiva nella stessa linea, i lotti possono anche essere formati da un unico modello.

Oltre ad avere risorse flessibili, per il funzionamento di una linea mixed-model, è fondamentale che i vari modelli del prodotto abbiano un minimo livello di omogeneità produttiva; in questo modo le operazioni di assemblaggio possono essere considerate comuni anche se non per tutti i modelli si dovranno eseguire gli stessi task. In pratica è importante che esista un prodotto "base" al quale aggiungere o togliere elementi opzionali.

In letteratura (Becker and Scholl,2006 e Scholl,1995) esistono però tre tipi di linee di assemblaggio:

- single-model
- multi-model
- mixed-model (già introdotta).

Si osservi la FIGURA 2.1 per capire meglio, anche visivamente, quale possa essere la differenza tra le tre diverse tipologie.

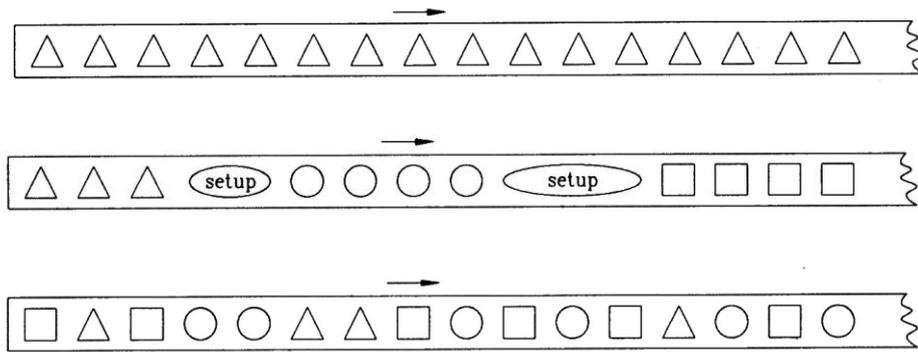


FIGURA 2.1 rappresentazione della linea di assemblaggio single model, multi-model e mixed-model

Come è possibile notare, la distinzione tra le tre modalità di assemblaggio dipende dal lotto di produzione: nella linea single model non vi è un vero lotto in quanto la linea è dedicata alla produzione di un singolo prodotto; nella multi model si produce in base al lotto economico di produzione dopo del quale deve esserci obbligatoriamente un set up per poter cambiare modello; nella mixed model invece, come già detto anticipato, si producono, grazie alla presenza di risorse flessibili, lotti da un pezzo ciascuno in quanto la sequenza di produzione è indifferente e non serve un setup.

Nell'elaborato si considereranno le linee mixed model in quanto sono sicuramente le più utilizzate per rispondere al livello di customizzazione oggi richiesto dalla domanda.

## 2.2 INTRODUZIONE DELL'ERGONOMIA NELLE LINEE DI ASSEMBLAGGIO

---

Come anticipato nel capitolo precedente, al giorno d'oggi non è importante riuscire ad ottimizzare la linea di assemblaggio solo dal punto di vista della produttività ma è fondamentale riuscire anche a favorire le condizioni lavorative degli operai. Negli ultimi anni si è visto che migliorando il livello ergonomico di una linea di assemblaggio la qualità e la produttività della stessa linea sono aumentate: favorendo il fattore ergonomico si sono ridotti i problemi muscolo-scheletrici (*work related musculoskeletal disorders, WMSDs*) che potrebbero avere gli operatori nel caso dovessero fare lavori ripetitivi e pesanti. Nel 2008 si è visto come in 315.000 casi di lavoratori che hanno riscontrato i problemi sopra citati hanno richiesto una media di 10 giorni di assenza dal lavoro (U.S. Bureau of Labor Statistic,2009); in generale i giorni di assenza dovuti all'insorgere di questo tipo di problemi possono portare ad una perdita annuale anche oltre i 20.000 milioni di dollari nell'economia di uno stato: la capacità produttiva si riduce essenzialmente dovuta all'assenteismo, si bassa produttività e si ha un elevato livello di difettosità. Stando a questi dati si vede necessario un intervento anche a livello ergonomico. I risultati ovviamente non fanno che confermare l'importanza di questo tema; si veda Peugeot in cui, con l'introduzione di un programma basato sull'ottimizzazione dell'ergonomia della linea di assemblaggio, abbia portato non solo ad una riduzione del tempo ciclo medio di produzione di una macchina ma ad una riduzione del 30% di casi legati a problemi muscolo-scheletrici. Non solo Peugeot ha colto l'importanza di introdurre dei metodi per comprendere il rischio ergonomico del posto di lavoro ma anche svariate altre case automobilistiche come Toyota, General Motors, Volkswagen e molti altri.

Seppur apparentemente focalizzarsi anche sull'ergonomia e sul dispendio energetico in una linea di assemblaggio portino ad avere ottimi risultati in letteratura non vi sono molti studi in merito. Gli studi che sono stati fatti solitamente si focalizzano o sull'ottimizzare la linea di assemblaggio dal punto di vista produttivo o sulla valutazione del rischio ergo-energetico. Sarebbe opportuno riuscire a congiungere i due obiettivi.

## 2.3 APPROCCI PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLE LINEE DI ASSEMBLAGGIO IN TERMINI DI PRODUTTIVITÀ

---

È interessante presentare alcune delle metodologie più utilizzate in letteratura per l'ottimizzazione della linee di assemblaggio dal punto di vista produttivo. Saranno elencati sia dei metodi euristici che di programmazione lineare. Con il termine “metodi euristici” si intende quell'insieme di metodi per i quali, dato un problema, si arriva ad una soluzione accettabile attraverso un procedimento intuitivo che però difficilmente porta ad avere la soluzione ottimale (seppur si avvicini molto). Con il termine “metodi di programmazione lineare” invece, si intende quella branca della ricerca operativa che si occupa di studiare algoritmi di risoluzione per problemi di ottimizzazione lineari. Un problema è detto lineare se la funzione obiettivo e i vincoli sono funzioni lineari.

Le metodologie che si elencheranno sono state pensate per una linea single model ma sono adattabili anche ad una linea mixed model.

I tipi di problemi con cui si può avere a che fare sono i seguenti e hanno solitamente come incognita o il numero delle stazioni e/o il tempo ciclo:

- Assembly Line Balancing Problem Fisibility (ALBP-F) → si verifica la fattibilità avendo come dato iniziale il tempo ciclo e il numero di stazioni;
- Assembly Line Balancing Problem di tipo 1 (ALBP-1) → si cerca di minimizzare il numero di stazioni avendo come dato di partenza il tempo ciclo;
- Assembly Line Balancing Problem di tipo 2 (ALBP-2) → si cerca di minimizzare il tempo ciclo avendo come dato di partenza il numero di stazioni;
- Assembly Line Balancing Problem Efficiency (ALBP-E) → si cerca di minimizzare sia il tempo ciclo che il numero di stazioni cercando quindi di ottimizzare l'efficienza del sistema.

Le diverse tipologie appena elencate sono rappresentate in TABELLA 2.1.

numero stazioni	NOTO	MIN
tempo ciclo		
NOTO	ALBP-F	ALBP-1
MIN	ALBP-2	ALBP-E

TABELLA 2.1 : rappresentazione delle tipologie di assembly line balancing problem

---

### 2.3.1 METODI EURISTICI

---

Si elencheranno in seguito i principali metodi euristici utilizzati per ottimizzare le linee di assemblaggio dal punto di vista della produttività.

#### *1. Largest Candidate Rule (LCR)*

Il metodo in questione viene utilizzato soprattutto per risolvere problemi del tipo SALBP-1: si conosce il ritmo della linea ovvero il tempo ciclo e bisogna ottimizzare il numero di stazioni da utilizzare.

Avendo come dati iniziali il numero di task, il diagramma delle precedenze, la durata dei task e il tempo ciclo, il metodo si basa sulle seguenti operazioni da fare:

- ordinare i task in base alla loro durata in maniera decrescente;
- procedere con l'assegnare i vari task alle stazioni; bisogna far riferimento al diagramma delle precedenze e tra i task disponibili si deve scegliere quello con la durata maggiore in riferimento all'ordinamento di cui sopra;
- ogni volta che si sceglie il task da assegnare alla stazione bisogna controllare che la somma della durata del task appena aggiunto e la durata di quelli già assegnati non superino il tempo ciclo massimo dato dal problema; nel caso la somma dei tempi

superasse il tempo ciclo massimo si è costretti ad aprire un'altra stazione (è importante cercare la saturazione del 100% per ogni stazione aperta).

È opportuno calcolare, in riferimento al bilanciamento scelto, l'efficienza:

$$EFF = \frac{\sum \text{workstation load}}{k * T_c} \quad (1),$$

con il termine *workstation load* si intende il carico di lavoro assegnato ad ogni stazione che si è deciso di utilizzare, con  $k$  si intende il numero delle stazioni scelte e con  $T_c$  si intende il tempo ciclo del problema dato inizialmente. È opportuno che l'indice di efficienza si aggiri attorno all' 85 ÷ 90 %.

## 2. *Ranked Positional Weights Method (RPW)*

Anche in questo caso l'euristico è adatto alla risoluzione di problemi di tipo SALBP-1: si conosce il ritmo della linea ovvero il tempo ciclo e bisogna ottimizzare il numero di stazioni da utilizzare.

Anche in questo caso dati iniziali sono: il numero di task, il diagramma delle precedenze, la durata dei task e il tempo ciclo. Il metodo si basa sui seguenti passaggi da fare:

- calcolare per ogni task un punteggio associato:

$$RPW_j = t_j + \sum_{h \in S_j} t_h \quad (2)$$

con  $RPW_j$  che rappresenta il punteggio associato al task  $j$ , con  $t_j$  che rappresenta la durata di ogni task, con  $S_j$  l'insieme di tutti i task che succedono il task  $j$  e con  $t_h$  che rappresenta la durata del task  $h$  appartenente all'insieme dei successori del task  $j$ ;

- dopo aver calcolato tutti i punteggi associati ad ogni task  $j$ , si devono ordinare i task in maniera decrescente;

- si procede ora in maniera analoga al caso precedente: bisogna procedere con l'assegnare i vari task alle stazioni; ci si riferisce al diagramma delle precedenze in modo tale da capire quali task possono essere assegnati alla stazione, tra i task disponibili si deve scegliere quello con il punteggio maggiore e non quello con la durata maggiore; ogni volta che si sceglie il task da assegnare alla stazione bisogna comunque controllare che la somma della durata del task appena aggiunto e la durata di quelli già assegnati non superi il tempo ciclo massimo dato dal problema; come prima poi, nel caso la somma dei tempi superasse il tempo ciclo massimo si è costretti ad aprire un'altra stazione (è importante cercare la saturazione del 100% per ogni stazione aperta).

È opportuno calcolare, in riferimento al bilanciamento scelto, l'efficienza:

$$EFF = \frac{\sum workstation\ load}{k * T_c} \quad (1).$$

Anche in questo caso un buon bilanciamento dovrebbe avere un'efficienza attorno all' 85 ÷ 90 %.

### 3. Kilbridge & Western Method (KWM)

Anche in questo caso l'euristico tratta problemi di tipo SALBP-1. Questo metodo è stato introdotto per migliorare il bilanciamento: non si parla più di saturazione della stazione ma si predilige il concetto di bilanciamento del carico di lavoro.

In questo caso il modo di procedere iniziale è leggermente diverso (seppur come dati iniziali a disposizione si abbia il numero di task, il diagramma delle precedenze, la durata dei task e il tempo ciclo):

- il diagramma di precedenza va ristrutturato per livelli di precedenza: a livello 1 si hanno task senza precedenti, a livello 2 si hanno task con almeno un predecessore

diretto di livello 1, a livello 3 si hanno task con almeno un predecessore diretto di livello 2 e così via; l'importante è riuscire a sportare ogni task nel più alto livello possibile;

- a differenza dei due casi precedenti in cui si ragionava per massima durata del tempo ciclo e per punteggi in questo caso si ragiona attraverso i livelli e si decide di assegnare alla stazione prima i task disponibili a livello più basso e poi i successivi;

È opportuno calcolare, in riferimento al bilanciamento scelto, l'efficienza:

$$EFF = \frac{\sum workstation\ load}{k * T_c} \quad (1).$$

Anche in questo caso un buon bilanciamento dovrebbe avere un'efficienza attorno all' 85 ÷ 90 %.

#### *4. Kottas & Lau Method*

È un altro metodo euristico per risolvere problemi di tipo SALBP-1.

Questo metodo si basa sul principio del mancato completamento e dei costi correlati ad esso; può accadere infatti che un operatore non riesca a concludere il lavoro nel tempo assegnato tanto da bloccare le attività successive.

I dati iniziali sono: il tempo ciclo, il diagramma delle precedenze, la durata media dei task, la deviazione standard di ogni task, il costo di ogni operatore e il costo di mancato completamento e della sua esecuzione fuori linea.

Si introducono i seguenti termini:

$$L_k = M_k * \frac{C_{op}}{60} \quad (3)$$

$$I_k = \sum_{j \in S_{k+k}} I'_j \quad (4).$$

Essi rappresentano rispettivamente: il costo dell'esecuzione dell'attività in linea  $L_k$  (con  $C_{op}$  [€/h] il costo dell'operatore ed  $M_k$  [min] durata media del task) ed il costo delle operazioni che svolte fuori linea  $I_k$  ( $I'_k$  costo della singola attività  $k$  fuori linea,  $S_k$  insieme dei successori di  $k$ ).

È importante capire:

- se l'attività è svolta all'interno della linea il costo che bisogna contabilizzare è  $L_k$ ;
- se l'attività è svolta al di fuori della linea il costo che bisogna contabilizzare è  $I_k$ ;
- per essere in una condizione favorevole è opportuno che  $L_k \geq p_k * I_k$ ; il suddetto vincolo può essere tradotto, mediante un cambio di variabili, in  $z_k \geq z_k^*$ .

Con  $p_k$  si intende la probabilità di mancato completamento dell'attività  $k$  con:

$$p_k = 1 - F(z_k) \quad (5)$$

con  $F(z_k)$  ottenibile da una tabella (APPENDICE A) partendo da  $z_k$  definito come:

$$z_k = \frac{Tc - \sum_{j \in Q} M_j}{\sum_{j \in Q} \sigma_j} \quad (6)$$

in cui  $Q$  rappresenta l'insieme di task assegnati alla stazione  $k$ , con  $\sigma_j$  si intende la deviazione standard di ogni task e con  $Tc$  il tempo ciclo.

È possibile poi ottenere  $z_k^*$  dalla stessa tabella di cui sopra si è fatta menzione in cui in ascissa ed in ordinata si ha  $z_k^*$  mentre all'interno si trova  $F(z_k^*)$ , ottenuto a sua volta da:

$$F(z_k^*) = 1 - \frac{L_k}{I_k} \quad (7).$$

Se  $z_k$  supera  $z_k^*$  si tratta di un'attività desiderabile o non critica mentre se accade il contrario è non desiderabile o critica a seconda se la stazione sia vuota o meno. Ovviamente si assegna alla stazione solo attività desiderabili; se ho solo attività indesiderabili chiudo la stazione e ne apro una di nuova.

Fondamentale è consultare lo schema in FIGURA 2.2:



FIGURA 2.2 : procedimento di risoluzione Kottas & Lau

---

### 2.3.2 METODO DI PROGRAMMAZIONE LINEARE

---

Si elencherà in seguito il principale metodo di programmazione lineare utilizzato per ottimizzare le linee di assemblaggio dal punto di vista della produttività.

#### *Patterson & Albracht Method*

Questo metodo prevede la definizione di alcuni vincoli sotto forma di disequazione e di funzioni obiettivo in modo tale da riuscire a trovare una o più soluzioni accettabili ottimali. Questo metodo viene utilizzato soprattutto per risolvere problemi di tipo ALBP-F (ma adattabile anche alla risoluzione di problemi ALBP-2) in cui si conosce

il numero di stazioni e il tempo ciclo in cui l'obiettivo principale è quello di capire la possibile realizzabilità. I dati di partenza sono anche in questo caso il numero di task, il diagramma delle precedenze, la durata dei task e il tempo ciclo.

Prima di procedere con il definire i vari vincoli è importante definire i seguenti parametri:

$$E_j = \left\lceil \frac{t_j + \sum_{i \in PR_j} t_i}{T_c} \right\rceil \quad (8)$$

$$L_j = k + 1 - \left\lfloor \frac{t_j + \sum_{i \in S_j} t_i}{T_c} \right\rfloor \quad (9)$$

$E_j$  rappresenta l'*earliest station index* del task  $j$  ovvero la prima stazione a cui può essere assegnato il task  $j$  mentre  $L_j$  rappresenta il *latest station index* del task  $j$  ovvero l'ultima stazione a cui può essere assegnato il suddetto task. Considerando poi gli altri termini, si ha  $t_j$  che corrisponde al tempo impiegato per terminare il task  $j$ ; il termine  $k$  rappresenta poi il numero di stazioni che si ha inizialmente;  $S_j$  è il sottoinsieme di task che seguono il task  $j$ ;  $T_c$  è tempo ciclo fornito come dato di partenza; con  $PR_i$  si intende il sottoinsieme di task che precedono il task  $j$ . Con questi due parametri si può ricavare  $SI_j = [E_j ; L_j]$  ovvero l'intervallo a cui può essere assegnato il task  $j$ . Questo intervallo è utile per riuscire a semplificare i vincoli che si elencheranno in seguito:

- Vincolo di mono-assegnabilità

$$\sum_{k=E_j}^{L_j} x_{jk} = 1 \quad (10)$$

per ogni  $j=1, \dots, N$ ;

- Vincolo di precedenza tecnologica

$$\sum_{k=E_h}^{L_h} k * x_{hk} \leq \sum_{i=E_j}^{L_j} i * x_{hi} \quad (11)$$

con  $L_h \geq E_j$  e con  $E_h \geq L_j$  e per ogni coppia di task (k,j) in cui j è il successore immediato di k;

- Vincolo sul tempo ciclo

$$\sum_{j \in SIk} t_j * x_{jk} \leq T_c \quad (12)$$

per ogni  $k=1, \dots, K$ .

La variabile di assegnazione  $x_{jk}$  contenuta nei vincoli viene definita nella seguente maniera:

$$x_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{se il task } j \text{ è assegnato alla stazione } k \\ 0, & \text{se il task } j \text{ non è assegnato alla stazione } k \end{cases} \quad (13)$$

Per quanto riguarda poi le funzioni obiettivo, si può scegliere una delle seguenti formulazioni, anche se ovviamente ci sono diverse altre alternative:

- Minimizzazione dell'ozio totale;
- Minimizzazione dell'ozio massimo;
- Minimizzazione della somma degli sbilanciamenti rispetto ad un carico medio ideale.

Come anticipato questi approcci per la risoluzione di problemi relativi alle linee di assemblaggio sono stati pensati per risolvere principalmente problemi single model. È possibile adattare questi metodi anche ai mixed model sfruttando il Virtual Average Model di cui in seguito si spiegherà la funzione e la definizione.

## 2.4 APPROCCI PER LA VALUTAZIONE ERGONOMICA DELLE LINEE DI ASSEMBLAGGIO

---

Molte sono le tecniche conosciute per la valutazione ergonomica: tecniche di valutazione soggettiva, metodi osservazionali, modelli di simulazione, metodi diretti, metodi di valutazione real time. È opportuno cercare di evitare l'utilizzo delle tecniche di valutazione che tengono in considerazione l'opinione degli operatori perché la soggettività potrebbe falsare il risultato finale. Sarebbe importante usare come alternativa i metodi osservazionali; essi solitamente consistono nell'utilizzo di un videoregistratore per filmare le attività svolte da ogni singolo operatore, successivamente si guarda il video in modo tale da analizzare quali movimenti non sono consoni ad un lavoro e che potrebbero portare a delle serie conseguenze (muscoskeletal disorder). Altro metodo che costituisce un'ottima alternativa rispetto ai metodi di valutazione soggettiva è l'utilizzo di strumenti software che permettono di ricavare degli indici che segnalino la sicurezza dell'operatore nella postazione di lavoro (RULA, OCRA, OWAS...). Con questi ultimi due approcci però c'è sempre il rischio che l'osservatore non dia il giudizio più appropriato, si può pensare quindi a metodi di simulazione nel mondo virtuale o tecniche elettromiografiche; per questi metodi però i costi aumentano esponenzialmente soprattutto per le tecniche elettromiografiche dato che bisognerebbe ricreare un'equipe formata da ingegneri e da dottori del lavoro. Altro metodo innovativo è l'utilizzo di sensori di movimento utilizzati in associazione alle tecniche elettromiografiche ma che sarebbero comunque costosi dovuti principalmente all'acquisto delle apparecchiature.

In genere quindi per una questione relativa a tempi e costi si ricorre a delle tecniche che permettono con l'ausilio di un software, di trovare un indice di valutazione.

### 1. *Rapid Upper Limb Assessment (RULA)*

Il metodo RULA è stato sviluppato per valutare l'esposizione dei singoli lavoratori a fattori di rischio ergonomici associati a problemi muscolo-scheletrici delle articolazioni superiori. La valutazione attraverso la metodologia RULA viene fatta tramite la verifica della postura e dei carichi di: collo, busto ed estremità superiori. Solitamente si utilizza un foglio, FIGURA 2.3, dove per ogni distretto del corpo viene appunto valutata la postura, la forza applicata e la ripetitività delle azioni.

# RULA Employee Assessment Worksheet

Complete this worksheet following the step-by-step procedure below. Keep a copy in the employee's personnel folder for future reference.

### A. Arm & Wrist Analysis

**Step 1: Locate Upper Arm Position**  
  
 Step 1a: Adjust...  
 If shoulder is raised: +1;  
 If upper arm is abducted: +1;  
 If arm is supported or person is leaning: -1  
 Final Upper Arm Score =

**Step 2: Locate Lower Arm Position**  
  
 Step 2a: Adjust...  
 If arm is working across midline of the body: +1;  
 If arm out to side of body: +1  
 Final Lower Arm Score =

**Step 3: Locate Wrist Position**  
  
 Step 3a: Adjust...  
 If wrist is bent from the midline: +1  
 Final Wrist Score =

**Step 4: Wrist Twist**  
 If wrist is twisted mainly in mid-range = 1;  
 If twist at or near end of twisting range = 2  
 Wrist Twist Score =

**Step 5: Look-up Posture Score in Table A**  
 Use values from steps 1, 2, 3 & 4 to locate Posture Score in table A  
 Posture Score A =

**Step 6: Add Muscle Use Score**  
 If posture mainly static (i.e. held for longer than 1 minute) or:  
 If action repeatedly occurs 4 times per minute or more: +1  
 Muscle Use Score =

**Step 7: Add Force/load Score**  
 If load less than 2 kg (intermittent): +0;  
 If 2 kg to 10 kg (static or repeated): +1;  
 If more than 10 kg load or repeated or shocks: +3  
 Force/load Score =

**Step 8: Find Row in Table C**  
 The completed score from the Arm/Wrist analysis is used to find the row on Table C  
 Final Wrist & Arm Score =

### SCORES

**Table A**

Upper Arm	Lower Arm	Wrist			
		1	2	3	4
1	1	1	2	3	3
1	2	2	2	3	3
2	1	1	3	3	4
2	2	1	3	3	4
3	1	3	4	4	5
3	2	4	4	4	5
4	1	4	4	4	5
4	2	4	4	4	5
5	1	5	5	5	6
5	2	5	5	5	6
6	1	7	7	7	8
6	2	8	8	8	8

**Table B**

Neck	Trunk Posture Score					
	1	2	3	4	5	6
1	2	1	2	1	2	1
1	3	2	3	3	4	5
2	2	3	2	3	4	5
3	3	3	3	4	5	6
4	5	5	5	6	7	8
5	7	7	7	8	9	9
6	8	8	8	9	9	9

**Table C**

1	Final Score					
	1	2	3	4	5	6
1	1	1	2	3	4	5
2	2	2	3	4	5	6
3	3	3	3	4	5	6
4	3	3	4	5	6	6
5	4	4	4	5	6	7
6	4	4	5	6	7	7
7	5	5	6	6	7	7
8	5	5	6	7	7	7

### B. Neck, Trunk & Leg Analysis

**Step 9: Locate Neck Position**  
  
 Step 9a: Adjust...  
 If neck is twisted: +1; if neck is side-bending: +1  
 Final Neck Score =

**Step 10: Locate Trunk Position**  
  
 Step 10a: Adjust...  
 If trunk is twisted: +1; if trunk is side-bending: +1  
 Final Trunk Score =

**Step 11: Legs**  
  
 If legs & feet supported and balanced: +1;  
 If not: -2  
 Final Leg Score =

**Step 12: Look-up Posture Score in Table B**  
 Use values from steps 9, 10 & 11 to locate Posture Score in Table B  
 Posture B Score =

**Step 13: Add Muscle Use Score**  
 If posture mainly static or:  
 If action 4/minute or more: +1  
 Muscle Use Score =

**Step 14: Add Force/load Score**  
 If load less than 2 kg (intermittent): +0;  
 If 2 kg to 10 kg (static or repeated): +1;  
 If more than 10 kg load or repeated or shocks: +3  
 Force/load Score =

**Step 15: Find Column in Table C**  
 The completed score from the Neck/Trunk & Leg analysis is used to find the column on Chart C  
 Final Neck, Trunk & Leg Score =

**Final Score =**

Subject: \_\_\_\_\_  
 Company: \_\_\_\_\_

Department: \_\_\_\_\_

Date: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
 Scorer: \_\_\_\_\_

FIGURA 2.3 : foglio di valutazione RULA

Nella sezione A, in FIGURA 2.3, si inserisce la valutazione per braccia e polsi; nella sezione B si valutano invece il collo e il busto. Dopo aver compilato tutti i campi, è possibile, utilizzando le tabella A e B, ricavare il punteggio finale dalla tabella C. Il valore trovato rappresenta il livello di rischio nell'incombere in problemi muscolo-scheletrici. Si osservi la TABELLA 2.2 per comprendere i punteggi.

PUNTEGGIO	LIVELLO DI RISCHIO
1 - 2	Livello di rischio accettabile, non è necessario alcun intervento
3 - 4	Basso rischio, alcuni cambiamenti possono essere richiesti
5 - 6	Rischio medio, è importante approfondire ed eventualmente apportare delle modifiche in tempi abbastanza ristretti
6 +	Rischio elevato, è importante apportare delle modifiche subito

TABELLA 2.2 : valutazione del punteggio RULA

Come è possibile intuire, il metodo RULA è facilmente utilizzabile senza alcun bisogno di costose apparecchiature a sostegno. Ovviamente è fondamentale l'oggettività dell'osservatore.

## 2. The Occupational Repetitive Actions (OCRA)

OCRA non è altro che un indice sintetico che descrive i fattori di rischio che potrebbero causare dei problemi muscolo-scheletrici agli arti superiori. La formulazione di questo indice si basa su tre premesse:

- La necessità di una valutazione completa dei fattori di rischio collegati ad uno specifico lavoro (ripetitività, forza, postura, mancanza di tempo di recupero e altri fattori addizionali) usando i metodi quantitativi già esistenti (Colombini, 2000);
- La ricerca di un “modello” che permetta di ricavare un indice rappresentativo come quello proposto da Waters *et al.* (1993) per la valutazione di sollevamenti con le mani;
- La considerazione della ripetitività dei movimenti.

Nasce quindi la formulazione del seguente indice:

$$OCRA = \frac{\text{numero totale delle azioni svolte dall'operatore durante il turno}}{\text{numero totale delle azioni consigliate durante il turno}} \quad (14)$$

In denominatore viene definito nella seguente maniera:

$$\sum_1^n [CF * F_f x * F_p x * F_a x * D x] * F_r \quad (15)$$

in cui:

- 1,...,n = numero dei movimenti svolti durante il turno;

- CF = frequenza costante delle azioni per minuto (solitamente 30 azioni/minuto);

- $F_f, F_p, F_a$  = fattori moltiplicativi che variano da 0 a 1 e che sono correlati rispettivamente: alla forza, alla postura e a elementi addizionali, per ogni movimento  $n$ ;
- $D$  = durata di ogni task espressa in minuti;
- $F_r$  = fattore moltiplicativo con valore che varia tra 0 e 1 che segnala una mancanza del periodo di recupero durante il movimento.

I risultati che si ottengono vengono valutati nel seguente modo:

<b>PUNTEGGIO</b>	<b>AREA</b>	<b>LIVELLO DI RISCHIO</b>
> 0,75	VERDE	La condizione lavorativa è accettabile, non è necessario alcun cambiamento
Compreso tra 0,75 e 4,00	ARANCIONE	La condizione lavorativa è incerta, non è necessario un intervento immediato ma bisogna monitorare la situazione
> 4,00	ROSSA	La condizione lavorativa è ad alto rischio, è importante considerare un intervento immediato

TABELLA 2.3 : valutazione del punteggio OCRA

In questo caso l'elaborazione è leggermente più complessa (si faccia riferimento per maggiori informazioni all'articolo *OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limb*, Occhipinti, 2010) ma in ogni caso, come nel RULA, non vi è alcun bisogno di un tecnico specializzato ma di un semplice osservatore.

### 3. OVAKO Working posture Analysing System (OWAS)

Questa metodologia venne introdotta da Karhu *et al.* (1977) sviluppando uno studio condotto in un'acciaieria. I lavoratori sono stati fotografati mentre facevano il loro lavoro abituale e, analizzando le fotografie, si sono riscontrate 84 posizioni

differenti. Per valutare lo sforzo correlato ad ogni posizione sono stati interpellati direttamente i lavoratori e un gruppo di studiosi dell'ergonomia riuscendo così a dare un punteggio diverso ad ogni azione in riferimento al livello di confort e a livello di salute. Si è così introdotto il metodo OWAS che permette di assegnare un punteggio alle varie posizioni assunte durante un lavoro; si sono considerati i distretti del tronco, delle braccia, delle gambe, e del collo inoltre si è preso in considerazione il peso dell'oggetto da movimentare e si è dato un punteggio di valutazione, TABELLA 2.4.

DISTRETTO DEL CORPO	PUNTEGGIO OWAS	DESCRIZIONE DELLA POSIZIONE
SCHIENA	1	Neutra
	2	In flessione
	3	In rotazione
	4	In flessione e in rotazione
BRACCIA	1	Neutra con gomiti sotto livello spalle
	2	Gomito che supera il livello spalle
	3	Gomito e mano che superano il livello spalle
GAMBE	1	Seduto
	2	In piedi con i piedi appoggiati
	3	In piedi con un solo piede in appoggio
	4	Piedi appoggiati con ginocchia piegate
	5	In piedi con un solo piede in appoggio e con il ginocchio piegato
	6	Ginocchia a terra
	7	Lavorare camminando
COLLO	1	Neutra
	2	Flessione in avanti
	3	Flessione di lato
	4	Testa sollevata
	5	Flessione in avanti e di lato
PESO	1	< 10 kg
	2	Tra i 10 kg e i 20 kg
	3	> 20 kg

TABELLA 2.4 : punteggi OWAS per i vari distretti

Una volta attribuito un punteggio per ogni distretto si utilizza la seguente tabella, TABELLA 2.5, per valutare il rischio associato al lavoro.

Schiena			1			2			3			4		
Braccia			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Gambe - Peso	1	1												
		2												
		3												
	2	1												
		2												
		3												
	3	1												
		2												
		3												
	4	1												
		2												
		3												
	5	1												
		2												
		3												
	6	1												
		2												
		3												
	7	1												
		2												
		3												

<b>Classe 1</b>		<b>Classe 2</b>		<b>Classe 3</b>		<b>Classe 4</b>	
-----------------	---	-----------------	---	-----------------	--	-----------------	---

TABELLA 2.5: tabella ad entrata multipla per determinare la classe di rischio in base alla postura

L'interpretazione delle varie classi è contenuta nella seguente tabella, TABELLA 2.6:

CLASSE	VALORE INDICE OWAS	LIVELLO DI ESPOSIZIONE	INTERPRETAZIONE	CONSEGUENZE
1	Tra 100 e 200	RISCHIO ACCETTABILE	Esposizione accettabile per la maggior parte della popolazione lavorativa di riferimento (considerata per genere e fascia di età).	Accettabile: nessuna conseguenza
2	Tra 200 e 300	RISCHIO MOLTO BASSO / BASSO	Una parte non trascurabile della popolazione lavorativa potrebbe essere esposta ad un livello di rischio molto basso o basso.	Se possibile migliorare fattori strutturali o adottare altre misure organizzative.
3	Tra 300 e 400	RISCHIO PRESENTE	Una parte più ampia della popolazione lavorativa potrebbe essere esposta ad un livello di rischio significativo.	Migliorare fattori strutturali o adottare altre misure organizzative.

4	> 400	RISCHIO ALTO	Una parte più ampia della popolazione lavorativa potrebbe essere esposta ad un livello di rischio più elevato.	Prendere immediati provvedimenti al fine di modificare le modalità operative, le attrezzature utilizzate o la posizione di lavoro degli addetti interessati.
---	-------	--------------	--	--

TABELLA 2.6: valori indici di rischio OWAS e livelli di esposizione

Il metodo appena illustrato è sicuramente il più completo messo in relazione ai primi due in quanto non considera solo la parte superiore del corpo ma anche la parte inferiore. Anche in questo caso è molto semplice da utilizzare e non serve un tecnico per poterlo applicare.

#### 4. Energy expenditure formulation di Garg et al. (1978)

Si è appena visto come i metodi tradizionali di valutazione ergonomica diano come risultato un indice semi quantitativo per la valutazione della postura e del movimento. Tutti questi metodi, insieme a molti altri (NIOSH, REBA..), non richiedono esperti in quanto abbastanza intuitivi ma richiedono parecchio tempo per riuscire ad ottenere un risultato a causa delle valutazioni da fare.

Per avere un risultato molto più rapido e sicuramente più significativo per l'obiettivo dell'elaborato in questione, è utile prendere in considerazione il metodo sviluppato da Garg et al. (1978) il quale presuppone un sistema di misura dell'ergonomia e dell'energia basato sul consumo di ossigeno del lavoratore.

Il modello è basato sull'assunzione che un lavoro può essere diviso in semplici attività o task e che il consumo medio metabolico di energia dell'intero lavoro può essere trovato come somma dei consumi medi metabolici di energia dei singoli task. Il consumo metabolico di ogni task è influenzato: dalla forza da applicare, dalla distanza di applicazione, dalla frequenza, dalla postura, dal genere e dal peso dell'operatore; ha meno influenza sul consumo dell'ossigeno: età, esperienza, dimensione del carico da spostare, velocità di esecuzione, temperatura ed umidità.

In sostanza quindi il consumo di energia metabolica media è uguale alla somma del consumo energetico dei vari task e dall'energia richiesta per mantenere la posizione nel tempo.

La formulazione matematica è la seguente:

$$\overline{\dot{E}_{Job}} = \frac{\sum_{i=1}^{ni} \dot{E}_{pos} * t_i + \sum_{i=1}^n \Delta E_{mov-i}}{T} \quad (16)$$

in cui:

- $\dot{E}_{pos} - i$  = tasso del consumo metabolico energetico dovuto al mantenimento della posizione  $i_{esimo}$  espresso in Kcal/min:
  - $\dot{E}_{pos} = 0,023 * BW$  se si mantiene la posizione da seduti;
  - $\dot{E}_{pos} = 0,024 * BW$  se si mantiene la posizione in piedi;
  - $\dot{E}_{pos} = 0,028 * BW$  se si mantiene la posizione in piedi e da piegati;
- $t_i$  = durata della posizione  $i_{esimo}$  in minuti;
- $ni$  = numero totale delle posizioni diverse assunte nel lavoro;
- $\Delta E_{mov-i}$  = consumo netto di energia del movimento  $i_{esimo}$  nello stato stazionario, espresso in Kcal;
- $n$  = numero totale di movimenti nel lavoro;
- $T$  = durata totale del lavoro in espresso in minuti;
- $BW$  = peso dell'operatore espresso in kg;
- $G$  = pendenza della superficie in cui si lavora (%);
- $h1$  = distanza verticale dal suolo in metri; è il punto di partenza di sollevamento e il punto di arrivo per l'abbassamento;
- $h2$  = distanza verticale dal suolo in metri; è il punto di arrivo del sollevamento e il punto di partenza per l'abbassamento;
- $L$  = peso del carico espresso in kg;
- $S$  = genere: 1 per gli uomini e 0 per le donne;
- $t_{mov-i}$  = tempo in minuti per lo specifico movimento  $i_{esimo}$ ;
- $X$  = movimento orizzontale delle braccia espresso in metri.

Si faccia riferimento all' APPENDICE B per avere maggiori informazioni sulle equazioni utilizzate da Garg *et al* (1978).

Questa formulazione è stata utilizzata per ottenere i valori energetici dei task nel caso studio che si prenderò in considerazione in seguito.

## 2.5 APPROCCI PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLE LINEE DI ASSEMBLAGGIO CONSIDERANDO L'ERGONOMIA E LA PRODUTTIVITÀ

---

Nei capitoli precedenti si è visto come esistano dei metodi e degli approcci per l'ottimizzazione delle linee sia dal punto di vista della produttività sia dal punto di vista ergonomico. Il fatto interessante consisterebbe però, nel riuscire ad unire questi due elementi in un unico modello. Ovviamente le due funzioni obiettivo che si devono unire sono in contrasto: da un lato la funzione obiettivo della produttività cerca di ridurre i tempi di assemblaggio e il numero delle stazioni, dall'altro la funzione obiettivo dell'ergonomia cerca di distribuire il carico di lavoro nelle varie stazioni in modo uniforme e pertanto l'ideale sarebbe avere più stazioni con pochi task e con carico energetico ridotto. La soluzione quindi da trovare è un trade off tra i due obiettivi.

Seppur dal punto di vista operativo il fatto di considerare l'ergonomia e il consumo energetico nelle linee di assemblaggio sia molto importante, in letteratura è un tema non molto trattato e quasi inesplorato.

Di seguito si esporranno le metodologie più utilizzate e note.

### 1. *ErgoSALBP di Otto e Scholl (2011)*

Il metodo prende spunto dal SALBP-1 (single model assembly line balancing problem di tipo 1: si cerca di minimizzare il numero di stazioni avendo come dato di partenza il tempo ciclo) al quale si cerca di incorporare il rischio ergonomico. La funzione del rischio ergonomico si basa sul calcolo degli indici ergonomici, come per esempio l'indice OCRA precedentemente menzionato, la cui formulazione è la seguente:

$$F = F(S_k) \quad (17)$$

con  $S_k$  si rappresenta l'insieme di task assegnati alla stazione  $k$ . Il rischio ergonomico di una stazione in sostanza dipende dalla somma dei rischi dei vari task appartenenti alla medesima stazione. Ogni task  $i$  necessariamente viene quindi caratterizzato da un livello di esposizione al rischio; esso viene calcolato o in base alla forza media applicata oppure in base al tempo in % che si spende in una determinata posizione non consona. Le caratteristiche della funzione sopra menzionata sono le seguenti:

- Il fattore di rischio ergonomico della stazione  $k$  non diminuisce se un task  $j$  viene aggiunto:

$$F(S_k) \leq F(S_k \cup \{j\}), \forall j \in B_k \quad (18)$$

con  $B_k$  l'insieme dei task assegnabili a  $k$ ;

- Il rischio ergonomico  $F()$  è una funzione non decrescente e non lineare.

Una volta definita la funzione di rischio ergonomico è importante riuscire ad incorporarla in un modello di ottimizzazione. È possibile pensare di inserire un nuovo vincolo ai vincoli già introdotti nel modello di programmazione lineare di Patterson & Albracht nella seguente maniera (ErgoSALBP-C, con C di constraints ovvero vincolo):

$$F(S_k) \leq Erg \quad (19)$$

con  $Erg$  che rappresenta il coefficiente di massimo livello accettabile di rischio per una stazione. Il vincolo (19) però può risultare economicamente inefficiente: una soluzione ottima per ErgoSALBP-C potrebbe richiedere una stazione addizionale a causa del restrittivo limite ergonomico  $Erg$  imposto, che significherebbe un sostanziale aumento dei costi fissi e variabili per la linea. Si è pensato quindi ad una soluzione alternativa ovvero inserire il rischio ergonomico direttamente nella funzione obiettivo. Si è presa in considerazione una funzione multi-obiettivo nella quale si è indicato con  $K(x)$  il numero minimo di stazioni richieste per il bilanciamento  $x$  calcolato con il metodo di Patterson & Albracht, con  $\xi(F(S_k) / \forall k)$

che rappresenta la funzione del rischio ergonomico dipendente strettamente dal carico della stazione e con  $\omega$  un coefficiente positivo:

$$\min K'(x) = K(x) + \omega * \xi(F(S_k) | k \in \{1 \dots, K(x)\}) \quad (20)$$

i cui vincoli sono (10), (11) e (12).

Ci sono diversi tipi di ErgoSALBP a seconda del modo di aggregare il rischio ergonomico nelle varie stazioni:

- ErgoSALBP-A (con A che sta per “average” ovvero “medio”) → se la rotazione dei lavoratori nelle varie stazioni è regolare allora è utile pensare di minimizzare il rischio ergonomico medio:

$$\xi = \frac{1}{K(x)} * \sum_{k=1}^{K(x)} F(S_k) \quad (21);$$

- ErgoSALBP-S (con S che sta per “smoothing” ovvero “livellamento”) → se la rotazione non è possibile o se avviene saltuariamente, è raccomandato distribuire il rischio tra le stazioni in modo da distribuire il carico fisico tra i lavoratori in modo tale da portare le stazioni al più basso livello possibile di carico:

$$\xi = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{K(x)} (\max\{F(S_k) - Erg; 0\})^2}{K(x)}} \quad (22);$$

- ErgoSALBP-N (N sta per “numbers” ovvero “numeri”) → in produzione è spesso utilizzato un sistema di luci che richiama il metodo di funzionamento

di un semaforo. Il numero delle stazioni con un possibile (“giallo”) e con un significativo (“rosso”) livello di rischio ergonomico è visto come un parametro da minimizzare. Il livello che designa il passaggio tra “verde” e “giallo” e tra “giallo” e “rosso” viene definito come  $Erg_{verde}$  e  $Erg_{giallo}$ . Le seguenti variabili definiscono se una stazione  $k$  è “gialla” o “rossa”:

$$y_k = \begin{cases} 1, & Erg_{verde} < F(S_k) \leq Erg_{giallo} \\ 0, & altrimenti \end{cases} \quad (23)$$

$$r_k = \begin{cases} 1, & Erg_{giallo} < F(S_k) \\ 0, & altrimenti \end{cases} \quad (24)$$

la funzione viene quindi definita nella seguente maniera con  $\omega_{giallo} \ll \omega_{rosso}$  :

$$\xi = \omega_{giallo} * \sum_k y_k + \omega_{rosso} * \sum_k r_k \quad (25).$$

Definita quindi la funzione obiettivo è importante cercare di trovare una soluzione. Otto e Scholl (2011) hanno definito un euristico in due passaggi: prima di tutto si utilizza Patterson & Albracht per trovare  $K_{iniziale}$  in seguito si utilizza invece la metodologia che prende il nome di Simulated Annealing (SA) la cui traduzione è “Ricottura Simulata” che consiste in un modello euristico che prende il nome dal processo fisico di ricottura dei materiali che consiste nei seguenti passaggi:

- Procedura di generazione di soluzioni da testare;
- Definizione di una funzione energetica;
- Definizione della probabilità di rifiuto della soluzione campione;
- Definire una dinamica della temperatura;
- Definire un semplice algoritmo di ricerca locale;

- Aggiornare la soluzione migliore;
- Aumentare eventualmente il numero delle stazioni.

Per una trattazione più approfondita con un caso studio dimostrativo si faccia riferimento a *Incorporating ergonomic risk into assembly line balancing* di Otto e School (2011).

## 2. Accumulated Risk of Postures di Cheshmehgaz, Haron, Kazemipour e Desa (2011)

La prima cosa fondamentale del metodo è stimare il livello di rischio (RL, risk level) associato alle varie aree del corpo di un lavoratore al quale vengono assegnati determinati task. Il valore in questione sicuramente sarà elevato se vi è una scarsa propensione al cambiamento tra posizioni ad elevato rischio e tra posizioni a rischio contenuto. Il livello di rischio viene stimato in base ad una valutazione fatta attraverso la metodologia OWAS.

Il valore ARP, ovvero il rischio accumulato di una posizione, che dipende dal RL, viene associato ad una stazione di lavoro e rappresenta la somma del livello di rischio associato ad ogni task assegnato a quella determinata stazione. L'obiettivo principale è quindi quello di minimizzare questo valore in modo tale da prevenire il rischio dell'insorgere di problemi muscolo-scheletrici nei lavoratori.

Prima di definire matematicamente l'indice è importante fare alcune premesse: sia  $T_j$  un insieme di task assegnati alla stazione di lavoro  $j$ ,  $RL_j(l)$  il livello di rischio del task  $l$  nell'area del corpo  $i$ ,  $NW$  il numero di stazioni considerate nel problema di ottimizzazione e  $m$  il numero delle aree del corpo considerate. La formulazione di  $ARP_j^i$ , correlata alla stazione  $j$  e all'area del corpo  $i$ , è la seguente:

$$ARP_j^i = \sum_{(l,l' \in T_j) e (l < l')} \left[ \left( \frac{RL_i(l) + RL_i(l')}{2} \right) * \min(RL_i(l); RL_i(l')) \right] \quad (26)$$

con  $\left(\frac{RL_i(l) + RL_i(l')}{2}\right)$  che rappresenta il valore medio di rischio dell'area  $i$  di due task diversi e con  $l$  e  $l'$  che rappresentano due task assegnati alla stazione  $j$ . Il valore medio viene intensificato poi dal termine  $\min(RL_i(l); RL_i(l'))$ .

Definito a questo punto il termine (26) è possibile inserire la funzione tra le espressioni di ottimizzazione di Patterson & Albracht in modo da poter risolvere il problema tenendo presente anche la minimizzazione di questo indice.

La risoluzione del problema viene fatta attraverso un algoritmo genetico e quindi non semplice a livello computazionale.

Per ulteriori spiegazioni si faccia riferimento all'articolo *Accumulated risk of body posture in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm* di Cheshmehgaz, Haron, Kazemipour e Desa (2011).

### 3. *Single-objective approach based on Rest Allowance di Battini, Delorme, Dolgui e Sgarbossa (2014)*

Questa implementazione è stata studiata per permettere di svolgere una valutazione semplice e veloce. Il metodo si basa sulla formula introdotta da Rohmert (1973) e può essere utilizzato per risolvere problemi semplici in cui si deve tener conto del tempo associato ad ogni task e al tempo di riposo necessario ad ogni operatore in ogni tempo ciclo.

La procedura consta di 4 passaggi principali:

- Calcolare il tempo di lavoro medio di ogni task,  $t_j$ , utilizzando i metodi conosciuti;
- Calcolare il dispendio energetico,  $e_j$ , che deve essere assegnato usando la formula di Garg *et al* (1978) precedentemente illustrata nel capitolo 1.4;
- Trasformare il tasso di dispendio energetico associato ad ogni task in tempo di riposo usando la formula di Rohmert (1973), sotto indicata (27);
- Minimizzare la funzione a singolo obiettivo espressa in tempo e definire la soluzione ottima per il bilanciamento.

Ogni operatore  $k$  ha il seguente indice di tasso di dispendio energetico :

$$\dot{E}_k = \frac{\sum_{j \in B_k} x_{jk} * e_j}{\sum_{j \in B_k} x_{jk} * t_j} \quad (27)$$

con  $x_{jk}$  precedentemente definita dall'espressione (13) e con  $B_k$  definito come l'insieme di task possibili assegnabili alla stazione  $k$ .

Il tempo di riposo invece può essere calcolato usando la formula di Rohmert (1973) come:

$$RA_k = 1,9 * (T_k^{0,145}) * \left[ \left( \frac{\dot{E}_k}{\dot{E}_{std}} - 1 \right)^{1,4} \right] \quad (28)$$

se  $\dot{E}_k \geq \dot{E}_{std}$  ; 0 altrimenti.

L'equazione (28) richiede che tutte le funzioni di tempo siano espresse in minuti mentre i termini energetici in Kcal. Il valore  $\dot{E}_{std}$  è assunto pari a 2,7 Kcal/min che è un valore del tutto ragionevole e accettabile se si pensa che 2 Kcal/min corrispondono ad una normale attività nel stare in piedi (Garg et al., 1978). Il valore  $T_k$  rappresenta la somma dei tempi associati alla stazione  $k$  con il valore che non supera mai il valore di tempo ciclo massimo definito dal problema. In base a quanto detto poi, il tempo totale di lavoro di ogni operatore per ciclo considerando anche il tempo di riposo, è definito come  $\widehat{T}_k$  la cui formulazione è la seguente:

$$\widehat{T}_k = T_k (1 + RA_k) \quad (29).$$

Il problema avrà come funzione obiettivo la minimizzazione dell'indice di livellamento del carico di lavoro:

$$\min(SX - \widehat{T}_k) = \min \sqrt{\sum_{k=1}^N (\widehat{c}_r - \widehat{T}_k)^2} \quad (30)$$

Con:

$$\widehat{c}_r = \max\{\sum_{j \in B_k} \widehat{T}_k \mid k = 1 \dots m\} \quad (31)$$

$$\sum_{j \in B_k} \widehat{T}_k \leq Tc \quad (32)$$

e con (10) e (11) vincoli di Patterson & Albracht.

Per maggiori chiarimenti è possibile consultare l'articolo *Assembly line balancing with ergonomics paradigms: two alternative method* di Battini, Delorme, Dolgui e Sgarbossa (2014).

Gli approcci finora presentati sono stati pensati per una linea di assemblaggio single model ma nulla esclude il fatto di poterli utilizzare anche per una linea mixed-model. I primi due metodi sicuramente sono parecchio onerosi dal punto di vista dei calcoli, il terzo meno anche se è espressamente utilizzato per problemi di “piccola taglia”.

L'obiettivo del trattato sarà quello di fornire un metodo generale e di ridurre la difficoltà computazionale che riesca ad ottimizzare la linea considerando anche il fattore ergonomico ed energetico.

## 3 APPROCCI MULTI-OBIETTIVO

---

### 3.1 MODELLO DI PROGRAMMAZIONE LINEARE PER UN CASO MIXED MODEL

---

L'obiettivo di questo capitolo è quello di presentare un modello di programmazione lineare utile per risolvere problemi di bilanciamento delle linee di assemblaggio in cui si assemblino prodotti in mix (mixed-model) con una domanda data per ogni modello. Si prenderà spunto da un modello valutato per risolvere problemi di tipo single-model (Battini, Delorme, Dolgui, Persona e Sgarbossa 2014) e, come in questo modello, la funzione obiettivo cercherà di ottimizzare le linea di assemblaggio sia da un punto di vista di tempo, sia da un punto di vista ergonomico-energetico.

I dati di partenza sono i seguenti:

- un insieme di task  $V=(1, \dots, n)$ ;
- un insieme di modelli  $M=(1, \dots, M)$ ;
- la domanda per ogni modello  $d_{Mm}$  con  $m \in M$ ;
- il diagramma delle precedenze;
- il tempo relativo ad ogni task per ogni modello,  $t_{j,Mm}$  con  $j \in V$  e con  $m \in M$ ;
- l'energia relativa ad ogni task per ogni modello,  $e_{j,Mm}$  con  $j \in V$  e con  $m \in M$ ;
- il tempo ciclo massimo accettabile,  $T_c$ ;
- il limite energetico accettabile (solitamente fissato a 2,7 Kcal/min);
- un insieme di stazioni  $W=(1, \dots, K)$ .

È necessario richiamare poi la variabile di assegnazione  $x_{jk}$  con  $k \in W$  e con  $j \in V$ :

$$x_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{se il task } j \text{ è assegnato alla stazione } k \\ 0, & \text{se il task } j \text{ non è assegnato alla stazione } k \end{cases} \quad (13)$$

Una delle prime cose da fare è trovare il Virtual Average Model abbreviato come VAM; questo modello virtuale è ricavato dai dati dei singoli modelli. I tempi caratteristici di ogni task del VAM sono rappresentati dal simbolo  $t_j'$  (ricavato dalla

formula (33)) mentre i valori energetici per ogni task sono definiti come  $e_j'$  (ricavato dalla formula (34)):

$$t_j' = \frac{\sum_{m=1}^M t_{j,Mm} * d_{Mm}}{\sum_{m=1}^M d_{Mm}} \quad (33)$$

calcolato per ogni  $j \in V$  ;

$$e_j' = \frac{\sum_{m=1}^M e_{j,Mm} * d_{Mm}}{\sum_{m=1}^M d_{Mm}} \quad (34)$$

calcolato per ogni  $j \in V$  .

Una volta ottenuti questi dati si può calcolare  $SI_j'$  ovvero l'intervallo di stazioni a cui ogni task  $j$  può essere assegnato. Per trovare questo intervallo è importante definire i seguenti due indici ricavati dall'algoritmo di Patterson & Albracht (Scholl 1990):

- $E_j'$  = earliest station index del task  $j$  del modello VAM, esso rappresenta la prima stazione a cui può essere assegnato il task  $j$ . La formulazione di questo indice è la seguente:

$$E_j' = \left\lceil \frac{t_j' + \sum_{j \in PR_j'} t_j'}{T_c} \right\rceil \quad (35)$$

con  $PR_j'$  che coincide con il sottoinsieme di task che precedono il task  $j$ ;

- $L_j'$  = latest station index del task  $j$  del modello VAM, esso rappresenta l'ultima stazione a cui può essere assegnato il task  $j$ . La formulazione di questo indice è la seguente:

$$L_j' = k + 1 - \left\lfloor \frac{t_j' + \sum_{j \in SJ_j'} t_j'}{T_c} \right\rfloor \quad (36)$$

con  $S_j'$  che coincide con il sottoinsieme di task che seguono il task  $j$ .

A questo punto :

$$SI_j' = [E_j'; L_j'] \quad (37).$$

Una volta ultimati questi passaggi è fondamentale impostare i vincoli:

- **VINCOLO DI MONO-ASSEGNABILITÀ:** questo vincolo deve essere verificato per ogni task  $j \in V$ ; si basa sul principio che ogni task può essere assegnato ad una ed una sola stazione  $k$ , con  $k$  che varia da  $E_j'$  a  $L_j'$

$$\sum_{k=E_j'}^{L_j'} X_{jk} = 1 \quad (38)$$

- **VINCOLO SUL TEMPO CICLO:** questo vincolo deve essere verificato per ogni stazione  $k \in W$ ; si basa sul principio che la somma dei tempi dei task assegnati alla stazione  $k$  non deve superare il massimo tempo ciclo  $T_c$  dato come riferimento

$$\sum_{j \in B_k'} t_j' * X_{jk} \leq T_c \quad (39)$$

con  $B_k'$  che rappresenta l'insieme di tutti i task  $j$  i quali possono essere assegnati alla stazione  $k$ ;

- **VINCOLO DI PRECEDENZA TECNOLOGICA:** questo vincolo deve essere verificato per ogni coppia di task  $(h,j)$  in cui  $j$  è il successore immediato di  $h$ ; si basa sul principio che il task  $j$  non può essere assegnato ad una stazione che precede quella a cui si è assegnato il task  $h$

$$\sum_{k=E_h}^{L_h} k * X_{hk} \leq \sum_{i=E_j}^{L_j} i * X_{ji} \quad (40)$$

con  $L_h \geq E_j$  e con  $E_h \geq L_j$ .

Gli stessi vincoli valgono anche dal punto di vista energetico.

Una volta definiti i vincoli, è importante introdurre quelle che sono le funzioni obiettivo da ottimizzare:

- FUNZIONI OBIETTIVO DEL TEMPO:

-minimizzazione del Time Smoothness Index (SX-T): uno degli obiettivi fondamentali è quello di riuscire a distribuire equamente il carico di lavoro attraverso le stazioni:

$$\min (SX - T) = \min \sqrt{\sum_{k=1}^K (c_r - \sum_{j \in B_{km}} x_{jk} * t_j')^2} \quad (41)$$

$$\text{con } c_r = \max\{\sum_{j \in B_{k'}} x_{jk} * t_j' \mid k = 1, \dots, K\} \quad (42);$$

-massimizzazione del Mini-Max Station Time (M-MST): è fondamentale poter massimizzare questo indice per poter riuscire a massimizzare la produttività:

$$\min(M - MST) = \min\{\max\{\sum_{j \in B_{k'}} x_{jk} * t_j' \mid k = 1, \dots, K\}\} = \min(c_r) \quad (43).$$

- FUNZIONI OBIETTIVO DELL'ENERGIA:

-minimizzazione dell' Energy Smoothness Index (SX-T): uno degli obiettivi fondamentali è quello di riuscire a distribuire equamente il carico fisico tra i lavoratori:

$$\min (SX - E) = \min \sqrt{\sum_{k=1}^K (e_r - \sum_{j \in B_{km}} x_{jk} * e_j')^2} \quad (44)$$

$$\text{con } e_r = \max\{\sum_{j \in B_k'} x_{jk} * e_j' \mid k = 1, \dots, K\} \quad (45);$$

-massimizzazione del Mini-Max Station Energy (M-MST): è fondamentale poter massimizzare questo indice per poter riuscire ottimizzare il livello ergonomico delle stazioni:

$$\min(M - MSE) = \min\left\{\max\{\sum_{j \in B_k'} x_{jk} * e_j' \mid k = 1, \dots, K\}\right\} = \min(e_r) \quad (46).$$

L'obiettivo principale del modello che si vorrà prendere come riferimento però è quello di riuscire ad ottimizzare contemporaneamente le funzioni obiettivo del tempo e dell'energia, le funzioni da ottimizzare sono quindi:

$$\min\{SX - T; SX - E\} = \min\left\{\sqrt{\sum_{k=1}^K (c_r - \sum_{j \in B_{km}} x_{jk} * t_j')^2}; \sqrt{\sum_{k=1}^K (e_r - \sum_{j \in B_{km}} x_{jk} * e_j')^2}\right\} \quad (47)$$

$$\min\{M - MST; M - MSE\} = \min\left\{\max\{\sum_{j \in B_k'} x_{jk} * t_j' \mid k = 1, \dots, K\}; \max\{\sum_{j \in B_k'} x_{jk} * e_j' \mid k = 1, \dots, K\}\right\} \quad (48).$$

Queste funzioni multi-obiettivo sono state formulate analogamente sia dal punto di vista del tempo che dal punto di vista ergonomico-energetico per poter confrontare contemporaneamente il sistema di task.

Quello che si vorrà ottenere è un insieme di soluzioni tra le quali quelle accettabili e desiderabili si troveranno nella frontiera efficiente di Pareto (FE).

Il fronte di Pareto è un insieme di soluzioni ottime, ovvero è un insieme costituito da tutti i punti non dominati, cioè da quei punti per i quali non esiste nessun punto che sia migliore contemporaneamente per tutti gli obiettivi considerati nella funzione di ottimizzazione. Un punto può far parte del fronte di Pareto anche se non domina nessuno, poiché l'importante è che non sia dominato da altri punti, FUGURA 3.1.

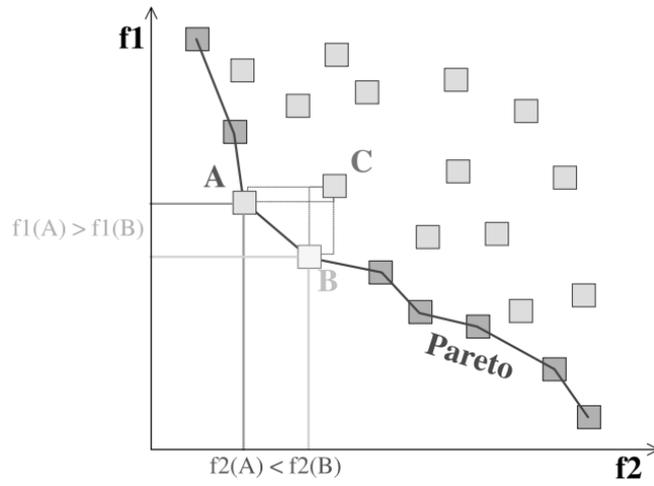


FIGURA 3.1: rappresentazione della frontiera efficiente di Pareto (FE)

### 3.2 MODELLO EURISTICO PER UN CASO MIXED MODEL

---

Nel capitolo precedente si è presentato un modello di programmazione lineare per poter risolvere problemi di tipo mixed-model, nel capitolo corrente invece si vuole proporre un modello euristico che riesca a fornire una soluzione accettabile senza dover ricorrere alla programmazione lineare che può risultare spesso un processo oneroso dal punto di vista dei calcoli.

I dati di partenza sono gli stessi del modello di programmazione lineare.

I passaggi fondamentali che si seguiranno per arrivare ad una soluzione sono i seguenti:

- Calcolare  $t_j'$  ed  $e_j'$  del VAM come è stato fatto nel modello precedente e quindi con le formule (33) e (34);
- Calcolare  $e_j''$  che rappresenta il consumo effettivo espresso in Kcal per task:

$$e_j'' = \frac{t_j' * e_j'}{60} \quad (49);$$

- Ordinare i task in maniera decrescente in base al  $t_j'$  come nell'euristico Largest Candidate Rule, LCR;
- A questo punto è fondamentale calcolare il tempo medio  $tm'$  e l'energia media  $em'$  del VAM che fungeranno da parametro di riferimento per il dimensionamento delle stazioni: i task saranno assegnati alle varie stazioni cercando di avvicinarsi il più possibile al valore medio di riferimento. La stazione si chiude quando non c'è più alcun task disponibile da assegnare per il quale ci si allontani troppo o dal limite di tempo o dal limite energetico. Ovviamente essendo un euristico, la valutazione è a discrezione di chi svolge i calcoli.

Il  $tm'$  ha la seguente formulazione:

$$tm' = \frac{\sum_{j=1}^n t_j'}{k} \quad (50).$$

Per quanto riguarda invece  $em'$ , esso è strettamente dipendente da  $tm'$  e la sua formulazione è la seguente:

$$em' = \frac{tm' * 2,7}{60} \quad (51).$$

- Impostati questi dati si procede con l'assegnazione: un task viene assegnato ad una stazione tenendo presente i vincoli di precedenza e quindi  $SI_j'$ . Quando ci sono più task disponibili si assegna quello con la durata maggiore a meno che non superi eccessivamente il limite medio di tempo o di energia. Un task viene definito disponibile se tutti i predecessori sono già stati assegnati ad una stazione.
- È possibile utilizzare la seguente tabella per procedere, TABELLA 3.1:

stazioni	task disponibili	task assegnato	work load	energy load	idle time	idle energy

TABELLA 3.1: schema utilizzato per l'assegnazione dei task alle varie stazioni per il modello euristico

È a questo punto utile spiegare gli indici di colonna della tabella sopra raffigurata:

- nella colonna "stazioni" si riporta il numero della stazione che si è preso in considerazione e che si sta dimensionando;
- nella colonna "task disponibili" si inseriscono appunto i task disponibili;
- nella colonna "work load" si evidenzia il carico della stazione in termini di tempo: ogni qualvolta che si aggiunge un task è utile sommare il work load dei task già assegnati al work load del task

appena prescelto. È importante avere questo dato per poterlo confrontare con il valore medio di riferimento  $tm'$ ;

- nella colonna “energy load” si riporta il carico della stazione in termini energetici: ogni qualvolta si aggiunge un task è utile sommare l’energy load dei task già assegnati al work load del task appena prescelto. È importante avere questo dato per poterlo confrontare con il valore medio di riferimento  $em'$ ;

- nella colonna “idle time” è utile riportare la differenza tra  $tm'$  e il work load per capire quanto la stazione può essere ulteriormente caricata in termini di tempo;

- nella colonna “idle energy” si riporta la differenza tra  $em'$  e l’energy load per capire quanto la stazione può essere ulteriormente caricata in termini energetici.

### 3.3 INDICI DI VALUTAZIONE PER GLI APPROCCI MULTI-OBIETTIVO

---

Nei capitoli precedenti si sono presentati due modelli per la risoluzione di problemi di bilanciamento delle linee di assemblaggio mixed model. Entrambi i modelli possono fornire diverse soluzioni. Per poter scegliere la soluzione migliore è opportuno definire degli indici di valutazione sia dal punto di vista del tempo che dal punto di vista energetico.

---

#### 3.3.1 INDICI DI VALUTAZIONE DAL PUNTO DI VISTA TEMPORALE

---

È opportuno come prima cosa definire alcuni parametri:

- $t_{Mm,k}$  = carico di lavoro (in secondi) di tutti i task assegnati alla stazione k del modello Mm;
- $t_{Mm,k}' = t_{Mm,k} * d_{Mm}$  (52) = carico di lavoro (in secondi) nella stazione k del modello Mm pesato in base alla domanda;
- $t_k' = \sum_m t_{Mm,k}'$  (53) = sommatoria dei carichi di lavoro (in secondi) nella stazione k di tutti i modelli pesati in base alla domanda;
- $t_k = \frac{t_k'}{K}$  (54) = carico di lavoro medio di ogni stazione k;
- $\bar{t}_c = \max \{ t_k \}$  (55) = rappresenta il tempo ciclo medio che deve essere inferiore o uguale al Tc ovvero il massimo tempo ciclo accettabile, si dice che il sistema sia a cadenza libera quindi con ausilio di buffer;
- $\bar{t}_{Mm} = \frac{\sum_k t_{Mm,k}}{k}$  (56) = rappresenta il tempo medio per ogni modello.

Si cominci con l'indice  $\phi_1$  che rappresenta l'indice di ozio totale del sistema, la cui formulazione è la seguente:

$$\phi_1 = \sum_k \sum_m \max\{0; \bar{t}_c - t_{Mm,k}\} \quad (57).$$

Maggiore è questo indice peggiore è il bilanciamento del sistema dato che maggiore è l'ozio totale, maggiore è la perdita di efficienza.

Si prosegue poi con la presentazione dell'indice  $\varphi_2$  che rappresenta il così detto sovra consumo in termini di tempo totale del sistema detto anche "work overload":

$$\varphi_2 = \sum_k \sum_m \max\{0; t_{Mm,k} - \bar{t}c\} \quad (58).$$

In questo caso se il valore è elevato è preferibile piuttosto che sia tendente a zero in quanto se fosse zero significherebbe che il sistema è sovradimensionato e pertanto l'efficienza del bilanciamento sarebbe davvero bassa.

Talvolta, anche se non nell'analisi che si condurrà a seguito, potrebbe esser utile considerare anche gli indici  $\varphi_3$  e  $\varphi_4$  che sono rispettivamente:

$$\varphi_3 = \max_{Mm,k} \{0; \bar{t}c - t_{Mm,k}\} \quad (59);$$

$$\varphi_4 = \max_{Mm,k} \{0; t_{Mm,k} - \bar{t}c\} \quad (60).$$

Questi indici rappresentano rispettivamente l'ozio massimo e il sovraccarico di lavoro massimo di un modello particolare in una determinata stazione del sistema.

Per quanto riguarda poi l'efficienza, la sua formulazione è la seguente:

$$\varphi_5 = \frac{\sum_k t_{k'}}{\bar{t}c * k} \quad (61).$$

Maggiore è l'efficienza migliore è il bilanciamento del sistema in quanto, più il numeratore si avvicina al denominatore, più si ha la possibilità di utilizzare il tempo a disposizione fino ad arrivare ad un'efficienza del 100%.

Si passi ora a descrivere gli indici di sbilanciamento in termini di tempo e quindi  $\phi_6$ ,  $\phi_6''$ ,  $\phi_7$  e  $\phi_7''$ .

Si inizi con  $\phi_6$  che rappresenta l'indice di sbilanciamento di ogni modello attraverso le stazioni:

$$\phi_6 = \sum_m \sum_k |t_{Mm,k} - \overline{t_{Mm}}| \quad (62).$$

L'indice  $\phi_6''$  non è altro che l'indice  $\phi_6$  pesato in base alla domanda  $d_{Mm}$  e pertanto la formulazione risulta essere la seguente:

$$\phi_6'' = \frac{\sum_m \sum_k |t_{Mm,k} - \overline{t_{Mm}}| * d_{Mm}}{\sum_m d_{Mm}} \quad (63).$$

Per questi due indici sono desiderabili valori contenuti poiché significherebbero un buon bilanciamento delle varie stazioni rispetto al tempo medio assegnato ad ogni modello.

Infine si presentino  $\phi_7$  e  $\phi_7''$  ovvero gli indici di sbilanciamento delle varie stazioni per ogni modello; in questo caso le formulazioni sono le seguenti:

$$\phi_7 = \sum_k \sum_m |t_{Mm,k} - t_k| \quad (64).$$

Per quanto riguarda l'indice pesato invece:

$$\phi_7'' = \frac{\sum_k \sum_m |t_{Mm,k} - t_k| * d_{Mm}}{\sum_m d_{Mm}} \quad (65)$$

Anche in questo caso sono apprezzabili valori contenuti.

---

### 3.3.2 INDICI DI VALUTAZIONE DAL PUNTO DI VISTA ENERGETICO

---

Analogamente a quanto detto per gli indici di tempo, si mostreranno in seguito gli indici energetici.

Per calcolare i seguenti indici si utilizzerà  $e_j$ ” rappresentato dall’equazione (49) nei precedenti capitoli.

Anche in questo caso, come prima cosa, è importante definire alcuni parametri:

- $e_{Mm,k}$  = carico energetico (in Kcal/task) di tutti i task assegnati alla stazione k del modello Mm;
- $e_{Mm,k}' = e_{Mm,k} * e_{Mm}$  (66) = carico energetico (in Kcal/task) nella stazione k del modello Mm pesato in base alla domanda;
- $e_k' = \sum_m e_{Mm,k}'$  (67) = sommatoria dei carichi energetici (in Kcal/task) nella stazione k di tutti i modelli pesati in base alla domanda;
- $e_k = \frac{e_k'}{K}$  (68) = carico energetico (in Kcal/task) medio di ogni stazione;
- $\bar{e}c = \frac{2,7 * \bar{t}c}{60}$  (69) = limite energetico massimo (in Kcal/task) dipendente dal tempo a cadenza libera descritto nel paragrafo precedente;
- $\overline{e_{Mm}} = \frac{\sum_k e_{Mm,k}}{k}$  (70) = rappresenta il limite energetico medio ( in Kcal/task) per ogni modello.

Gli indici che si andranno a presentare avranno una formulazione del tutto analoga agli indici di tempo, in modo tale da poterli confrontare direttamente.

Si inizi da  $\gamma_1$  ovvero l’indice che rappresenta il risparmio energetico totale la cui formulazione è la seguente:

$$\gamma_1 = \sum_k \sum_m \max\{0; \bar{e}c - e_{Mm,k}\} \quad (71).$$

Anche in questo caso sono ottimali le soluzioni che minimizzano questo indice ovvero che lo portino tendente allo zero. Minore è l'ozio energetico migliore sarà il bilanciamento del sistema.

Per quanto riguarda poi l'indice di sovra consumo energetico  $\gamma_2$ , esso ha la seguente formulazione:

$$\gamma_2 = \sum_k \sum_m \max\{0; e_{Mm,k} - \bar{e}c\} \quad (72).$$

Anche in questo caso si possono indicare con  $\gamma_3$  e  $\gamma_4$  gli indici che rappresentano i valori massimi di risparmio energetico e di sovra consumo energetico di un particolare modello in una determinata stazione del sistema. Essi hanno la seguente formulazione:

$$\gamma_3 = \max_{Mm,k} \{0; \bar{e}c - e_{Mm,k}\} \quad (73);$$

$$\gamma_4 = \max_{Mm,k} \{0; e_{Mm,k} - \bar{e}c\} \quad (74).$$

Per quanto riguarda poi l'efficienza e quindi l'indice  $\gamma_5$  si passa alla seguente formulazione:

$$\gamma_5 = \frac{\sum_k e_{k'}}{\bar{e}c * k} \quad (75).$$

Maggiore è l'efficienza energetica migliore è il bilanciamento del sistema in quanto il numeratore tende al valore del denominatore e significa che il limite energetico dato a disposizione viene sfruttato al massimo.

Considerando infine  $\gamma_6$  e  $\gamma_6''$ , gli indici di sbilanciamento attraverso le varie stazioni di ogni singolo modello si può affermare che la loro formulazione sia la seguente:

$$\gamma_6 = \sum_m \sum_k |e_{Mm,k} - \overline{e_{Mm}}| \quad (76);$$

$$\gamma_6'' = \frac{\sum_m \sum_k |e_{Mm,k} - \overline{e_{Mm}}| * d_{Mm}}{\sum_m d_{Mm}} \quad (77).$$

Anche in questo caso come nel caso degli indici temporali, sono desiderabili valori contenuti in quanto il valore basso giustificerebbe un buon bilanciamento delle varie stazioni rispetto al limite massimo energetico medio assegnato ad ogni modello.

Per quanto riguarda poi  $\gamma_7$  e  $\gamma_7''$ , gli indici di sbilanciamento delle varie stazioni attraverso i vari modelli, la loro formulazione è la seguente:

$$\gamma_7 = \sum_k \sum_m |e_{Mm,k} - e_k| \quad (78);$$

$$\gamma_7'' = \frac{\sum_k \sum_m |e_{Mm,k} - e_k| * d_{Mm}}{\sum_m d_{Mm}} \quad (79).$$

Anche in questo caso, come per gli altri indici di sbilanciamento, è apprezzabile un valore contenuto dello sbilanciamento.



## 4 CASO STUDIO

### 4.1 PRESENTAZIONE CASO NUMERICO

È opportuno a questo punto presentare un caso numerico per poter dimostrare la validità del modello di programmazione lineare e del modello euristico precedentemente introdotti. Si è considerato il caso studio dell'articolo *Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure: a multi-objective model* di Battini, Delorme, Dolgui e Sgarbossa (2015) e lo si è adattato ad un caso mixed model considerando come modelli di prodotto M1, M2, M3 e M4. Si ipotizzi di dover assemblare questi quattro prodotti (anche se non del tutto identici) con un ciclo produttivo simile, in cui i tempi dei vari task variano per ogni modello. Le stazioni che si hanno a disposizione sono 4, il massimo tempo ciclo che si considera è di 180 s, il numero totale di task è 17 e per ognuno di essi, in TABELLA 4.1, è rappresentato il relativo dato di tempo in secondi ( $t_{j,Mx}$ ) e il relativo consumo energetico espresso in kcal al minuto ( $e_{j,Mx}$ ). La domanda per ogni modello è un dato di partenza ( $d_{Mx}$ ) ed è anch'essa rappresentata in tabella. In TABELLA 4.1 sono anche rappresentati i tempi ( $t_j'$ ) e le energie ( $e_j'$ ) medie pesate che costituiranno il VAM (virtual average model).

Task	tM1	tM2	tM3	tM4	$t_j'$ [s]
A	26	24	22	25	<b>24</b>
B	43	43	49	46	<b>46</b>
C	12	12	14	13	<b>13</b>
D	8	11	0	10	<b>7</b>
E	22	23	26	26	<b>25</b>
F	13	17	17	13	<b>15</b>
G	0	4	6	6	<b>5</b>
H	36	38	36	40	<b>38</b>
I	9	13	13	9	<b>11</b>
J	80	79	82	79	<b>80</b>
K	84	87	88	82	<b>85</b>
L	29	0	31	32	<b>25</b>
M	60	61	58	61	<b>60</b>
N	66	63	62	68	<b>65</b>
O	44	44	42	48	<b>45</b>
P	39	41	43	0	<b>25</b>
Q	14	13	16	18	<b>16</b>
dm	1	2	3	4	
dtot	<b>10</b>				

Task	eM1	eM2	eM3	eM4	$e_j'$ [kcal]
A	0,93	0,92	0,95	0,97	<b>0,95</b>
B	2,71	2,7	2,69	2,68	<b>2,69</b>
C	0,91	0,93	0,89	0,89	<b>0,90</b>
D	0,18	0,29	0	0,25	<b>0,18</b>
E	1,19	1,19	1,2	1,17	<b>1,19</b>
F	0,88	0,86	0,89	0,89	<b>0,88</b>
G	0	0,15	0,16	0,17	<b>0,15</b>
H	1,25	1,24	1,23	1,22	<b>1,23</b>
I	0,99	0,96	0,97	0,95	<b>0,96</b>
J	4,55	4,56	4,57	4,56	<b>4,56</b>
K	5,02	5,04	5,1	5,07	<b>5,07</b>
L	1	0	1,4	1,2	<b>1,00</b>
M	1,04	1,1	1,09	1,07	<b>1,08</b>
N	1,18	1,19	1,15	1,17	<b>1,17</b>
O	0,94	0,95	0,89	0,93	<b>0,92</b>
P	0,79	0,83	0,84	0	<b>0,50</b>
Q	0,64	0,65	0,63	0,61	<b>0,63</b>
dm	1	2	3	4	
dtot	<b>10</b>				

TABELLA 4.1: rappresentazione dei tempi ( $t_{mx}$ ) e delle energie ( $e_{mx}$ ) di ogni singolo modello e del tempo ( $t_j'$ ) e dell'energia ( $e_j'$ ) relativi al VAM

Nelle figure sottostanti, vengono rappresentati i grafici delle precedenze di ogni singolo modello e del VAM. Si consideri come limite energetico accettabile 2,7 Kcal/min.

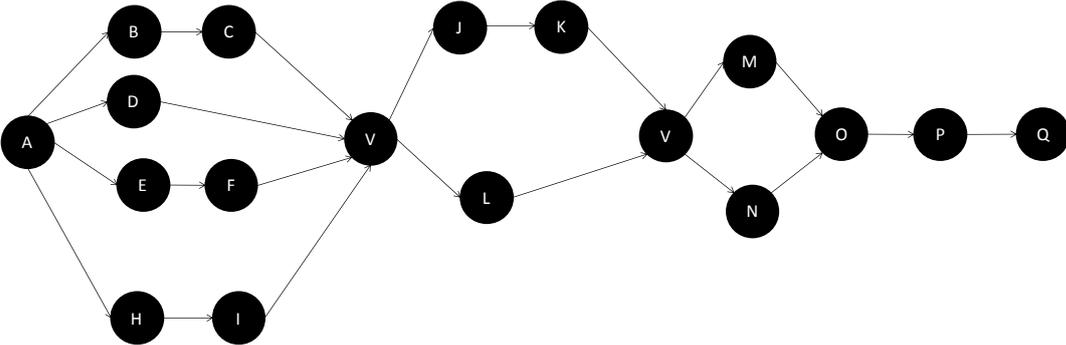


FIGURA 4.1: rappresentazione del modello M1 (manca il task G poiché ha tempo nullo in tabella)

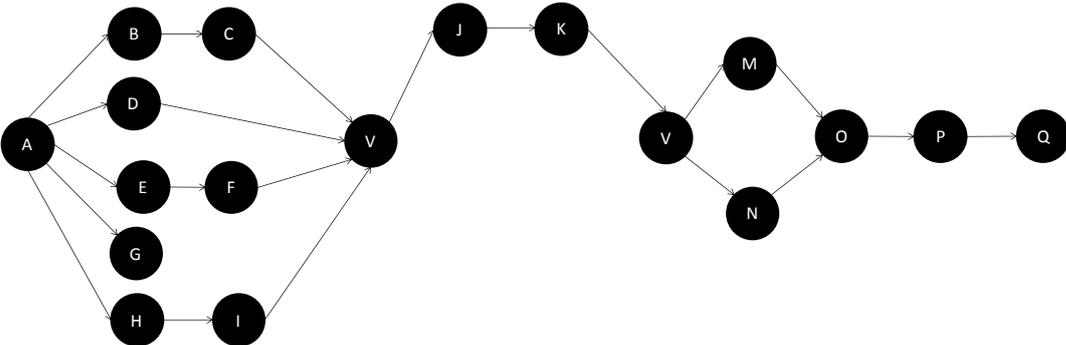


FIGURA 4.2: rappresentazione del modello M2 (manca il task L poiché ha tempo nullo in tabella)

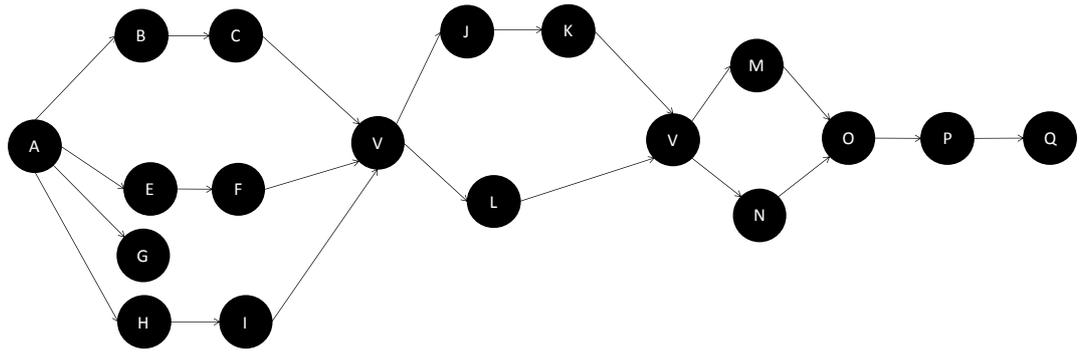


FIGURA 4.3: rappresentazione del modello M3 (manca il task D poiché ha tempo nullo in tabella)

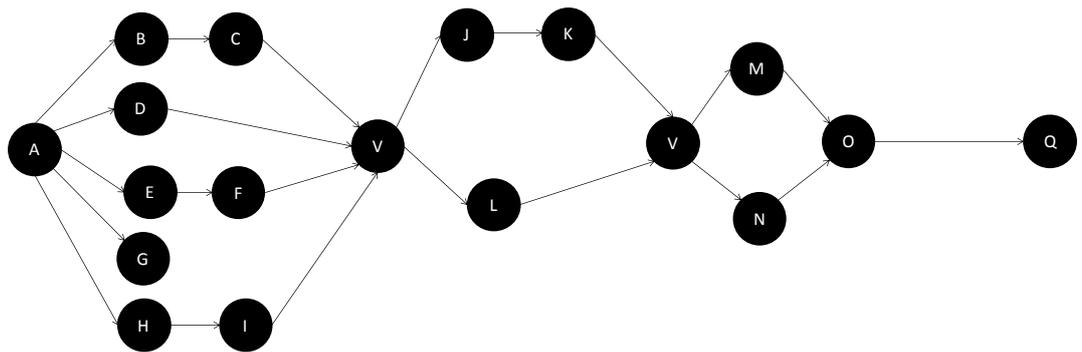


FIGURA 4.4 : rappresentazione del modello M4 (manca il task P poiché ha tempo nullo in tabella)

È importante fin dall'inizio ricavare gli indici  $E_j$ ' ed  $L_j$ ' che, come già anticipato nel capitolo 2.1, permettono di ricavare l'intervallo  $SI_j$ ' che rappresenta appunto le stazioni al quale il task  $j$  può appartenere. In TABELLA 4.2 si trovano i risultati:

Task	$t_j$ [s]	$E_j'$	$L_j'$
A	24	1	1
B	46	1	2
C	13	1	2
D	7	1	2
E	25	1	2
F	15	1	2
G	5	1	2
H	38	1	2
I	11	1	2
J	80	2	2
K	85	2	3
L	25	2	3
M	60	3	4
N	65	3	4
O	45	4	4
P	25	4	4
Q	16	4	4

TABELLA 4.2: RAPPRESENTAZIONE DI  $E_j'$  E  $L_j'$

Definiti i dati iniziali si può procedere con l'analisi del caso che verrà fatta tramite il modello di programmazione lineare e successivamente si passerà in rassegna al metodo euristico.

## 4.2 ANALISI CON IL MODELLO DI PROGRAMMAZIONE LINEARE

Si è partiti calcolando tutte le possibili combinazioni di assegnazione considerando  $SI_j'$ , si è proceduto eliminando i casi in cui non vi era rispetto del vincolo di precedenza ed infine si sono eliminati gli scenari in cui non vi era rispetto del vincolo di tempo impostato a 180 s. In base alla selezione fatta ci si è trovati di fronte a 312 scenari accettabili. Per ognuno di questi scenari si sono calcolati diversi indici e parametri già precedentemente menzionati: M-MST, M-MSE, SX-T, SX-E. Si sono anche calcolati i vari indici di tempo ( $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_6'', \varphi_7$  e  $\varphi_7''$ ) e quelli relativi al fattore ergonomico-energetico ( $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6, \gamma_6'', \gamma_7$  e  $\gamma_7''$ ). È interessante a questo punto analizzare i grafici ottenuti.

Come prima cosa si è rappresentato in FIGURA 4.5 il valore M-MST (in ordinata) e M-MSE (in ascissa); si sono evidenziati rispettivamente in azzurro e in verde i valori ottimali per i due indici; questi punti definiscono la frontiera efficiente (FE) di Pareto (in giallo) che ottimizza le due formule (43) e (46) precedentemente rappresentate. La FE è quindi un insieme di punti che spaziano da soluzioni che ottimizzano il tempo, a soluzioni che ottimizzano il valore energetico. Si vede come scegliendo l'ottimo per M-MST e quindi ottimizzando il tempo massimo medio di ciclo, si penalizzi l'energia e viceversa. Una scelta potrebbe essere quella di cercare una soluzione trade-off come quella cerchiata in rosso in figura.

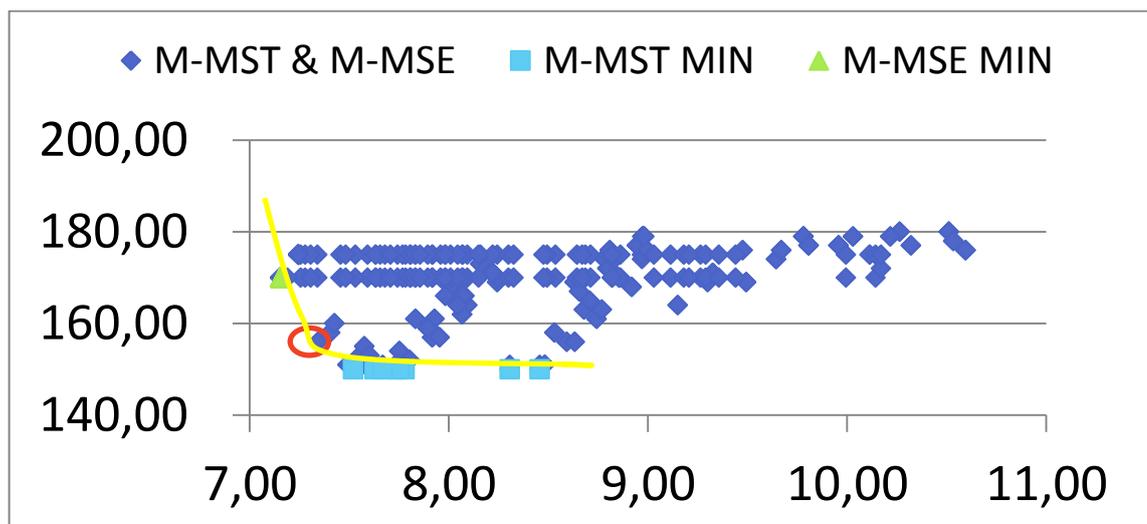


FIGURA 4.5 : rappresentazione degli indici M-MST e M-MSE e della frontiera efficiente di Pareto

Discorso analogo per gli indici di livellamento SX-T (in ordinata) e SX-E (in ascissa) rappresentati sotto in FIGURA 4.6 in cui l'ottimizzazione dell'indice di livellamento del tempo porta ad una non ottimizzazione del bilanciamento energetico. Anche in questo caso come prima si cerchia in figura una soluzione trade-off ovvero che sia un compromesso tra i due valori, questo valore è sicuramente sulla frontiera efficiente di Pareto (in giallo).

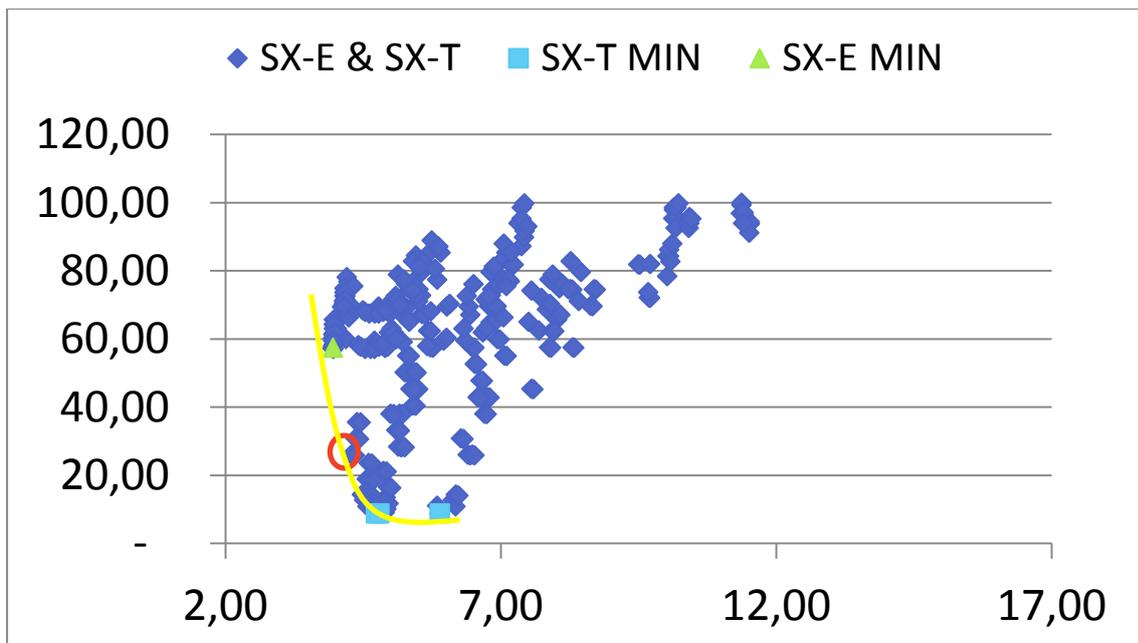


FIGURA 4.6: rappresentazione degli indici SX-T e SX-E e della frontiera efficiente di pareto

A questo punto è interessante valutare: gli indici di tempo in correlazione al tempo ciclo, gli indici energetici con il limite energetico massimo e gli stessi indici energetici e di tempo, in correlazione tra di loro.

### 1) INDICI TEMPORALI E TEMPO CICLO

Si inizi considerando la FIGURA 4.7, in cui in ascissa si trova il tempo ciclo mentre in ordinata l'indice di risparmio di tempo ovvero l'ozio totale  $\phi_1$ ; si può facilmente riconoscere una proporzionalità diretta tra i due parametri presi in considerazione: all'aumentare del tempo ciclo, a parità di durata dei vari task, è normale che l'ozio aumenti.

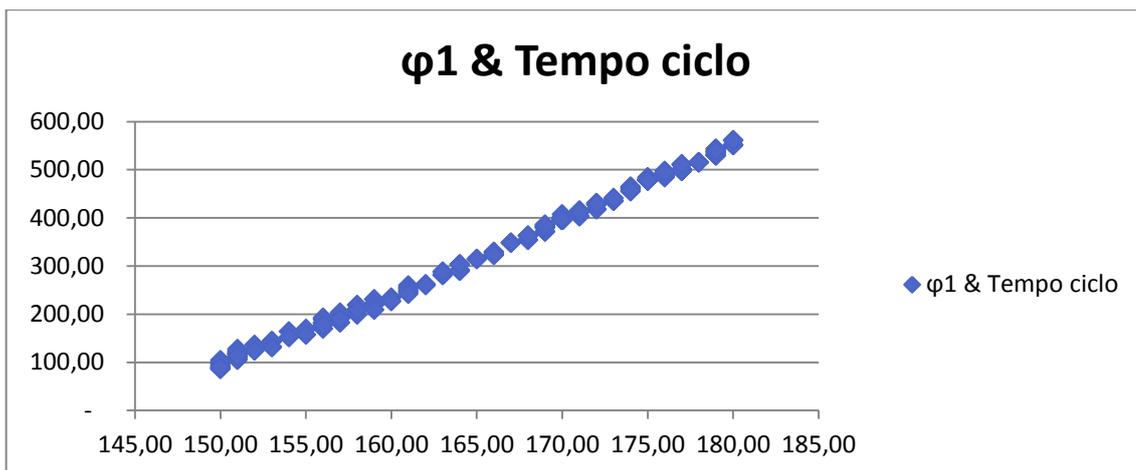


FIGURA 4.7 : rappresentazione del tempo ciclo e di  $\phi_1$

Procedendo poi con la FIGURA 4.8, si è deciso di mettere a confronto, in ascissa, il tempo ciclo e, in ordinata, l'indice  $\phi_2$  che rappresenta il tempo totale di superamento del tempo ciclo dato; anche in questo grafico è possibile vedere una proporzionalità tra i due elementi, in questo caso però è inversa in quanto all'aumentare del tempo ciclo è più difficile incorrere in un superamento del tempo dato e pertanto di conseguenza  $\phi_2$  diminuisce.

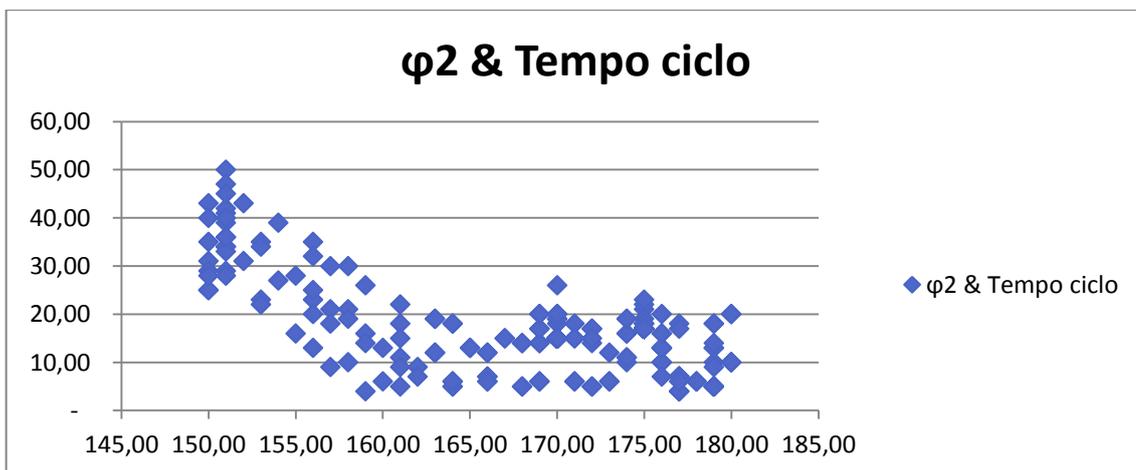


FIGURA 4.8: rappresentazione del tempo ciclo e di  $\phi_2$

Per quanto riguarda poi l'indice di efficienza  $\phi_5$  in ordinata nella FIGURA 4.9 si può dire che, all'aumentare del tempo ciclo, l'efficienza diminuisce in quanto non si

riesce a saturare la stazione in modo ottimale: maggiore è il tempo ciclo maggiore è anche l'ozio.

L'andamento del grafico poi trova giustificazione anche nella formulazione dello stesso indice, si veda formula (61): il denominatore aumenta, in numeratore rimane costante quindi inevitabilmente l'indice diminuisce.

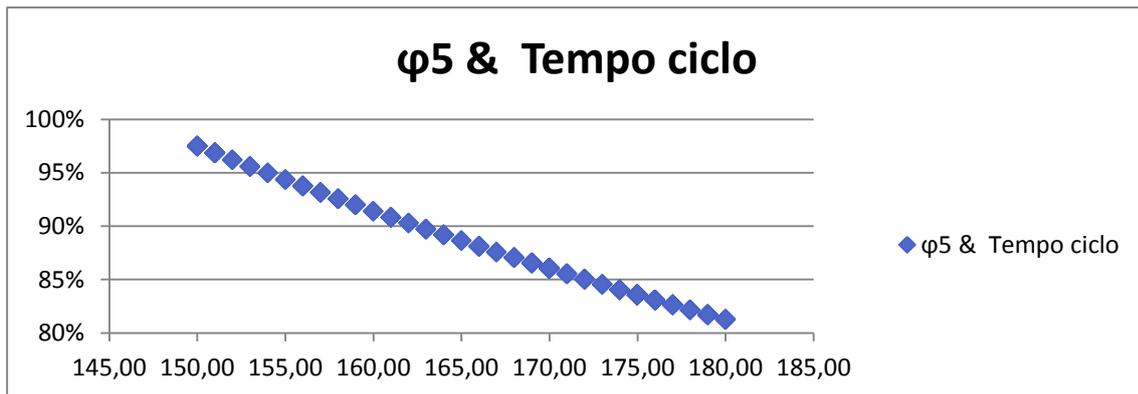


FIGURA 4.9: rappresentazione del tempo ciclo e di  $\phi_5$

Considerando poi contemporaneamente la FIGURA 4.10 e la FIGURA 4.11, in quanto analoghe, si vede come all'aumentare del tempo ciclo (in ascissa) aumentino sia  $\phi_6$  che  $\phi_6''$  (in ordinata) che rappresentano gli indici di sbilanciamento delle stazioni per modello, come anticipato in precedenza. Questo andamento è dovuto al fatto che aumentando il tempo ciclo inevitabilmente si ha un maggior sbilanciamento dovuto ad un maggior ozio.

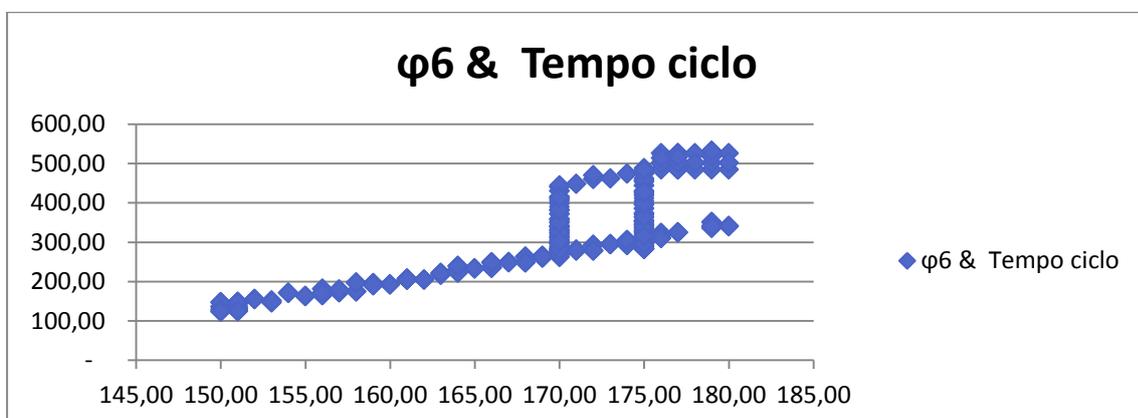


FIGURA 4.10 : rappresentazione del tempo ciclo e di  $\phi_6$

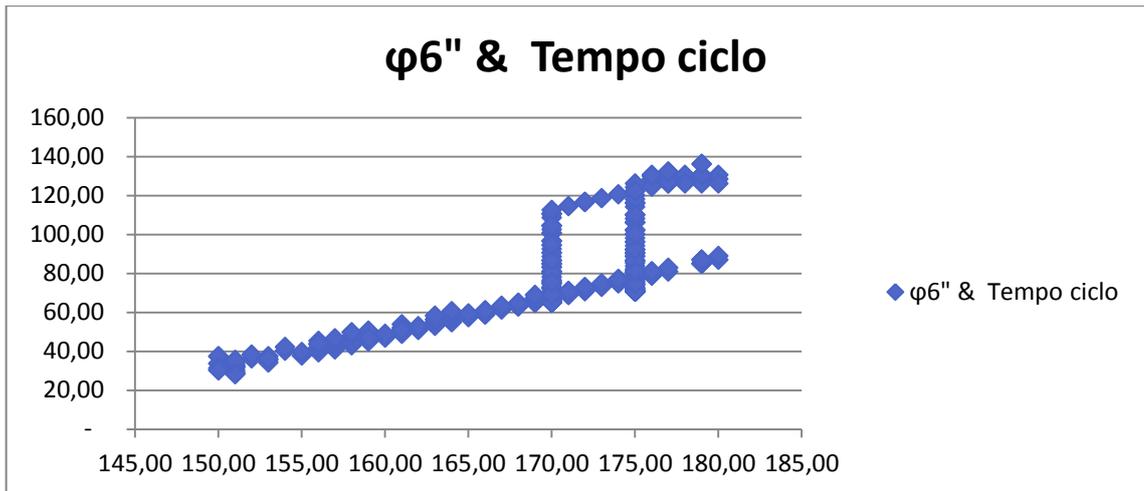


FIGURA 4.11: rappresentazione del tempo ciclo e di  $\phi 6''$

Infine nella FIGURA 4.12 e FIGURA 4.13 si vede come, anche se in maniera meno marcata rispetto al caso sopra, all'aumentare del tempo ciclo (in ascissa) aumenti anche lo sbilanciamento all'interno delle varie stazioni per i vari modelli, ovvero aumentino gli indici  $\phi 7$  e  $\phi 7''$  (in ordinata).

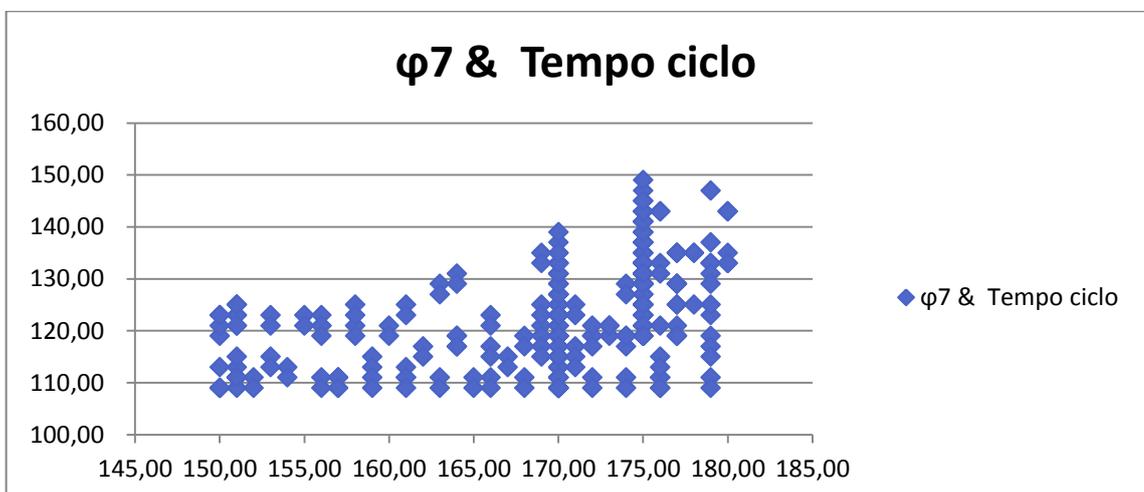


FIGURA 4.12: rappresentazione del tempo ciclo e di  $\phi 7$

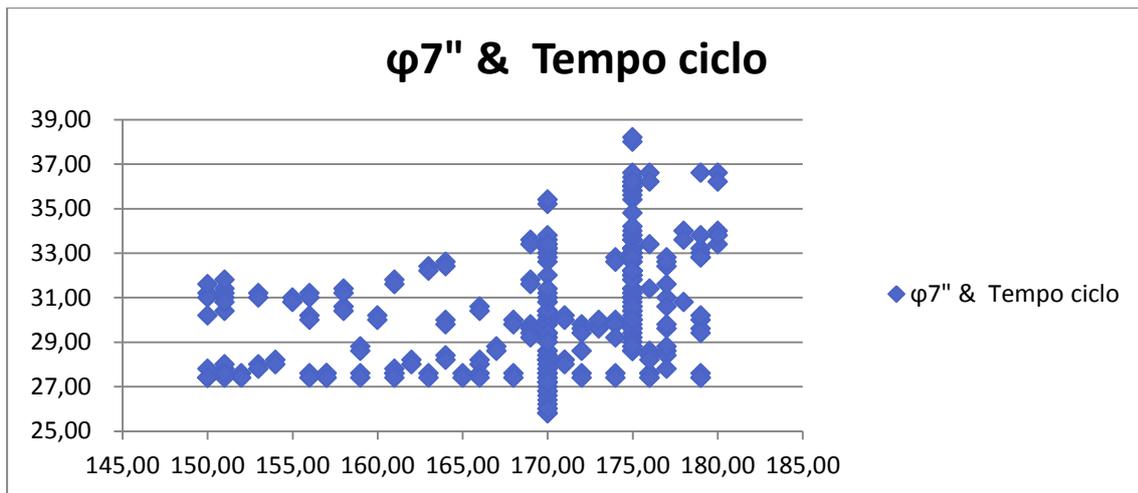


FIGURA 4.13 : rappresentazione del tempo ciclo e di  $\phi 7''$

Se si dovesse scegliere una soluzione ottimale in base agli indici appena presentati inevitabilmente si sceglierebbe uno scenario in cui:  $\phi 1$  sia contenuto,  $\phi 2$  sia elevato,  $\phi 5$  sia elevato,  $\phi 6$  e  $\phi 6''$  siano contenuti e  $\phi 7$  e  $\phi 7''$  siano contenuti. Si deve quindi ricercare uno scenario con tempo ciclo ridotto.

## 2) INDICI ENERGETICI E LIMITE ENERGETICO

La premessa che è importante fare è quella che il limite energetico è direttamente dipendente dal tempo ciclo nel seguente modo:

$$\text{limite energetico} = \frac{\text{tempo ciclo} * 2,7 \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{min}} \right]}{60 \left[ \frac{\text{s}}{\text{min}} \right]} \quad (80).$$

È importante fare questa premessa per capire come i vari indici energetici abbiano un andamento simile agli indici temporali rappresentati nelle pagine precedenti.

Partendo con la FIGURA 4.14 si può vedere come all'aumentare del limite energetico (in ascissa in figura) vi sia un aumento dell'indice  $\gamma_1$ , in ordinata, che rappresenta il risparmio energetico. Tutto questo è dovuto al fatto che, essendo le energie associate ai vari task costanti, all'aumentare dell'energia disponibile vi è un rischio maggiore di incorrere in risparmio energetico; la proporzionalità che è possibile constatare è diretta.

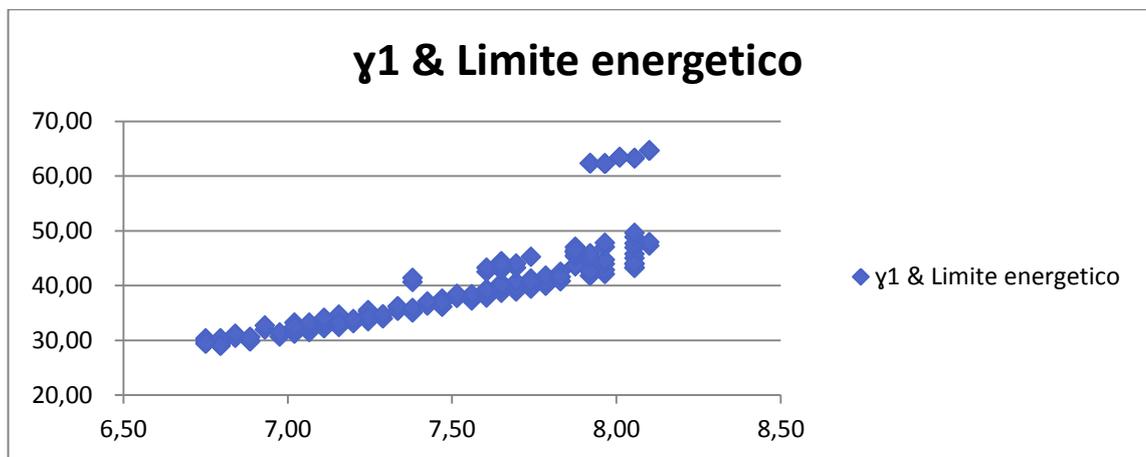


FIGURA 4.14: rappresentazione del limite energetico e di  $\gamma_1$

In FIGURA 4.15 poi, in cui in ascissa si trova il limite energetico mentre in ordinata  $\gamma_2$ , si vede come all'aumentare del limite energetico diminuisce proporzionalmente l'indice di sovra consumo; questo grafico e il precedente, si contrappongono alle FIGURA 4.7 e FIGURA 4.8 degli indici del tempo.

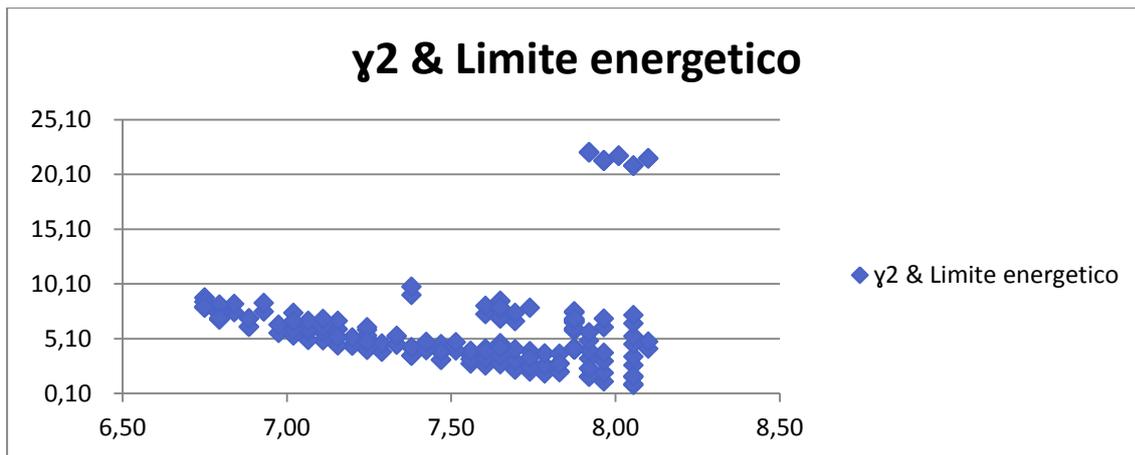


Figura 4.15: rappresentazione del limite energetico e di  $\gamma_2$

Per quanto riguarda poi l'indice di efficienza energetico  $\gamma_5$ , in ordinata della FIGURA 4.16, si vede come all'aumentare del limite energetico diminuisca l'efficienza in quanto non si riesce ad ottimizzare la stessa stazione. Facendo riferimento alla formula (75), il denominatore aumenta, in numeratore rimane costante quindi inevitabilmente l'indice diminuisce.

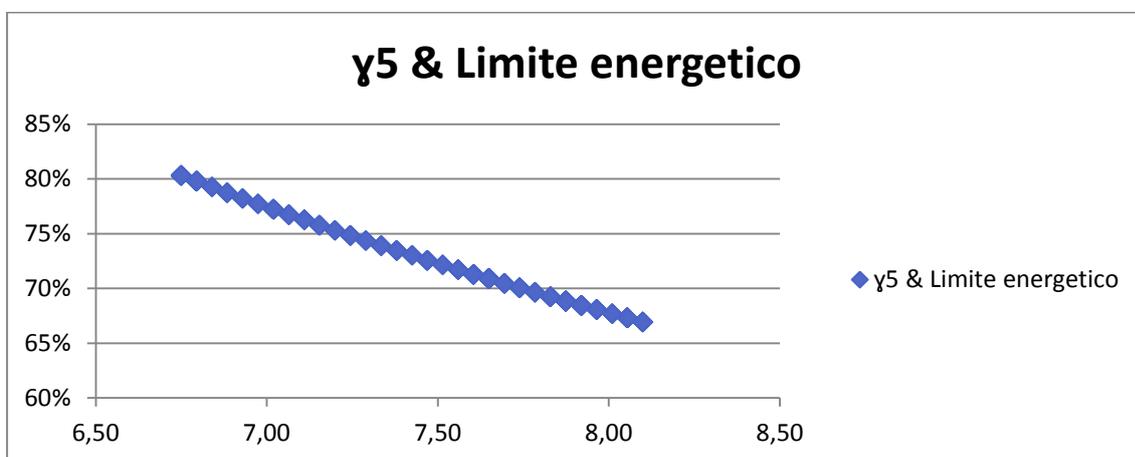


FIGURA 4.16: rappresentazione del limite energetico e di  $\gamma_5$

Nella FIGURA 4.17 e FIGURA 4.18 si ha a che fare con gli indici di bilanciamento energetico tra le varie stazioni per i vari modelli ovvero  $\gamma_6$  e  $\gamma_6''$  rappresentati in ordinata; si può vedere come all'aumentare del limite energetico tendenzialmente aumenti anche lo sbilanciamento. Questo andamento è dovuto al fatto che

aumentando l'energia massima disponibile inevitabilmente si ha un maggiore sbilanciamento dovuto ad un maggior risparmio energetico.

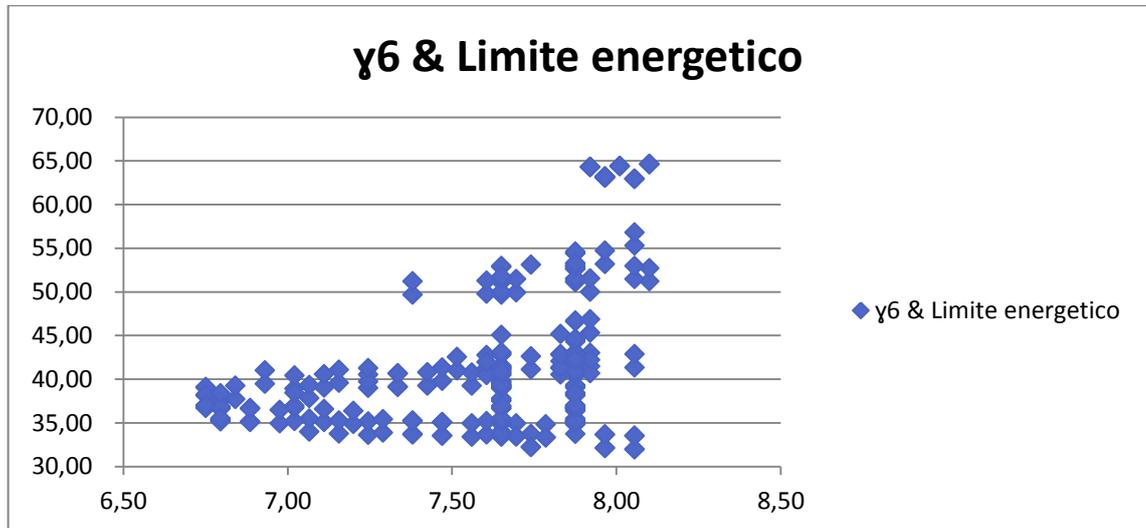


FIGURA 4.17: rappresentazione del limite energetico e di  $\gamma_6$

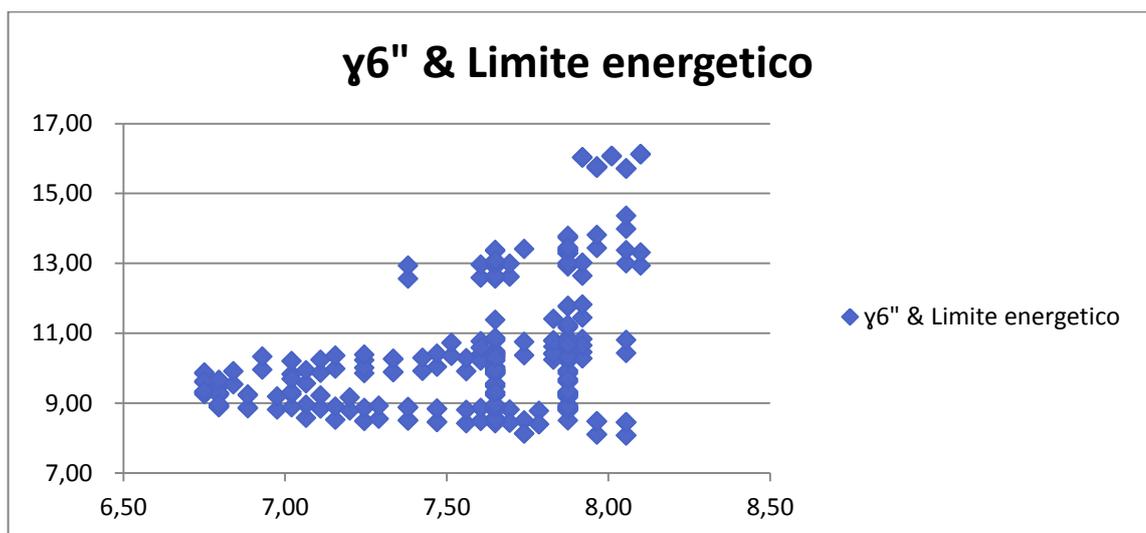


FIGURA 4.18: rappresentazione del limite energetico e di  $\gamma_6''$

Infine, in FIGURA 4.19 e FIGURA 4.20 si vede come anche in questo caso, anche se in maniera meno marcata, all'aumentare del limite energetico accettabile aumentino anche  $\gamma_7$  e  $\gamma_7''$  (in ordinata) ovvero aumenti lo sbilanciamento all'interno delle varie stazioni.

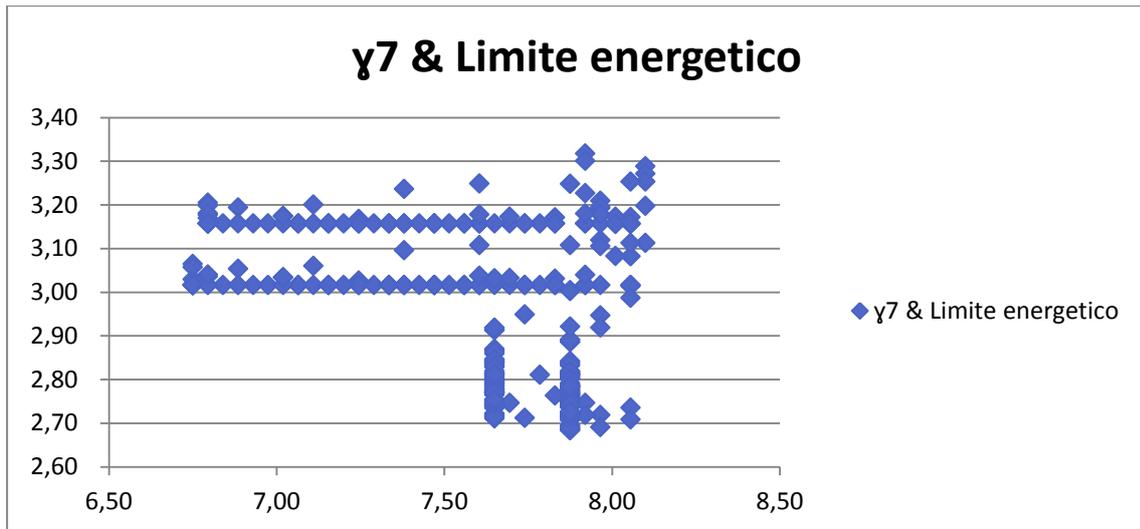


FIGURA 4.19: rappresentazione del limite energetico e di  $\gamma_7$

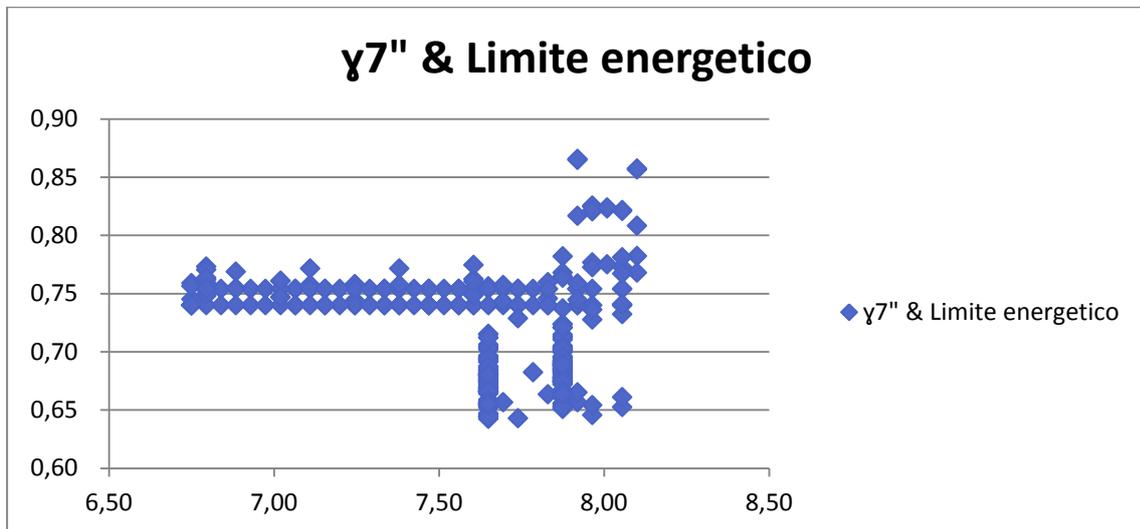


FIGURA 4.20: rappresentazione del limite energetico e di  $\gamma_7''$

Se si dovesse scegliere, analogamente a quanto fatto per il tempo, una soluzione ottimale in base agli indici selezionati inevitabilmente si sceglierebbe uno scenario in cui:  $\gamma_1$  sia contenuto,  $\gamma_2$  sia elevato,  $\gamma_5$  sia elevato,  $\gamma_6$  e  $\gamma_6''$  siano contenuti e  $\gamma_7$  e  $\gamma_7''$  siano contenuti. Si deve quindi ricercare uno scenario con limite energetico ridotto.

### 3) INDICI TEMPORALI ED INDICI ENERGETICI A CONFRONTO

Partendo dalla FIGURA 4.21 nella quale in ascissa si ha  $\gamma_1$  mentre in ordinata  $\phi_1$  si può vedere come all'aumentare dell'indice energetico aumenti contemporaneamente quello temporale. Di norma questo risparmio sia in termini energetici che in termini di tempo è dovuto ad un aumento del tempo ciclo e ad un conseguente aumento della soglia energetica; quindi, a parità di durata e di valore energetico assegnato ai vari task, maggiore è il tempo ciclo e il limite energetico maggiore sarà lo sbilanciamento e maggiore risulterà quindi sia l'ozio che il risparmio energetico (si veda FIGURA 4.7 e FIGURA 4.14).

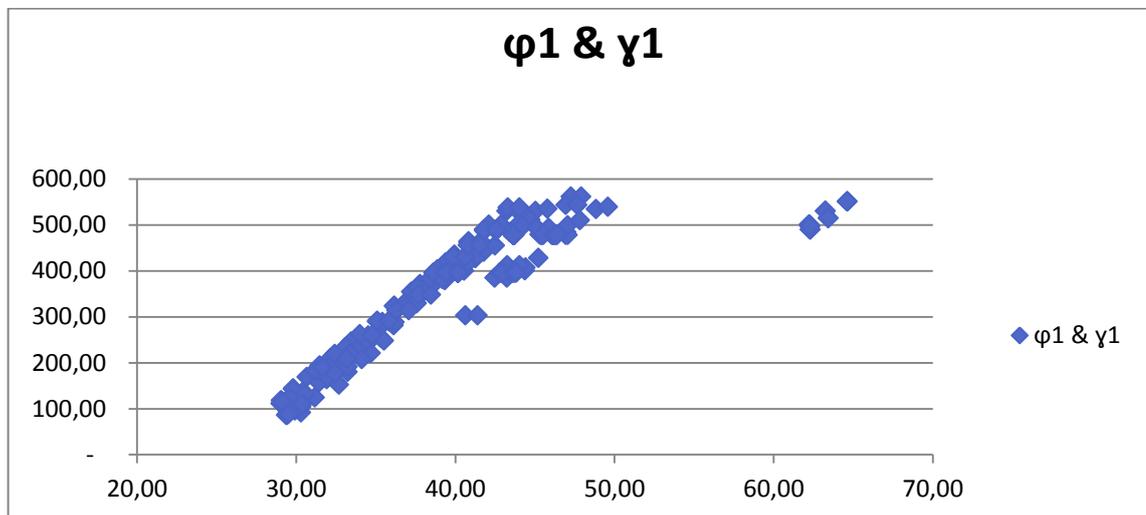


FIGURA 4.21 : rappresentazione di  $\phi_1$  e  $\gamma_1$

Considerando poi la FIGURA 4.22 nella quale in ascissa si ha  $\gamma_2$  mentre in ordinata  $\phi_2$  si può vedere come anche in questo caso all'aumentare dell'indice energetico aumenti contemporaneamente quello temporale. A differenza del caso sopra però questo aumento del rischio di superare il limite temporale ed energetico è dovuto ad una riduzione del tempo ciclo e quindi anche ad una riduzione del limite energetico; al diminuire del tempo ciclo e della soglia energetica è più difficile cercare di non superare quel valore che porta inevitabilmente ad un sovra consumo in termini di tempo e in termini energetici (si veda FIGURA 4.8 e FIGURA 4.15).

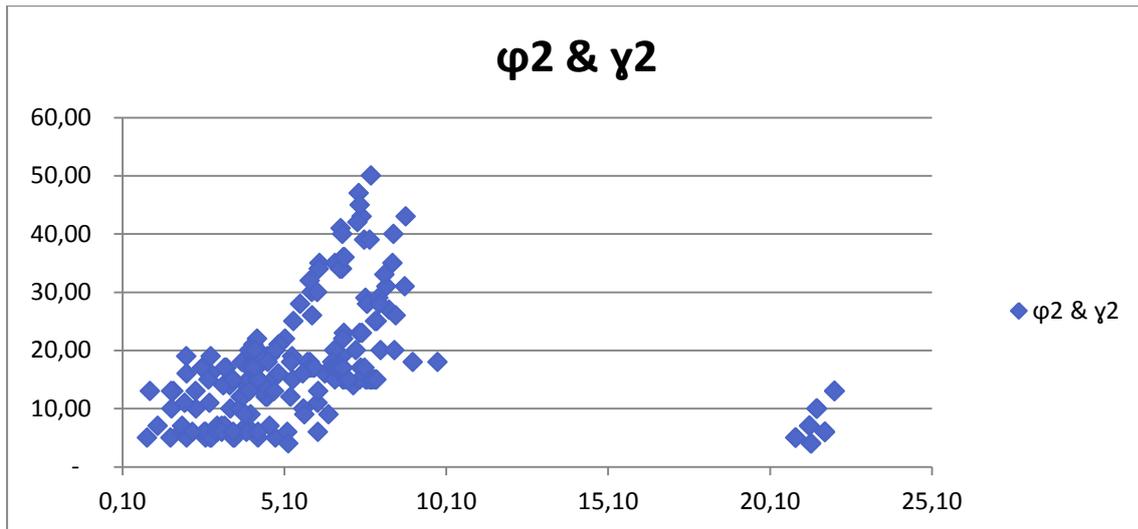


FIGURA 4.22 : rappresentazione di  $\varphi_2$  e  $\gamma_2$

È interessante poi dopo aver esaminato i primi due grafici mettere a confronto  $\varphi_1$  con  $\gamma_2$  e  $\varphi_2$  con  $\gamma_1$ . In FIGURA 4.23 (con  $\gamma_2$  in ascissa e in ordinata  $\varphi_1$ ) si può vedere come all'aumentare del rischio di eccedere il limite energetico diminuisca il tempo di ozio; anche in questo caso l'andamento del grafico è conseguente ad una diminuzione del tempo ciclo: minore è il tempo ciclo, minore è la soglia energetica (essendo essa direttamente dipendente dal tempo ciclo), maggiore è la probabilità di superare il limite energetico (quindi maggiore è  $\gamma_2$ ) e minore di conseguenza è il tempo di ozio  $\varphi_1$ . Situazione contrapposta nella FIGURA 4.24 (in ascissa  $\varphi_2$  e in ordinata  $\gamma_1$ ) in cui all'aumentare del risparmio energetico si ha una diminuzione del rischio di eccedere il limite temporale e quindi minore è  $\varphi_2$ ; questo andamento lo si può ricondurre ad un aumento del tempo ciclo: all'aumentare di quest'ultimo si ha un conseguente aumento della soglia energetica e pertanto maggiore è il risparmio energetico e minore sarà la possibilità di eccedere la soglia del tempo ciclo; detto questo è inevitabile che  $\varphi_2$  diminuisca.

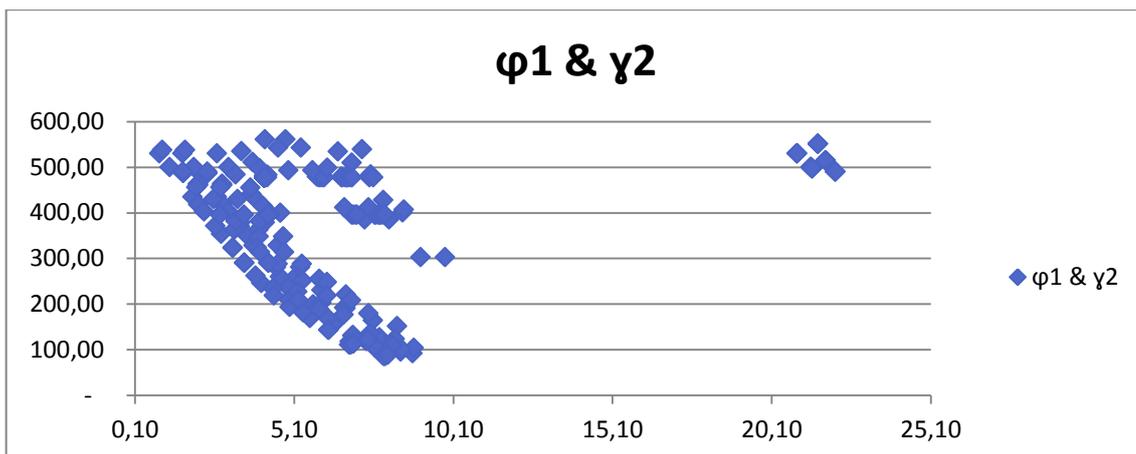


FIGURA 4.23 : rappresentazione di  $\varphi_1$  e  $\gamma_2$

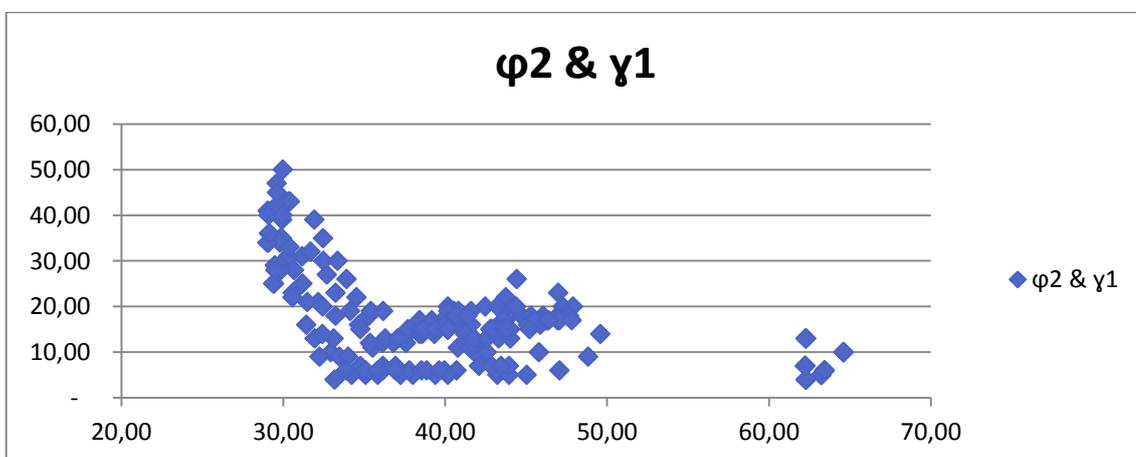


FIGURA 4.24: rappresentazione di  $\varphi_2$  e  $\gamma_1$

Passando poi agli indici di efficienza e quindi alla FIGURA 4.25 (in ascissa  $\gamma_5$  e in ordinata  $\varphi_5$ ) si può vedere come all'aumentare dell'efficienza energetica aumenti di conseguenza anche l'efficienza in termini di tempo. Questo andamento è dovuto ad una riduzione del tempo ciclo e quindi del limite energetico: al diminuire del tempo ciclo si riesce a saturare meglio le stazioni; discorso analogo vale per il limite energetico. Si veda FIGURA 4.9 e FIGURA 4.16.

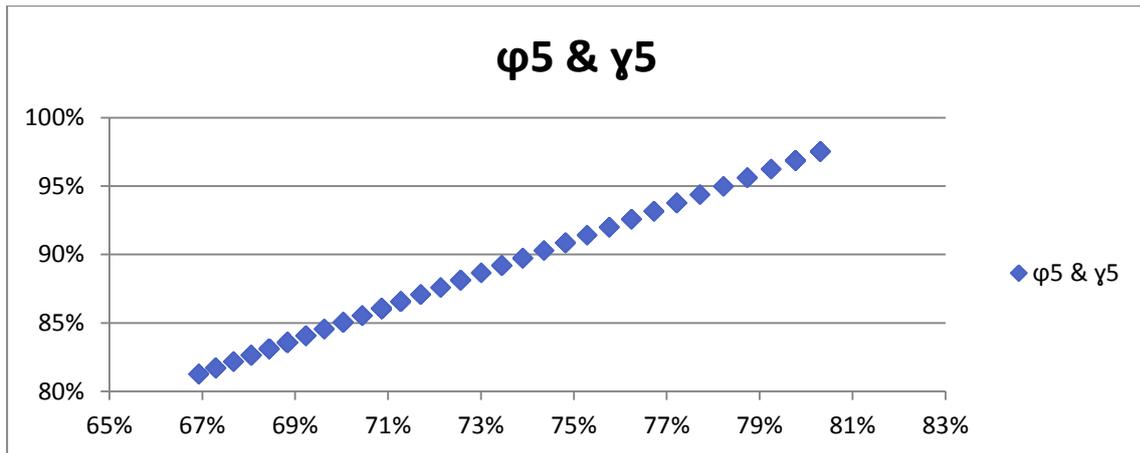


FIGURA 4.25: rappresentazione di  $\varphi_5$  e  $\gamma_5$

Si proceda ora considerando contemporaneamente la FIGURA 4.26 e FIGURA 4.27 in quanto hanno andamento del tutto analogo, l'unica differenza è che la seconda ha gli indici pesati in base alla domanda di ogni modello mentre la prima no. Si può vedere come, in entrambi i casi all'aumentare dello sbilanciamento dal punto di vista energetico tra le stazioni per ogni modello, ovvero all'aumentare di  $\gamma_6$ , aumenti tendenzialmente anche  $\varphi_6$ . la correlazione pari a  $R= 0,81$  tra energia e tempo è abbastanza elevata pertanto è coerente che se vi è uno sbilanciamento in termini energetici ci sia anche in termini di tempo. In genere, come si è visto nei grafici precedenti, maggiore è il tempo ciclo e il limite energetico maggiore sarà anche lo sbilanciamento.

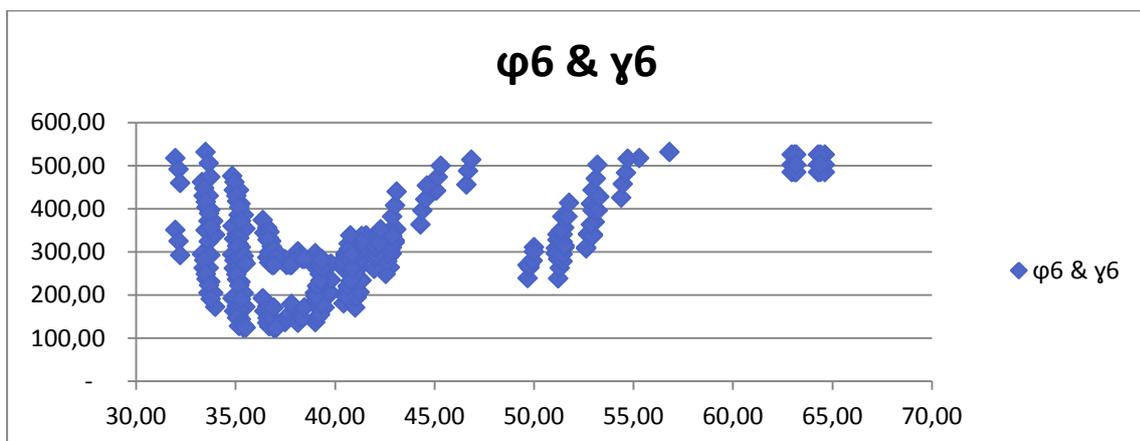


FIGURA 4.26 : rappresentazione di  $\varphi_6$  e  $\gamma_6$

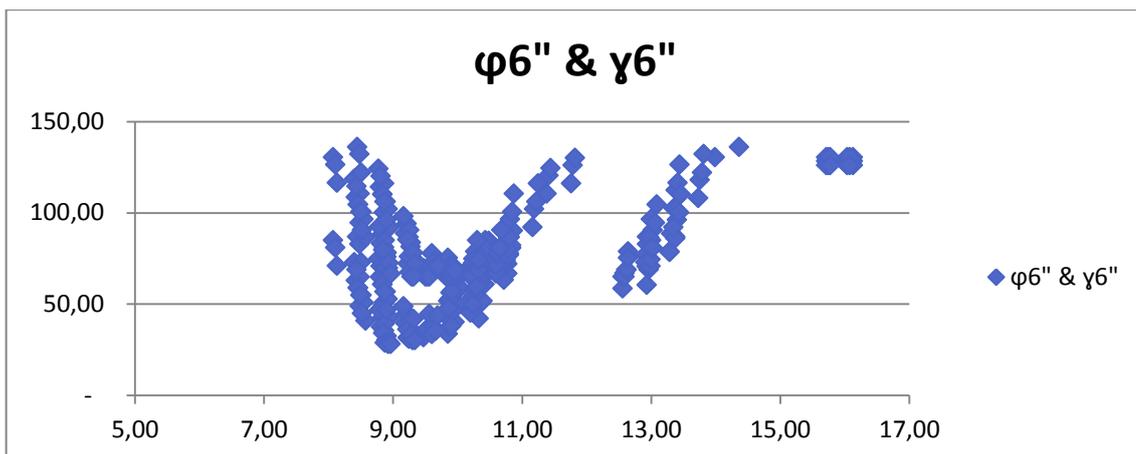


FIGURA 4.27: rappresentazione di  $\varphi 6''$  e  $\gamma 6''$

Si concentri ora l'attenzione sulle figure FIGURA 4.28 e FIGURA 4.29, anche in questo caso si considerano contemporaneamente in quanto hanno andamento del tutto analogo. Si ha a che fare con due grafici non di facile interpretazione però, facendo riferimento a FIGURA 4.12, FIGURA 4.13 e FIGURA 4.19, 4.20, si può intuire che vi sia anche in questo caso un andamento tendenzialmente proporzionale: all'aumentare dello sbilanciamento nella stessa stazione, calcolato per ogni modello dal punto di vista energetico, vi è uno sbilanciamento analogo dal punto di vista temporale.

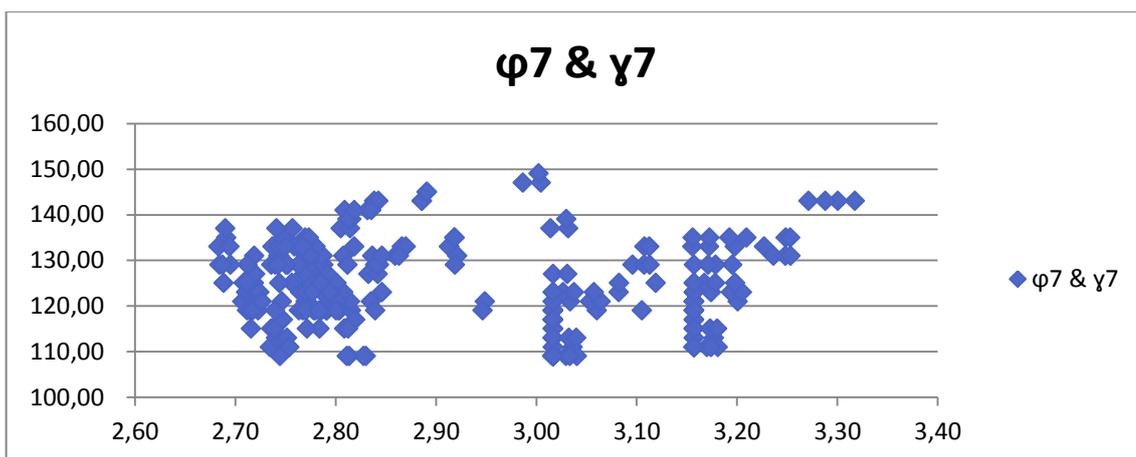


FIGURA 4.28: rappresentazione di  $\varphi 7$  e  $\gamma 7$

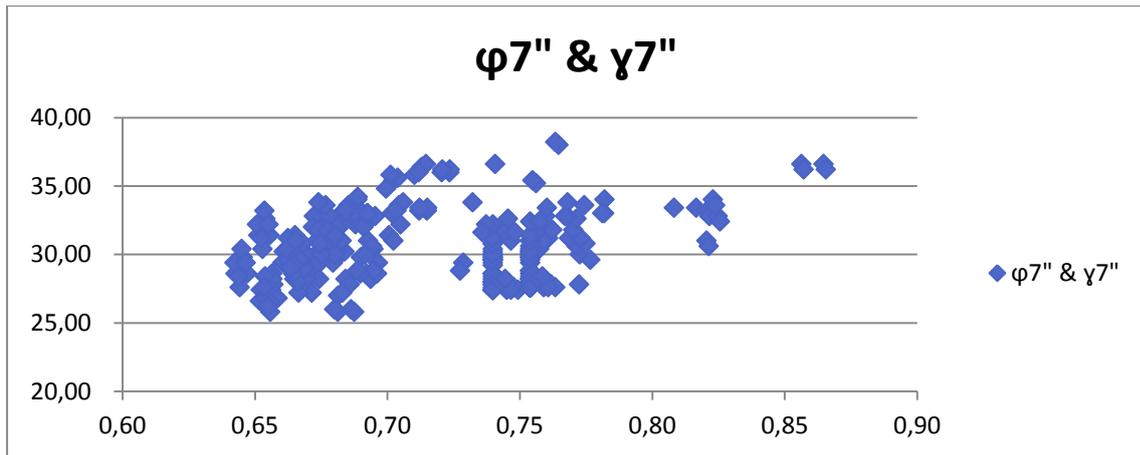


FIGURA 4.29 : rappresentazione di  $\varphi 7''$  e  $\gamma 7''$

Se si dovesse scegliere una soluzione ottimale in base agli indici selezionati inevitabilmente si sceglierebbe uno scenario in cui:  $\gamma 1$  e  $\varphi 1$  siano contenuti,  $\gamma 2$  e  $\varphi 2$  siano elevati,  $\gamma 5$  e  $\varphi 5$  siano elevati,  $\gamma 6$  e  $\gamma 6''$  e  $\varphi 6$  e  $\varphi 6''$  siano contenuti e  $\gamma 7$  e  $\gamma 7''$  e  $\varphi 7$  e  $\varphi 7''$  siano contenuti. Si deve quindi ricercare uno scenario con limite energetico e tempo ciclo ridotti. Una soluzione che ottimizzi entrambi gli indici è da ricercarsi all'interno della frontiera efficiente di Pareto in FIGURA 4.5 e in FIGURA 4.6.

#### 4) EFFICIENZA E INDICI DI LIVELLAMENTO

In FIGURA 4.30 si può vedere come all'aumentare dell'efficienza in ascissa diminuisca lo sbilanciamento, questo è dovuto ad una diminuzione del tempo ciclo e del tempo d'ozio a favore di un'ottimizzazione di bilanciamento.

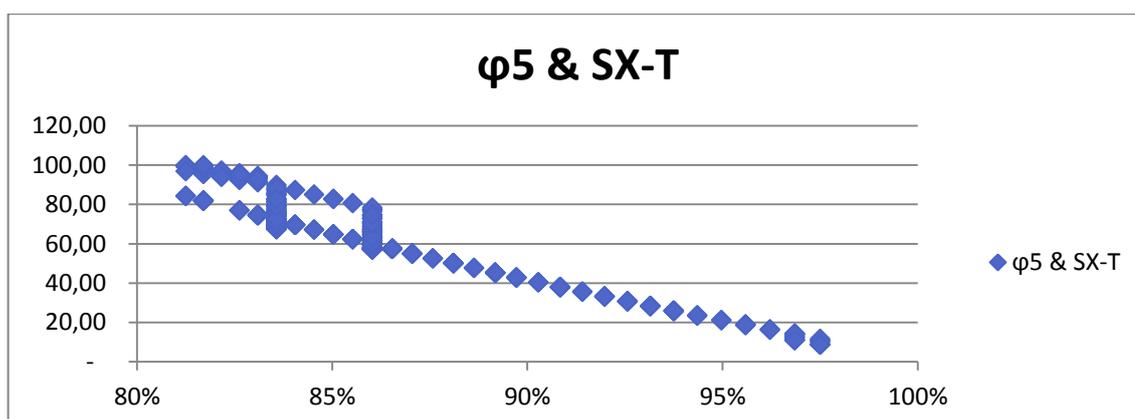


FIGURA 4.30: rappresentazione di  $\phi_5$  e SX-T

In FIGURA 4.31 poi si ha a che fare con un discorso simile a quello sopra descritto; in ascissa si ha l'efficienza energetica mentre in ordinata vi è SX-E. Si può vedere come all'aumentare dell'efficienza energetica diminuisca nettamente lo sbilanciamento. Questa diminuzione è dovuta principalmente ad una diminuzione del limite energetico; si può dire che ad una diminuzione del risparmio energetico coincida un'ottimizzazione del bilanciamento.

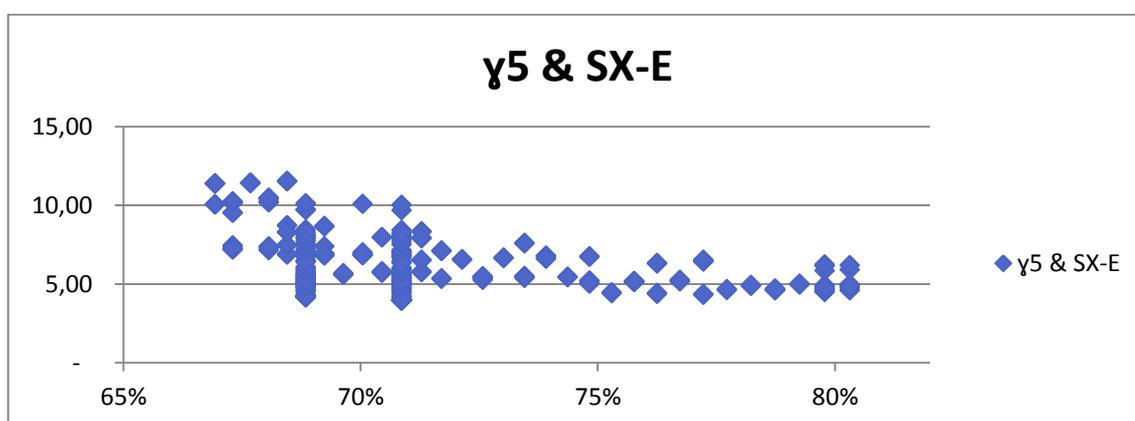


FIGURA 4.31 : rappresentazione di  $\gamma_5$  e SX-E

Anche in questo caso se si dovesse scegliere una soluzione ottimale in base agli indici considerati si preferirebbe uno scenario ad elevata efficienza e con basso sbilanciamento, quindi è consigliato considerare soluzioni con tempo ciclo contenuto e di conseguenza con un limite energetico ridotto.

### 4.3 ANALISI CON IL MODELLO EURISTICO

---

Dopo aver passato in rassegna il modello di programmazione lineare, si passerà ora al modello euristico. Come già accennato in precedenza, si prende spunto dall'euristico utilizzato in letteratura: il Largest Candidate Rule abbreviato con LCR. Questo modello prevede il dimensionamento delle stazioni in base ad un tempo ciclo dato; l'obiettivo è quello di assegnare i task in modo tale che non superino tale limite, nel caso succedesse si dovrebbe chiudere la stazione e bisognerebbe aprirne una nuova.

Nel modello che si proporrà in seguito si prenderà invece un valore di tempo ciclo medio di riferimento pari a 146,25 s (trovato sommando tutti i  $t_j$ ' del VAM e dividendoli per 4 ovvero le stazioni desiderate) e l'obiettivo sarà quello di avvicinarsi il più possibile a questo valore, sono accettabili anche eventuali eccedenze. Un ragionamento analogo viene fatto anche per l'energia, in questo caso il limite è di 6,58 Kcal per stazione trovato utilizzando l'equazione (80).

Si ricorda che il criterio di assegnazione dei vari task tiene conto del  $SI_j$ ' e quindi dei vincoli di precedenza e del tempo dei vari task: si assegna preferibilmente per primo il task dalla durata maggiore. In seguito, in TABELLA 4.3, si riordinano i task in maniera decrescente. Il valore  $e_j''$  è stato ottenuto moltiplicando  $t_j$ ' per  $e_j$ ' in modo da trovare il reale consumo energetico dei vari task.

Task	$t_j$ [s]	$e_j''$ [kcal/task]
K	85	7,18
J	80	6,08
N	65	1,27
M	60	1,08
B	46	2,06
O	45	0,69
H	38	0,78
E	25	0,49
L	25	0,42
P	25	0,21
A	24	0,38
Q	16	0,17
F	15	0,22
C	13	0,20
I	11	0,18
D	7	0,02
G	5	0,01

TABELLA 4.3: rappresentazione dei task in maniera decrescente da quello con la durata temporale maggiore al minore

Seguendo i criteri sopra elencati si è arrivati alla seguente configurazione rappresentata in TABELLA 4.4.

stazioni	task disp	task ass	work load	energy load	idle time	idle energy
1	A	A	24,00	0,38	122,25	6,20
	B,D,E,G,H	B	70,00	2,44	76,25	4,14
	C,D,E,G,H	H	108,00	3,22	38,25	3,36
	C,D,E,G,I	E	133,00	3,71	13,25	2,87
	C,D,F,G,I	F	148,00	3,93	- 1,75	2,65
<b>ST 1 A,B,E,F,H</b>			<b>148,00</b>	<b>3,93</b>	<b>- 1,75</b>	<b>2,65</b>
2	C,D,G,I	C	13,00	0,20	133,25	6,39
	D,G,I	I	24,00	0,37	122,25	6,21
	D,G	D	31,00	0,39	115,25	6,19
	G	G	36,00	0,41	110,25	6,18
	J,L	J	116,00	6,49	30,25	0,10
K,L	L	141,00	6,90	5,25	-0,32	
<b>ST 2 C,D,G,I,J,L</b>			<b>141,00</b>	<b>6,90</b>	<b>5,25</b>	<b>-0,32</b>
3	K	K	85,00	7,18	61,25	-0,60
	M,N	N	150,00	8,46	- 3,75	-1,87
<b>ST 3 K,N</b>			<b>150,00</b>	<b>8,46</b>	<b>- 3,75</b>	<b>-1,87</b>
4	M	M	60,00	1,08	86,25	5,50
	O	O	105,00	1,77	41,25	4,81
	P	P	130,00	1,98	16,25	4,60
	Q	Q	146,00	2,15	0,25	4,43
<b>ST 4 M,O,P,Q</b>			<b>146,00</b>	<b>2,15</b>	<b>0,25</b>	<b>4,43</b>

TABELLA 4.4: rappresentazione della soluzione trovata con l'euristico

Alla prima stazione sono assegnati i task A,B,E,F,H che complessivamente durano 148 s (“work load”) e generano un consumo energetico pari a 3,93 Kcal (“energy load”), confrontando questi valori con i limiti che si erano dati si supera il limite di tempo di 1,75 s (“idle time”) mentre si ha un risparmio energetico di 2,65 Kcal.

Alla seconda stazione sono assegnati i task C,D,G,I,J,L che complessivamente durano 141 s e corrispondono a 6,9 Kcal portando così ad un risparmio in termini di tempo di 5,25 s mentre si supera il limite energetico di 0,32 Kcal.

Alla terza stazione sono assegnati solamente due task K e N che durano complessivamente 150 s superando il valore di riferimento di 3,75 s e generano un consumo energetico pari a 8,46 Kcal superando anche il valore di riferimento energetico di 1,87 Kcal.

All'ultima stazione sono assegnati i task rimanenti ovvero M,O,P,Q. Complessivamente durano 146 s avvicinandosi molto al valore di riferimento del tempo risparmiando solo 0,25 s e generano un consumo energetico pari a 2,15 risparmiando 4,43 Kcal.

La combinazione che si è trovata coincide con una delle 312 accettabili trovate con il modello di programmazione lineare.

Si sono ricavati quindi gli indici di questa combinazione (TABELLA 4.5) e successivamente si è voluto verificare la validità dell'euristico evidenziando nei vari grafici la soluzione trovata.

M - MST	SX - T	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\varphi_5$	$\varphi_6$	$\varphi_6''$	$\varphi_7$	$\varphi_7''$	tempo ciclo
150,00	10,05	86,00	25,00	31,00	9,00	98%	127,00	30,85	109,00	27,40	150,00
M - MSE	SX - E	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$	$\gamma_6''$	$\gamma_7$	$\gamma_7''$	limite energetico
7,75	4,93	29,37	7,90	4,74	1,92	80%	36,70	9,25	3,02	0,74	6,75

TABELLA 4.5 : rappresentazione degli indici energetici e di tempo della soluzione trovata con l'euristico

In seguito si riporteranno dei grafici in cui si metterà a confronto la soluzione trovata con l'euristico (evidenziata con un quadratino azzurro) con le soluzioni trovate con il modello lineare.

Si inizi con la FIGURA 4.32 che rappresenta le soluzioni con il Mini-Max Station Time in ordinata e il Mini-Max Station Energy in ascissa. La soluzione trovata con l'euristico si trova nella frontiera efficiente di Pareto e coincide con una delle soluzioni che minimizza il parametro temporale.

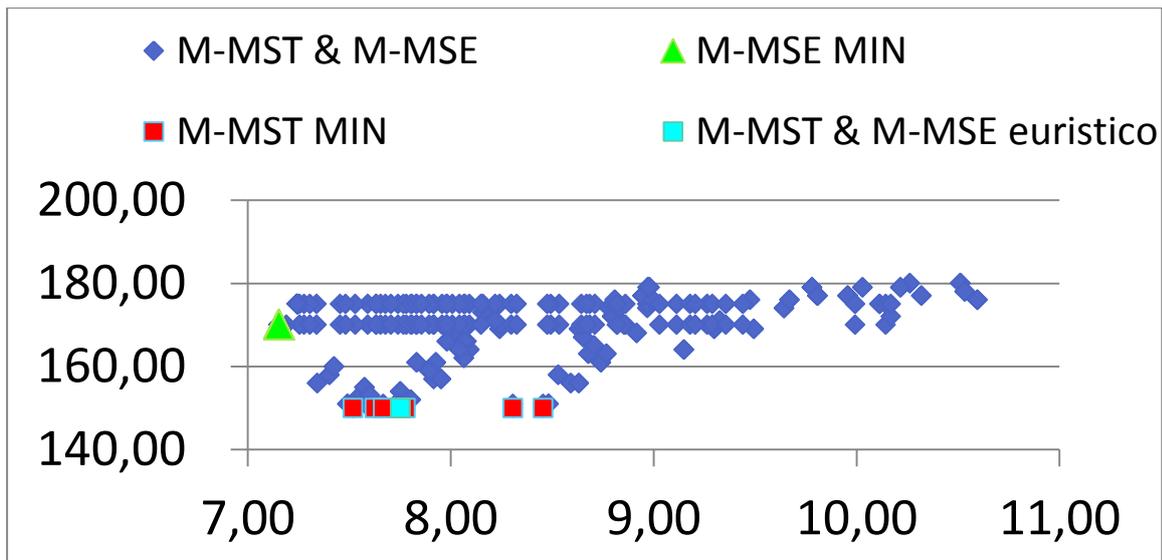


FIGURA 4.32 : rappresentazione degli indici M-MST e M-MSE con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Procedendo poi con l'Energy Smoothness Index (SX-E) in ascissa e il Time Smoothness Index (SX-T) in ordinata in FIGURA 4.33 si può vedere come anche in questo caso la soluzione si trovi nella frontiera efficiente di Pareto e ottimizzi il coefficiente di livellamento temporale coincidendo con una delle soluzioni migliori.

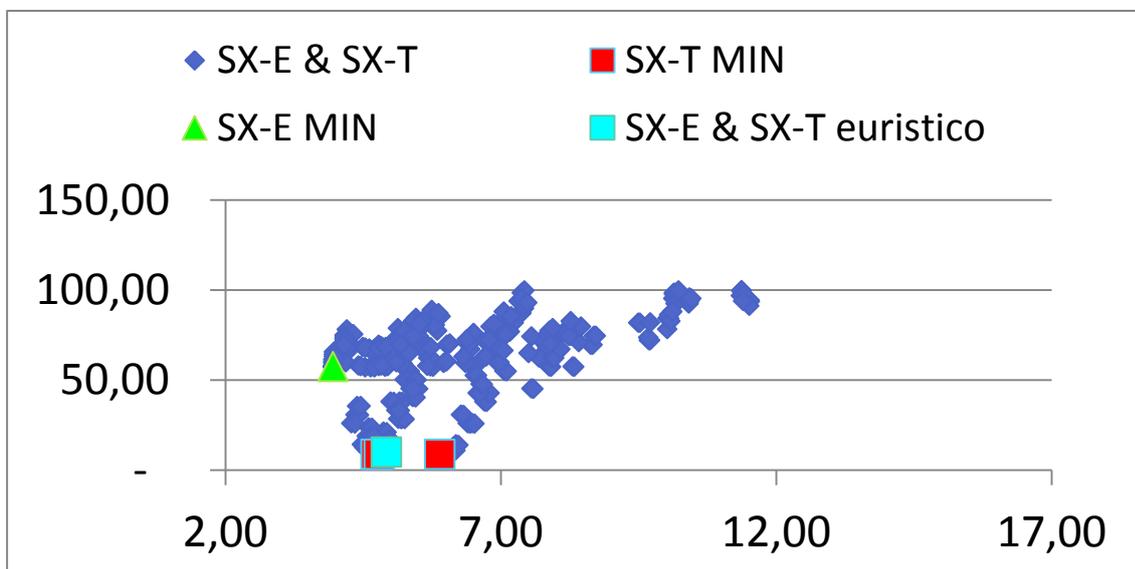


FIGURA 4.33: rappresentazione degli indici SX-T e SX-E con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Si passerà ora in rassegna i vari indici di tempo ed energia messi a confronto con il tempo ciclo, l'energia limite e tra loro stessi.

## 1) INDICI TEMPORALI E TEMPO CICLO

In FIGURA 4.34 è possibile vedere come la soluzione dell'euristico coincida con la soluzione con il più basso valore di tempo ciclo (150 s) e il più basso valore di ozio (86 s).

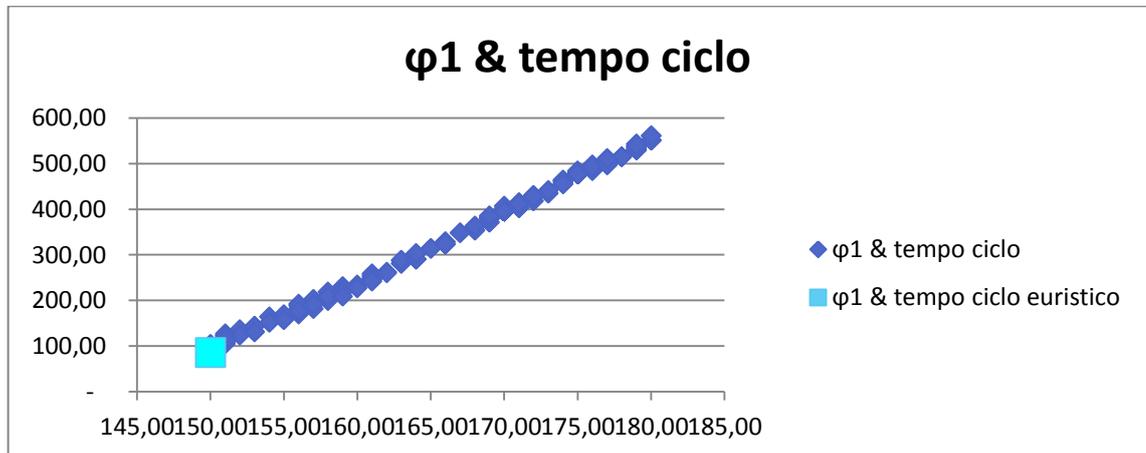


FIGURA 4.34 : rappresentazione degli indici  $\phi_1$  e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Nella FIGURA 4.35 sottostante, si può vedere, come era già prevedibile dopo aver analizzato il grafico della figura sopra, che la soluzione dell'euristico coincida con uno scenario che minimizzi il tempo ciclo ma che dia un valore abbastanza elevato di sovra consumo in termini di tempo (25 s) a fronte di un minimo di 4 s. Si osservi però che, a parità di tempo ciclo, la soluzione trovata con l'euristico coincida con la soluzione a più basso  $\phi_2$ .

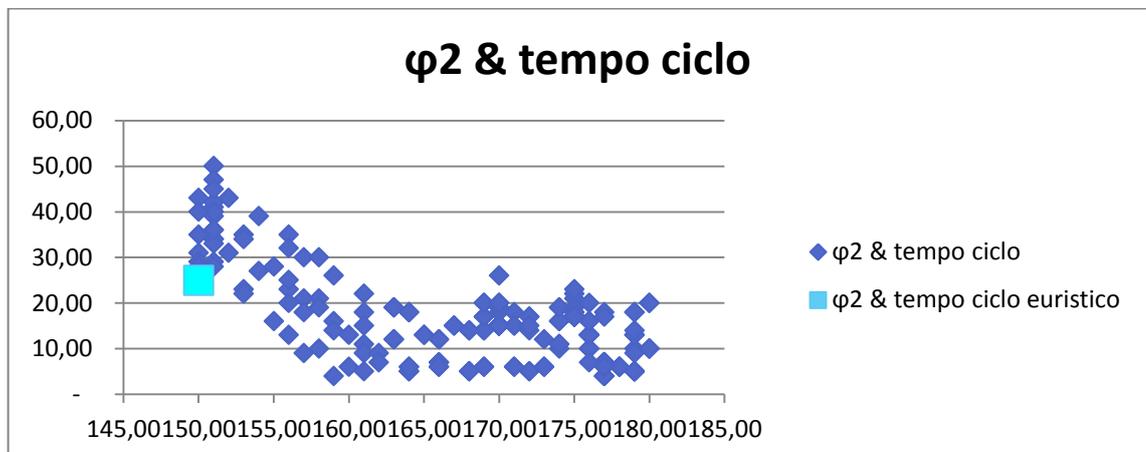


FIGURA 4.35 : rappresentazione degli indici  $\phi_2$  e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Passando poi all'indice  $\varphi_5$  dell'efficienza, in ordinata in FIGURA 4.36, si veda come la soluzione coincida con lo scenario a più alta efficienza (98 %).

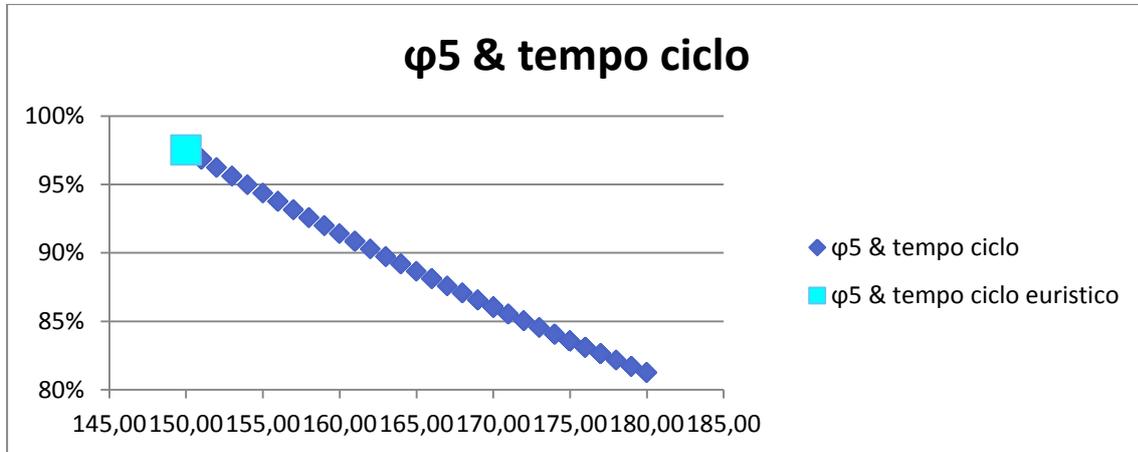


FIGURA 4.36 : rappresentazione degli indici  $\varphi_5$  e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Si considerino ora gli indici  $\varphi_6$  e  $\varphi_6''$  rispettivamente in FIGURA 4.37 e FIGURA 4.38. Si può vedere come la soluzione trovata con l'euristico rappresenti una soluzione a basso sbilanciamento tra le stazioni, rispettivamente i valori trovati sono: 127,00 s e 30,85 s a fronte di valori minimi di 123,50 s e 28,20 s.

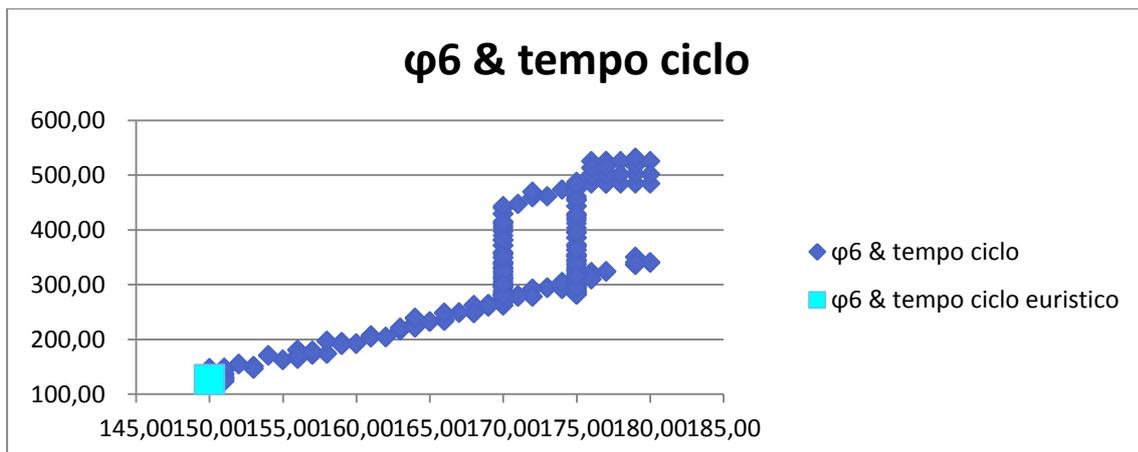


FIGURA 4.37 : rappresentazione degli indici  $\varphi_6$  e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

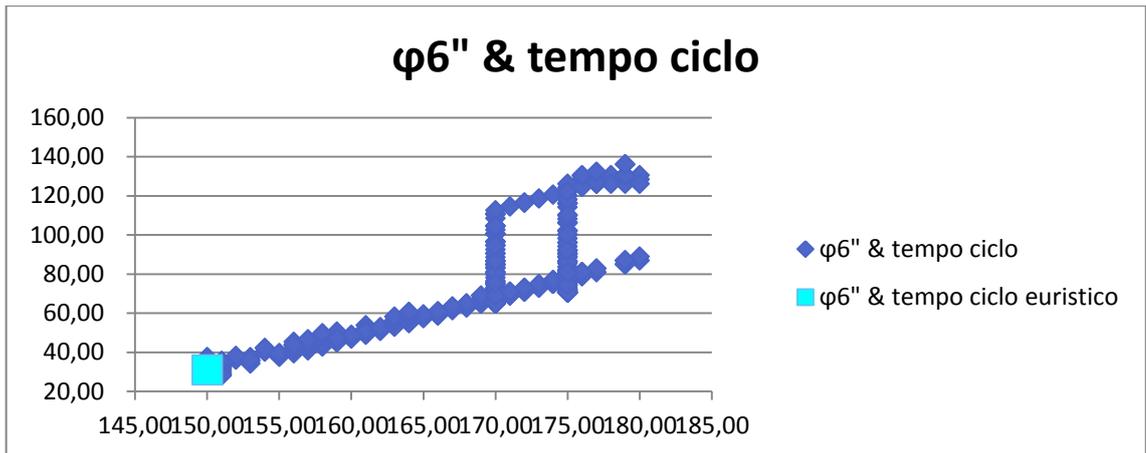


FIGURA 4.38: rappresentazione degli indici  $\phi_6''$  e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Infine, per quanto riguarda gli indici  $\phi_7$  e  $\phi_7''$ , in ordinata nelle FIGURA 4.39 e FIGURA 4.40, si può constatare che quelli trovati con la soluzione dell'euristico coincidano con uno scenario a basso sbilanciamento: i valori trovati sono rispettivamente: 109,00 s e 27,40 s che messi a confronto con i minimi (109,00 s e 25,80 s) sono valori alquanto apprezzabili.

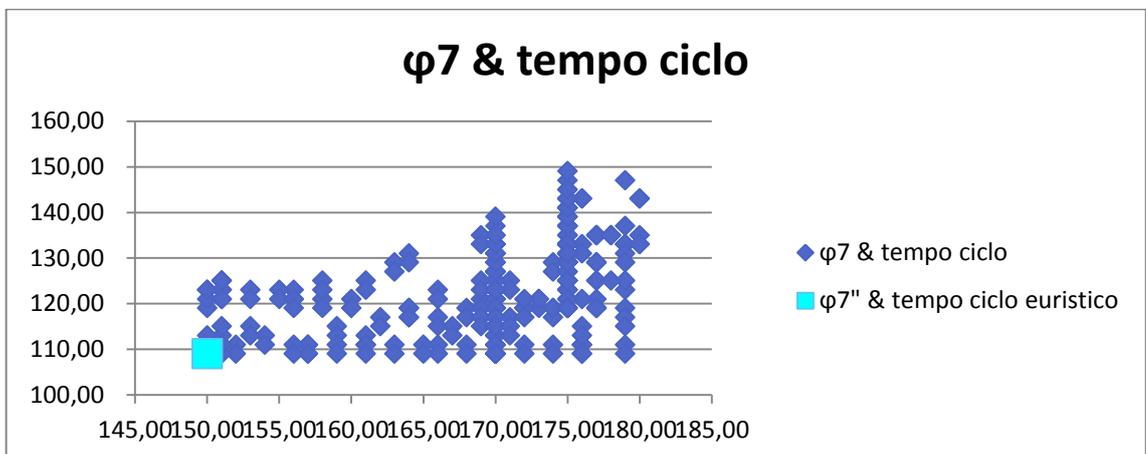


FIGURA 4.39 : rappresentazione degli indici  $\phi_7$  e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

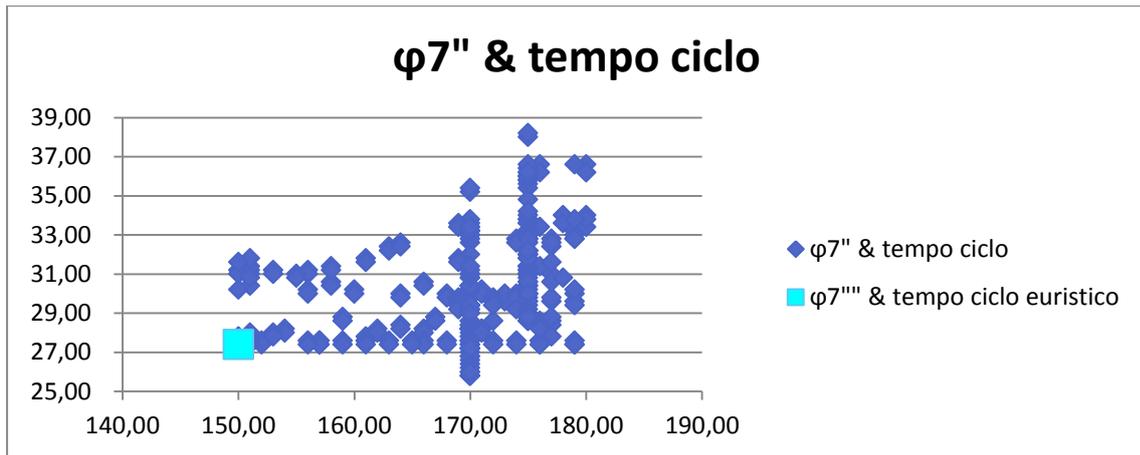


FIGURA 4.40 : rappresentazione degli indici  $\phi_7''$  e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Dal punto di vista degli indici temporali si può affermare che la soluzione trovata con l'euristico si alquanto apprezzabile dal momento che fornisce una soluzione con  $\phi_1$  contenuto,  $\phi_2$  elevato,  $\phi_5$  elevato,  $\phi_6$  e  $\phi_6''$  contenuti e  $\phi_7$  e  $\phi_7''$  contenuti e a tempo ciclo contenuto.

## 2) INDICI ENERGETICI E LIMITE ENERGETICO

Passando agli indici energetici, si cominci ad analizzare  $\gamma_1$  in FIGURA 4.41. Il valore corrispondente alla soluzione trovata con l'euristico pari a 29,37 Kcal si avvicina di parecchio al valore minimo assoluto di  $\gamma_1$ , 29,02 Kcal.

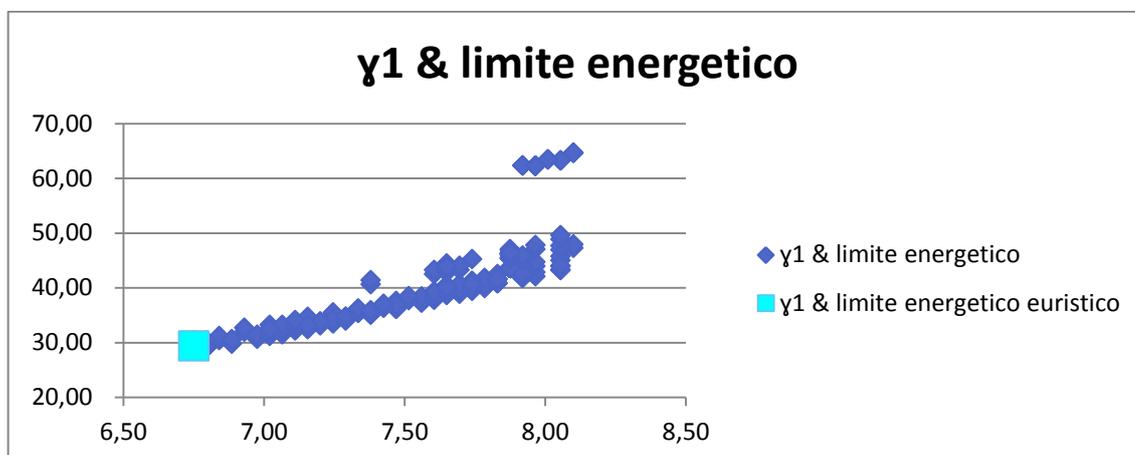


FIGURA 4.41 : rappresentazione degli indici  $\gamma_1$  e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Per quanto riguarda poi il valore di  $\gamma_2$  della soluzione trovata con il modello euristico, in ordinata in FIGURA 4.42, si può dire che coincida con uno dei valori più elevati dell'indice però a parità di limite energetico 6,75 Kcal sia il valore più contenuto.

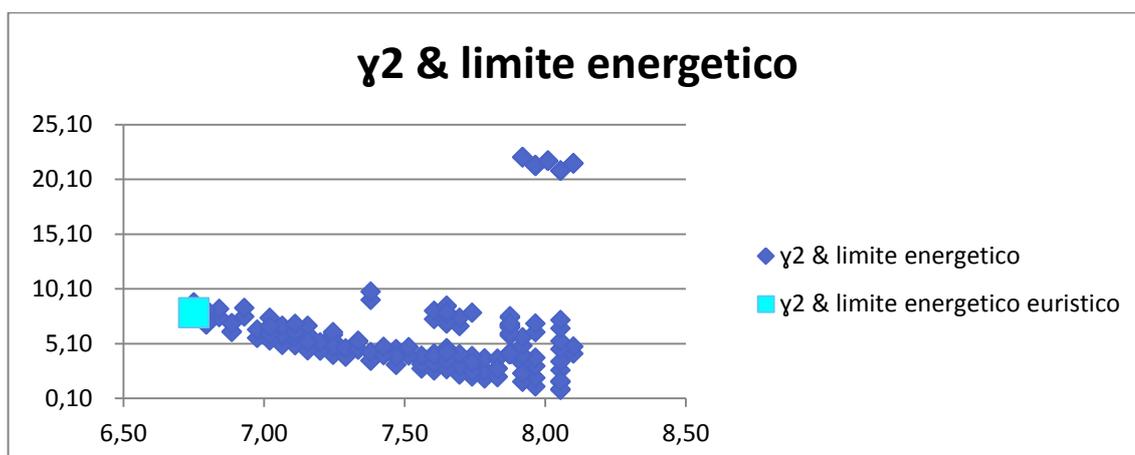


Figura 4.42 : rappresentazione degli indici  $\gamma_2$  e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Passando poi all'indice di efficienza energetica, si può vedere, FIGURA 4.43, come la soluzione trovata coincida con la soluzione ottimale trovata con il modello di programmazione lineare: 80%.

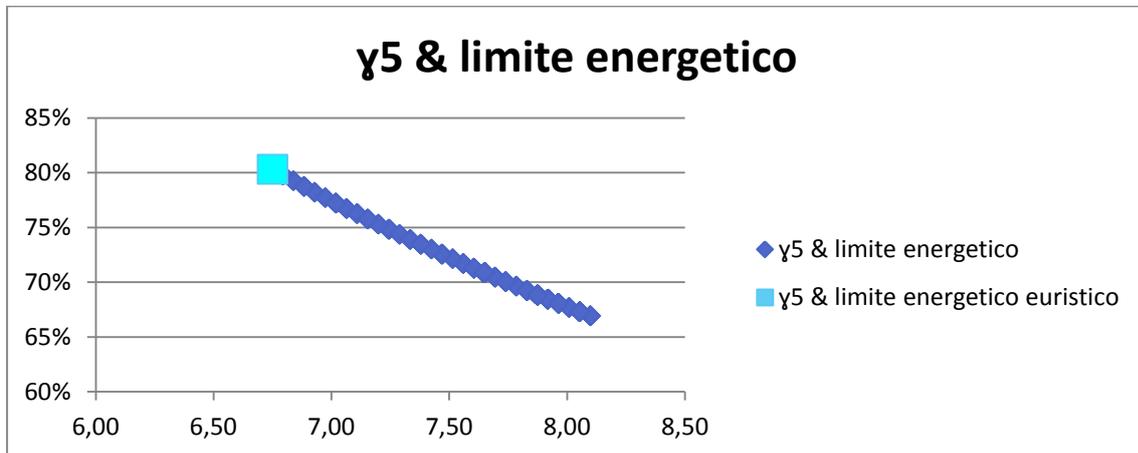


FIGURA 4.43 : rappresentazione degli indici  $\gamma_5$  e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Per quanto riguarda poi gli indici di sbilanciamento energetico  $\gamma_6$  e  $\gamma_6''$ , in ordinata rispettivamente in FIGURA 4.44 e FIGURA 4.45, si può vedere come i valori trovati con la soluzione dell'euristico (36,70 Kcal e 9,25 Kcal) si avvicinino ai valori minimi desiderabili di 31,98 Kcal e 8,07 Kcal.

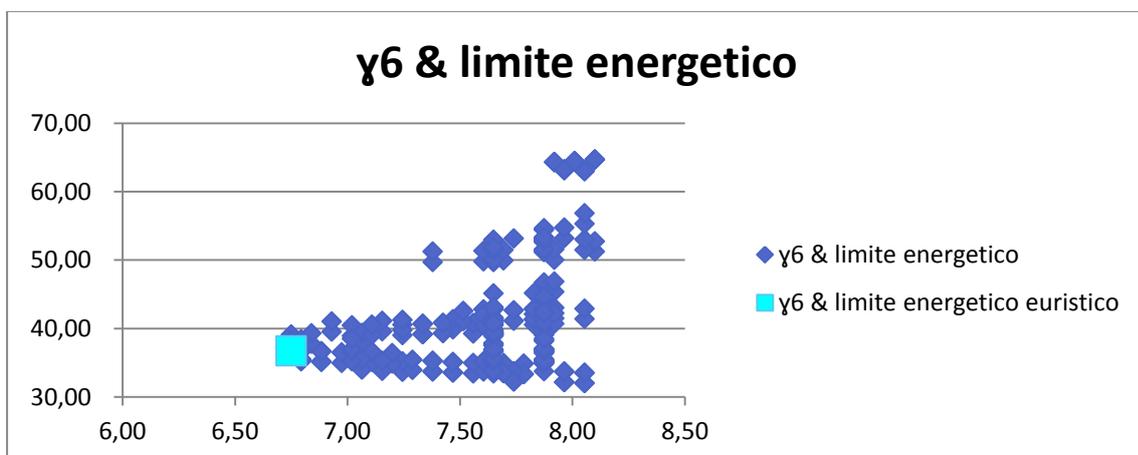


FIGURA 4.44 : rappresentazione degli indici  $\gamma_6$  e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

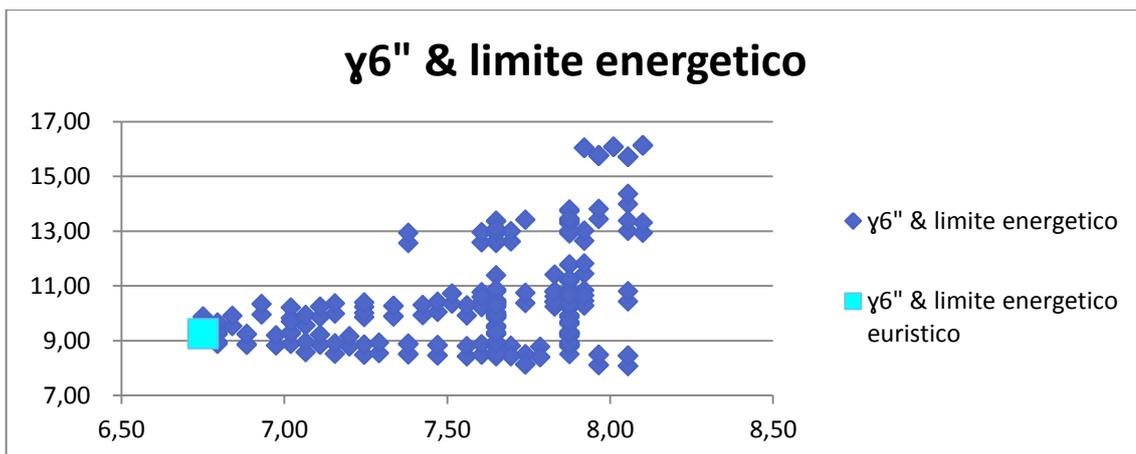


FIGURA 4.45: rappresentazione degli indici  $\gamma_6''$  e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Infine, gli indici  $\gamma_7$  e  $\gamma_7''$  di valutazione del bilanciamento nelle varie stazioni per i vari modelli trovati con l'euristico (in FIGURA 4.46 e FIGURA 4.47) coincidono con valori abbastanza contenuti (3,02 Kcal e 0,74 Kcal) rispetto ai valori minimi coincidenti con 2,68 Kcal e 0,64 Kcal.

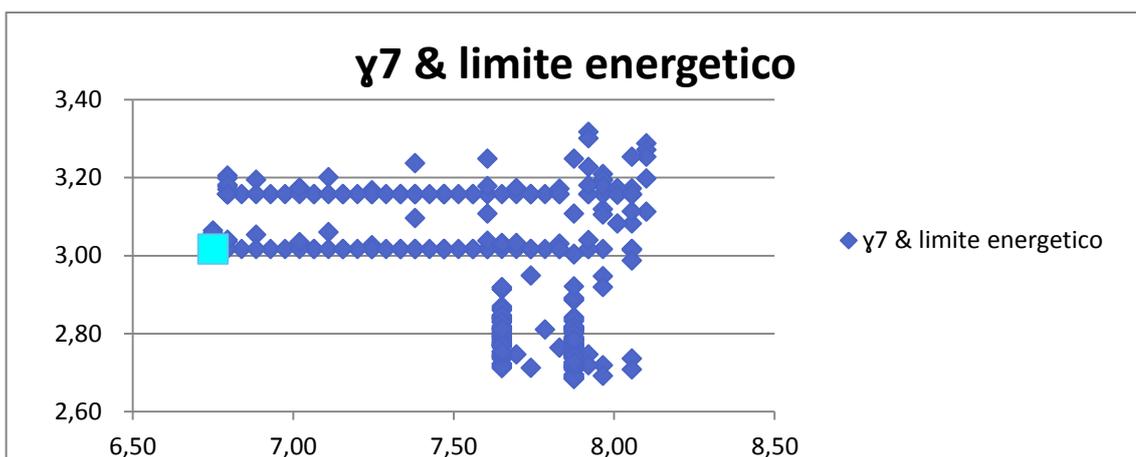


FIGURA 4.46 : rappresentazione degli indici  $\gamma_7$  e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

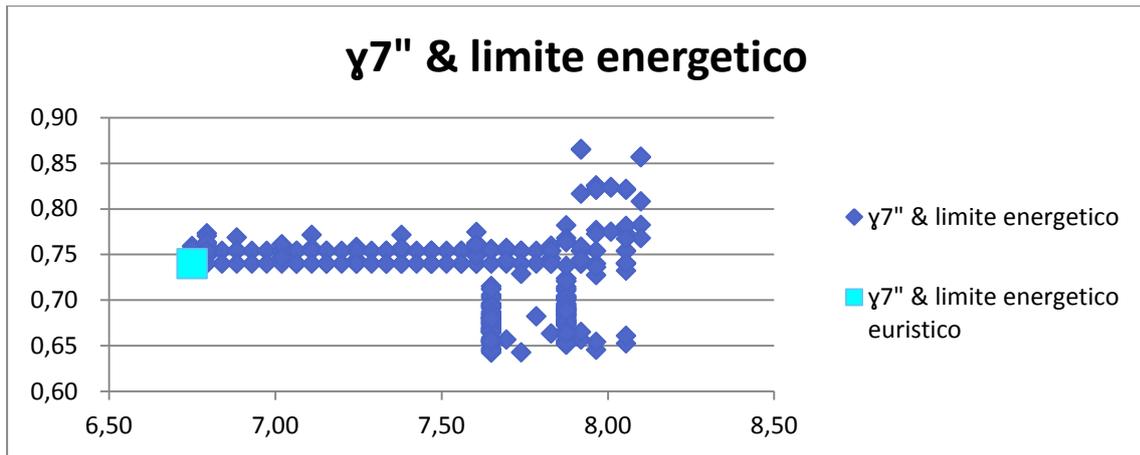


FIGURA 4.47 : rappresentazione degli indici  $\gamma 7''$  e tempo ciclo con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Anche in questo caso la soluzione trovata con l'euristico coincide con valori apprezzabili degli indici energetici: la soluzione coincide con lo scenario a più basso limite energetico,  $\gamma 1$  è minimo,  $\gamma 2$  è elevato ma non eccessivamente,  $\gamma 5$  è massimo,  $\gamma 6$  e  $\gamma 6''$  sono contenuti ed infine anche  $\gamma 7$  e  $\gamma 7''$  sono contenuti.

### 3) INDICI TEMPORALI ED INDICI ENERGETICI A CONFRONTO

Per completezza a questo punto è utile visualizzare la soluzione trovata con il modello euristico all'interno dei grafici in cui si mettono a confronto gli indici energetici (in ascissa) e temporali (in ordinata).

In FIGURA 4.48 la soluzione trovata con l'euristico coincide, come detto in precedenza, con il valore minimo di  $\varphi_1$  86 s ed una delle soluzioni che si avvicina al minimo di  $\gamma_1$  con un valore di 29,37 Kcal a fronte di un minimo di 29,02 Kcal. Come visto in precedenza questo valore coincide con un valore minimo di tempo ciclo e di limite energetico.

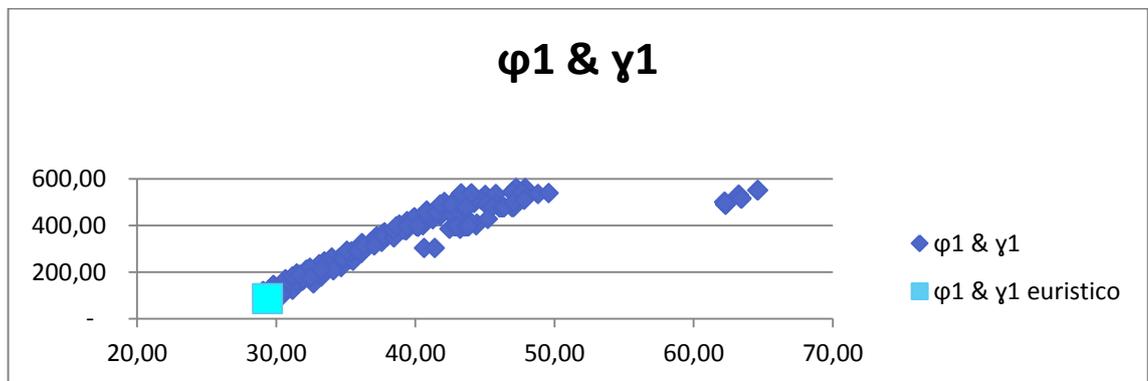


FIGURA 4.48 : rappresentazione degli indici  $\varphi_1$  e  $\gamma_1$  con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Per quanto riguarda  $\varphi_2$  e  $\gamma_2$ , in FIGURA 4.49, è possibile vedere che il valore trovato con l'euristico coincide con valori elevati dei due indici questo è dovuto principalmente al fatto che  $\varphi_1$  e  $\gamma_1$  siano contenuti e siano contenuti anche i valori del tempo ciclo e del limite energetico.

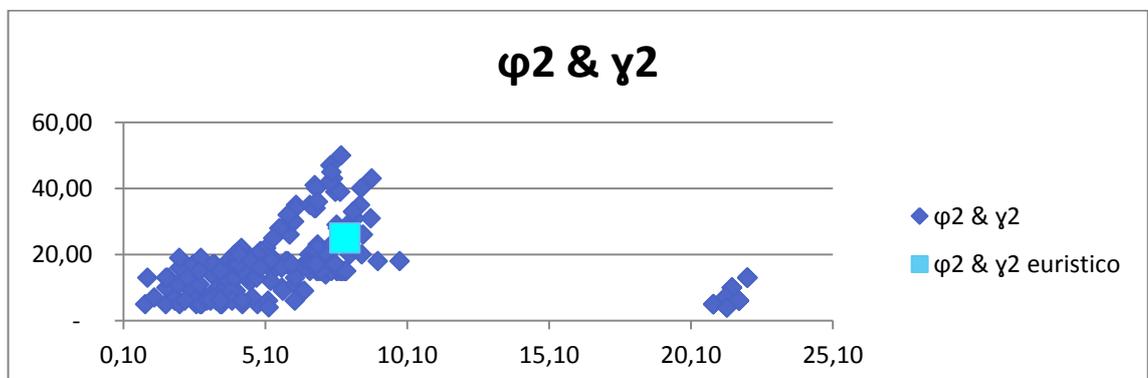


FIGURA 4.49 : rappresentazione degli indici  $\varphi_2$  e  $\gamma_2$  con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Per quanto riguarda l'efficienza e quindi gli indici  $\varphi_5$  e  $\gamma_5$ , in FIGURA 4.50, è possibile vedere, come già anticipato, che la soluzione trovata coincida con i valori massimi desiderabili di efficienza sia energetica che temporale.

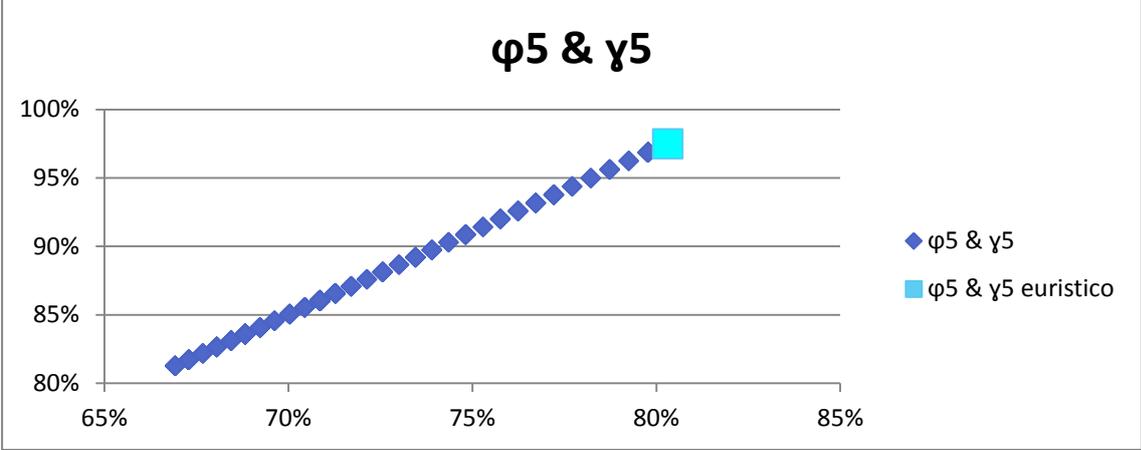


FIGURA 4.50 : rappresentazione degli indici  $\varphi_5$  e  $\gamma_5$  con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Per quanto riguarda gli indici di bilanciamento dei vari modelli nelle varie stazioni  $\varphi_6$  e  $\gamma_6$  e  $\varphi_6''$  e  $\gamma_6''$ , in FIGURA 4.51 e FIGURA 4.52, si sono ottenuti dei valori contenuti e pertanto apprezzabili.

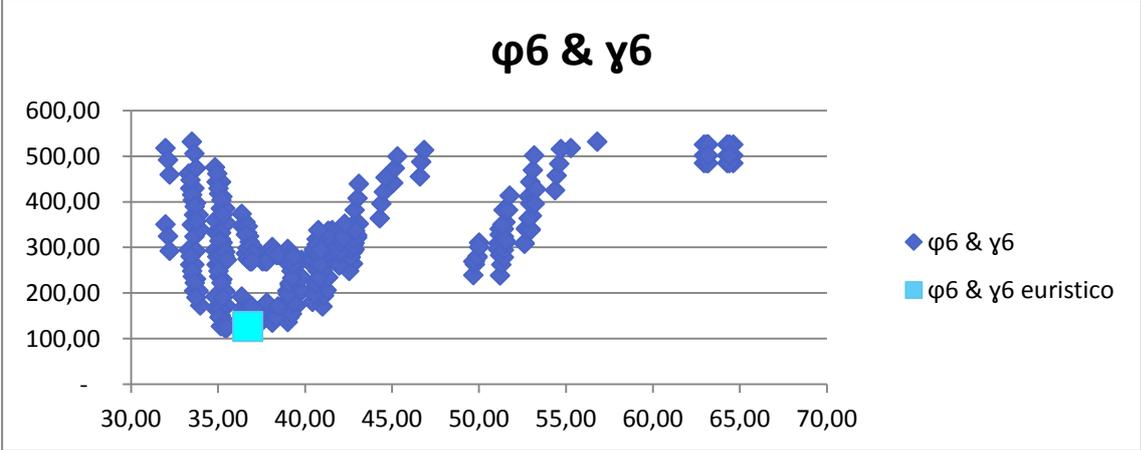


FIGURA 4.51 : rappresentazione degli indici  $\varphi_6$  e  $\gamma_6$  con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

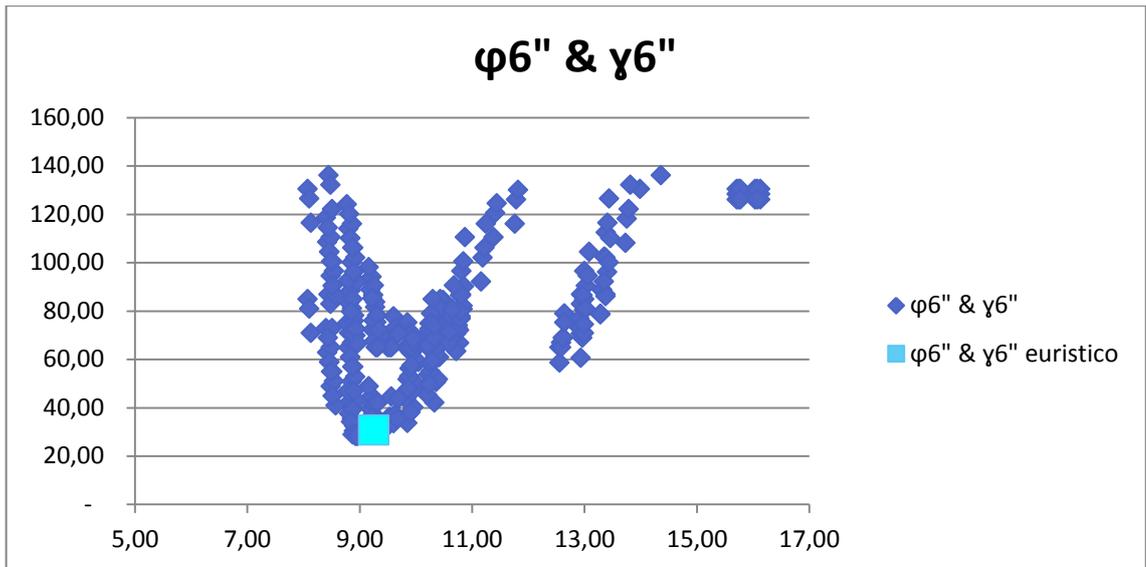


FIGURA 4.52 : rappresentazione degli indici  $\varphi_6''$  e  $\gamma_6''$  con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

Infine, per quanto riguarda gli indici di sbilanciamento tra le varie stazioni per i vari modelli ovvero  $\varphi_7$  e  $\gamma_7$  e  $\varphi_7''$  e  $\gamma_7''$  in FIGURA 4.53 e FIGURA 4.54 si può constatare come anche in questo caso il valore sia assai contenuto dal punto di vista temporale e medio dal punto di vista energetico.

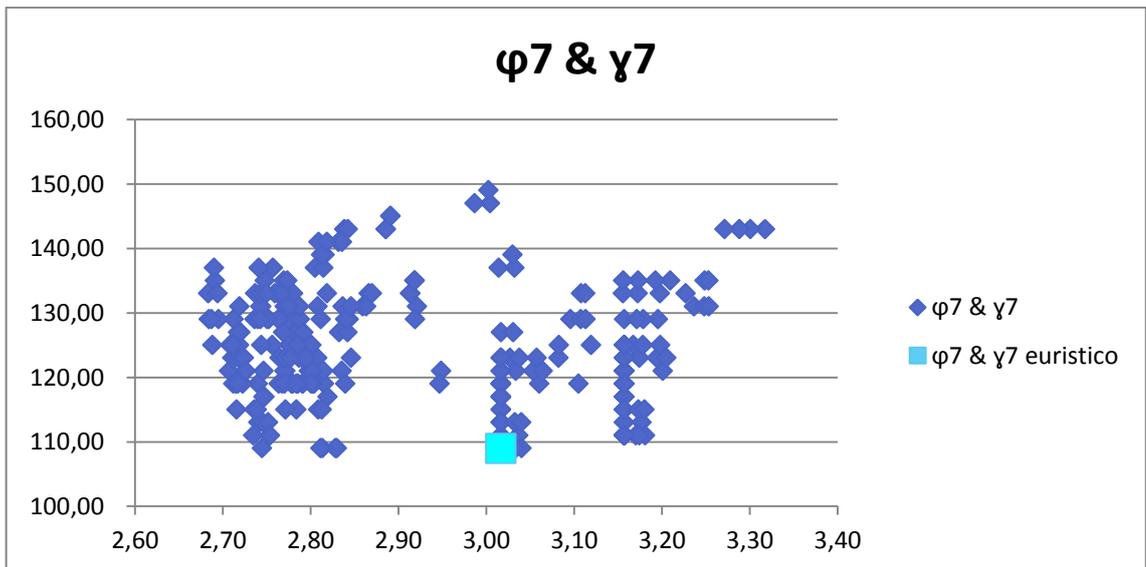


FIGURA 4.53 : rappresentazione degli indici  $\varphi_7$  e  $\gamma_7$  con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

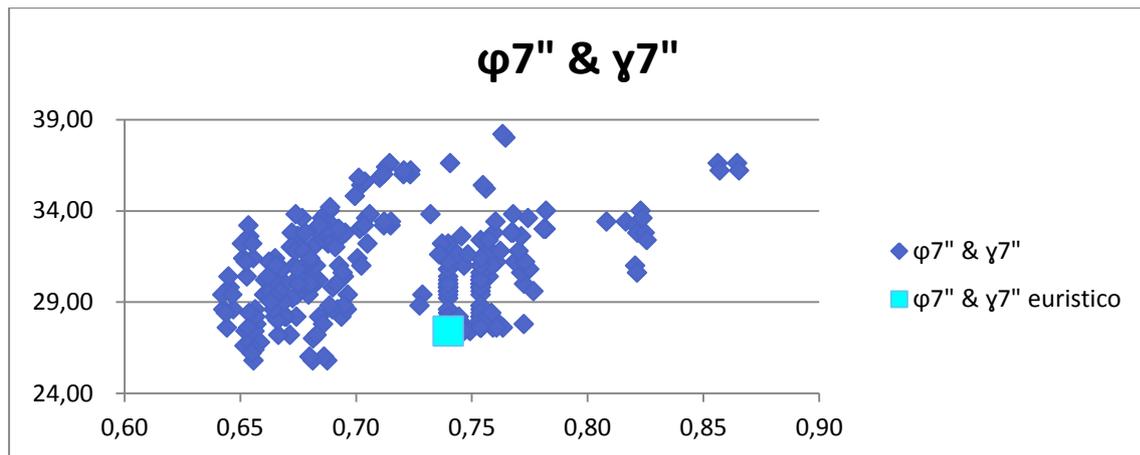


FIGURA 4.54 : rappresentazione degli indici  $\varphi 7''$  e  $\gamma 7''$  con evidenza dello scenario trovato con l'euristico

I grafici appena rappresentati sono solo un'ulteriore conferma a quanto già visto nelle sezioni precedenti: i vari indici ricavati dalla soluzione trovata con il modello euristico rappresentano uno scenario apprezzabile sia dal punto di vista temporale che energetico minimizzando il tempo ciclo e il limite energetico ad esso collegato.

#### 4.3.1 RIPENSAMENTO DEL BILANCIAMENTO CON IL MODELLO EURISTICO IN TERMINI ENERGETICI

Come detto in precedenza, il funzionamento dell'euristico dipende essenzialmente dalla discrezione di chi esegue i calcoli e da chi decide il bilanciamento. Nel caso sopra si è deciso di non sfiorare eccessivamente in termini di tempo penalizzando ovviamente il sistema dal punto di vista energetico. Si cerchi quindi ora di ottimizzare il sistema dal punto di vista energetico piuttosto che dal punto di vista temporale sfruttando nel miglior modo l'energia disponibile in ogni stazione, facendo riferimento alla TABELLA 4.6 in seguito.

stazioni	task disponibili	task assegnati	work load	energy load	idle time	idle energy
1	A	A	24,00	0,38	122,25	6,20
	B,D,E,G,H	B	70,00	2,44	76,25	4,14
	C,D,E,G,H	H	108,00	3,22	38,25	3,36
	C,D,E,G,I	E	133,00	3,71	13,25	2,87
	C,D,F,G,I	F	148,00	3,93	- 1,75	2,65
	C,D,G,I	C	161,00	4,13	- 14,75	2,45
	D,G,I	I	172,00	4,30	- 25,75	2,28
	D,G	D	179,00	4,32	- 32,75	2,26
	G	G	184,00	4,34	- 37,75	2,24
<b>ST 1 A, B, C, D, E, F, G, H, I</b>			<b>184,00</b>	<b>4,34</b>	<b>- 37,75</b>	<b>2,24</b>
2	J,L	J	80,00	6,08	66,25	0,50
<b>ST 2 J</b>			<b>80,00</b>	<b>6,08</b>	<b>66,25</b>	<b>0,50</b>
3	K,L	K	85,00	7,18	61,25	- 0,60
<b>ST 3 K</b>			<b>85,00</b>	<b>7,18</b>	<b>61,25</b>	<b>- 0,60</b>
4	L	L	25,00	0,42	121,25	6,16
	M,N	N	90,00	1,69	56,25	4,89
	M	M	150,00	2,77	- 3,75	3,81
	O	O	195,00	3,46	- 48,75	3,12
	P	P	220,00	3,67	- 73,75	2,91
	Q	Q	236,00	3,84	- 89,75	2,74
<b>ST 4 L, M, N, O, P, Q</b>			<b>236,00</b>	<b>3,84</b>	<b>- 89,75</b>	<b>2,74</b>

TABELLA 4.6 : rappresentazione della configurazione trovata cercando di sfruttare l'energia massima disponibile in ogni stazione

Come nel caso precedente il tempo di riferimento medio è pari a 146,25 s mentre l'energia disponibile pari a 6,58 Kcal.

Alla prima stazione sono assegnati i task A,B,C,D,E,F,G,H,I che complessivamente durano 184 s ("work load") e generano un consumo energetico pari a 4,34 Kcal ("energy load"), confrontando questi valori con i limiti che si erano dati si supera il limite di tempo di 37,75 ("idle time") mentre si ha un risparmio energetico di 2,24 Kcal.

Alla seconda stazione è assegnato il task J che complessivamente dura 80 s e genera un consumo energetico pari a 6,08 Kcal portando così ad un risparmio in termini di tempo di 66,25 s e di un risparmio energetico di 0,50 Kcal.

Alla terza stazione è assegnato anche in questo caso solo un task, il task K, che dura complessivamente 85 s, risparmiando 61,25 s, e che genera un consumo energetico pari a 7,18 Kcal superando il valore di riferimento energetico di 0,6 Kcal.

All'ultima stazione sono assegnati i task rimanenti ovvero L,M,N,O,P,Q. Complessivamente essi durano 236 s e hanno un consumo energetico pari a 3,84 Kcal. Si ha un sovra consumo in termini di tempo pari a 89,75 s e un risparmio energetico pari a 2,74.

Come è possibile notare, a seconda che si decida di ottimizzare il sistema dal punto di vista temporale piuttosto che dal punto di vista energetico, i carichi di ogni stazione in termini energetici e temporali variano. Nel primo caso, in cui il sistema viene ottimizzato più da un punto di vista temporale, il bilanciamento del sistema è maggiormente sfavorito dal punto di vista energetico; nel secondo caso invece, il bilanciamento ne risente maggiormente dal punto di vista temporale, si veda TABELLA 4.7 per avere conferma (si sono evidenziate in grassetto le situazioni più favorevoli).

	M - MST	SX -T	M-MSE	SX-E
primo caso	<b>150,00</b>	<b>10,05</b>	7,75	4,93
secondo caso	236,00	223,25	<b>7,18</b>	<b>3,05</b>

TABELLA 4.7: indici M-MST, M-MSE, SX-T e SX-E dei due casi trovati con l'euristico messi a confronto

#### 4.3.2 ANALISI CON IL MODELLO EURISTICO CON LIMITE ENERGETICO VARIABILE

Nel paragrafo precedente si è svolta l'analisi prendendo come riferimento il tempo ciclo medio e il limite energetico medio; quest'ultimo è stato trovato moltiplicando il dato di tempo per un valore soglia di 2,7 Kcal/min. Si è deciso a questo punto di variare questo valore soglia per capire come gli indici energetici si modificano di conseguenza.

Si sono ricreati altri 5 casi confrontabili con il caso di partenza (evidenziato in rosso in tabella):

CASI	max Kcal/min
CASO 1	2,70
CASO 2	2,60
CASO 3	2,50
CASO 4	2,40
CASO 5	2,30
CASO 6	2,20

TABELLA 4.8 : rappresentazione dei casi con limite energetico massimo accettabile variabile

Si è visto che al variare dei casi sono rimaste costanti le assegnazioni dei task alle varie stazioni. Evidentemente quindi, per quanto riguarda gli indici di tempo non c'è alcuna variazione rispetto al caso di riferimento. Si riporta in seguito la TABELLA 4.9 che rappresenta gli indici di tempo rappresentativi per tutti i casi.

M - MST	SX - T	$\varphi 1$	$\varphi 2$	$\varphi 3$	$\varphi 4$	$\varphi 5$	$\varphi 6$	$\varphi 6''$	$\varphi 7$	$\varphi 7''$	Tc_CL
150,00	10,05	86,00	25,00	31,00	9,00	0,98	127,00	30,85	109,00	27,40	150,00

TABELLA 4.9 : rappresentazione degli indici di tempo dei vari casi con limite energetico massimo accettabile variabile

Gli unici indici che variano sono quelli energetici, si veda la sottostante TABELLA 4.10.

M - MSE	SX - E	$\gamma 1$	$\gamma 2$	$\gamma 3$	$\gamma 4$	$\gamma 5$	$\gamma 6$	$\gamma 6''$	$\gamma 7$	$\gamma 7''$	E_CI	max Kcal/min
7,75	4,93	29,37	7,90	4,74	1,92	0,80	36,70	9,25	3,02	0,74	6,75	2,70
7,75	4,93	27,12	9,65	4,49	2,17	0,83	36,70	9,25	3,02	0,74	6,50	2,60
7,75	4,93	25,09	11,61	4,24	2,42	0,87	36,70	9,25	3,02	0,74	6,25	2,50
7,75	4,93	23,09	13,61	3,99	2,67	0,90	36,70	9,25	3,02	0,74	6,00	2,40
7,75	4,93	21,09	15,61	3,74	2,92	0,94	36,70	9,25	3,02	0,74	5,75	2,30
7,75	4,93	19,09	17,61	3,49	3,17	0,99	36,70	9,25	3,02	0,74	5,50	2,20

TABELLA 4.10 : rappresentazione degli indici energetici dei vari casi con limite energetico massimo accettabile variabile

È utile a questo punto svolgere le seguenti analisi:

- 1) Osservare l'andamento degli indici energetici dei vari casi al variare del limite energetico accettabile;
- 2) Osservare come gli indici dei vari scenari trovati si posizionino all'interno dei vari grafici analizzati in precedenza.

### 1) INDICI ENERGETICI E LIMITE ENERGETICO ACCETTABILE VARIABILE

La variazione del limite energetico accettabile influenza solamente gli indici:  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  e  $\gamma_5$ .

Partendo dalla FIGURA 4.55, si può vedere come all'aumentare del limite energetico aumenti contemporaneamente il valore  $\gamma_1$  in ordinata. Questo fenomeno è dovuto al fatto che all'aumentare dell'energia disponibile vi sia una maggior disponibilità di energia utilizzabile con conseguente risparmio energetico.

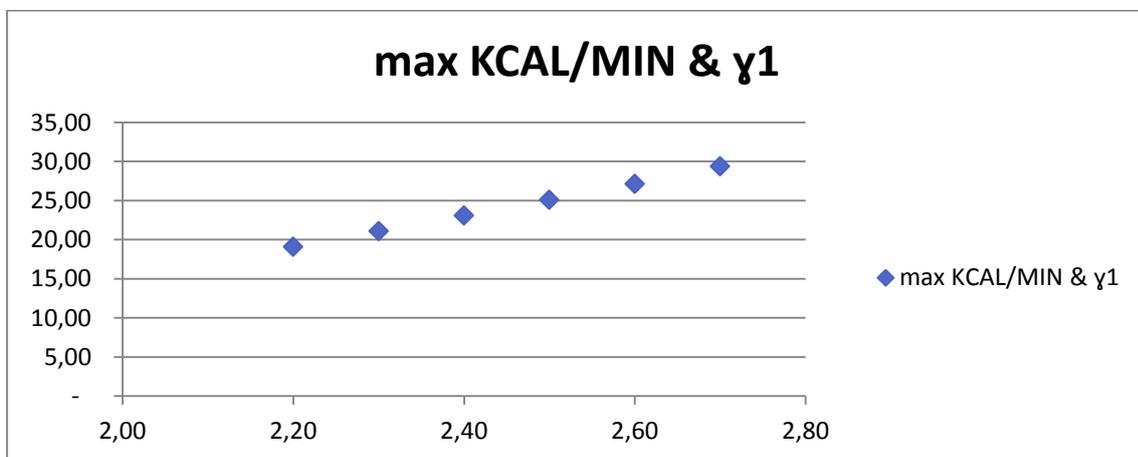


FIGURA 4.55 : rappresentazione del valore scelto come massimo limite energetico accettabile e  $\gamma_1$

In FIGURA 4.56 poi, è possibile vedere come il sovra consumo energetico diminuisca all'aumentare del limite massimo di energia disponibile. Questo grafico si contrappone a quello precedente: all'aumentare dell'energia disponibile è normale che vi sia un minor rischio di superare il limite energetico e pertanto  $\gamma_2$  in ordinata diminuisca.

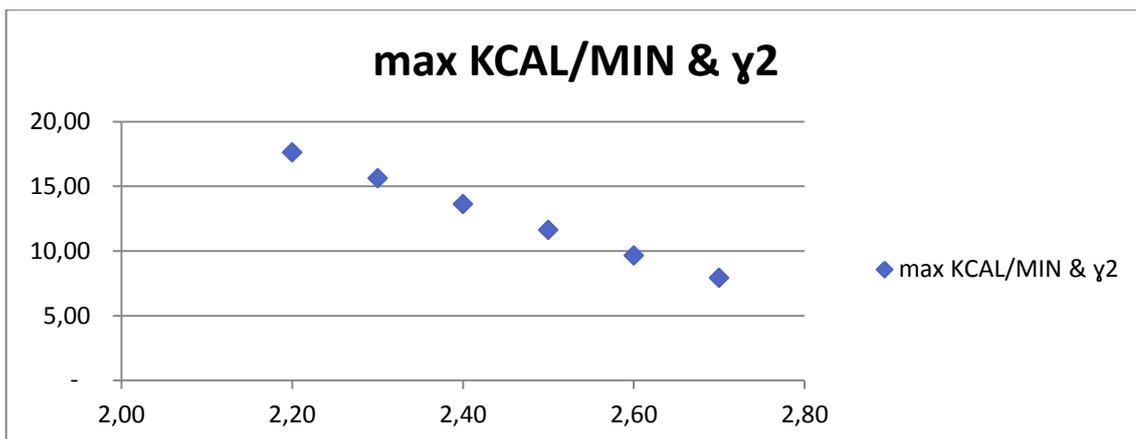


FIGURA 4.56 : rappresentazione del valore scelto come massimo limite energetico accettabile e  $\gamma_2$

Analizzando a questo punto il coefficiente di efficienza energetica  $\gamma_5$ , in ordinata in FIGURA 4.57, si può vedere come all'aumentare dell'energia massima disponibile diminuisca l'efficienza. Questo andamento è dovuto principalmente al fatto che aumentando l'energia disponibile diminuisce la probabilità di ottimizzare le varie stazioni dal punto di vista energetico in quanto contemporaneamente aumenta  $\gamma_1$  e cala  $\gamma_2$ .

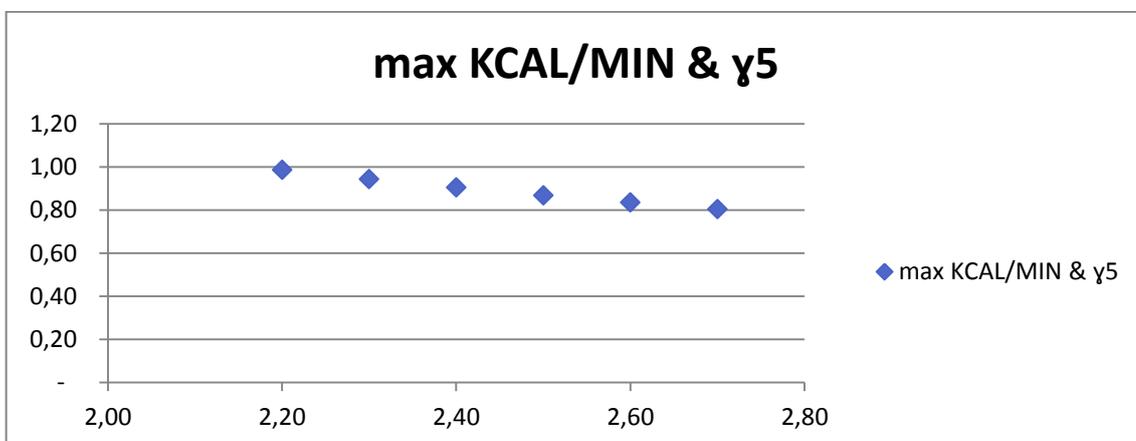


FIGURA 4.57 : rappresentazione del valore scelto come massimo limite energetico accettabile e  $\gamma_5$

Si può notare pertanto che, a parità di configurazione, diminuendo il limite energetico massimo accettabile si ottimizzano ulteriormente le stazioni dal punto di vista energetico. Si vedano i grafici del paragrafo successivo per avere ulteriore conferma.

## 2) INDICI ENERGETICI AL VARIARE DEL LIMITE ENERGETICO ACCETTABILE A CONFRONTO CON GLI SCENARI OTTENUTI CON LA PROGRAMMAZIONE LINEARE

Anche in questo caso si considereranno solamente gli indici che vengono coinvolti dalla variazione del limite energetico accettabile:  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  e  $\gamma_5$ .

Prima di passare ai grafici rappresentativi degli indici sopra menzionati, si faccia riferimento alla FIGURA 4.58, nella quale M-MSE si trova in ascissa mentre M-MST si trova in ordinata, che mostrerà dove le soluzioni dei vari casi si posizioneranno rispetto alle altre soluzioni trovate con il modello di programmazione lineare. La soluzione in questione minimizza il parametro temporale.

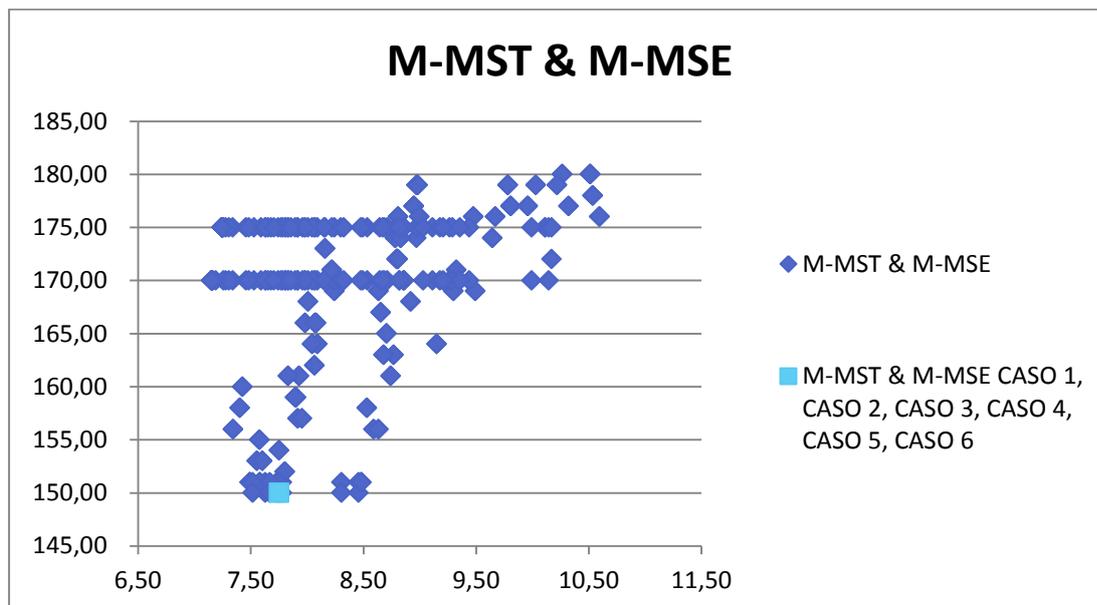


FIGURA 4.58 : rappresentazione delle soluzioni dei vari con limite energetico variabile nel grafico che mette a confronto M-MST e M-MSE degli scenari ottenuti con la programmazione lineare

Si consideri ora anche FIGURA 4.59 rappresentativa degli indici di livellamento ovvero SX-T (in ordinata) e SX-E (in ascissa). Anche in questo caso le soluzioni dei casi a livello massimo energetico variabile sono coincidenti (a causa della stessa formulazione dell'indice) e minimizzano il parametro di tempo.

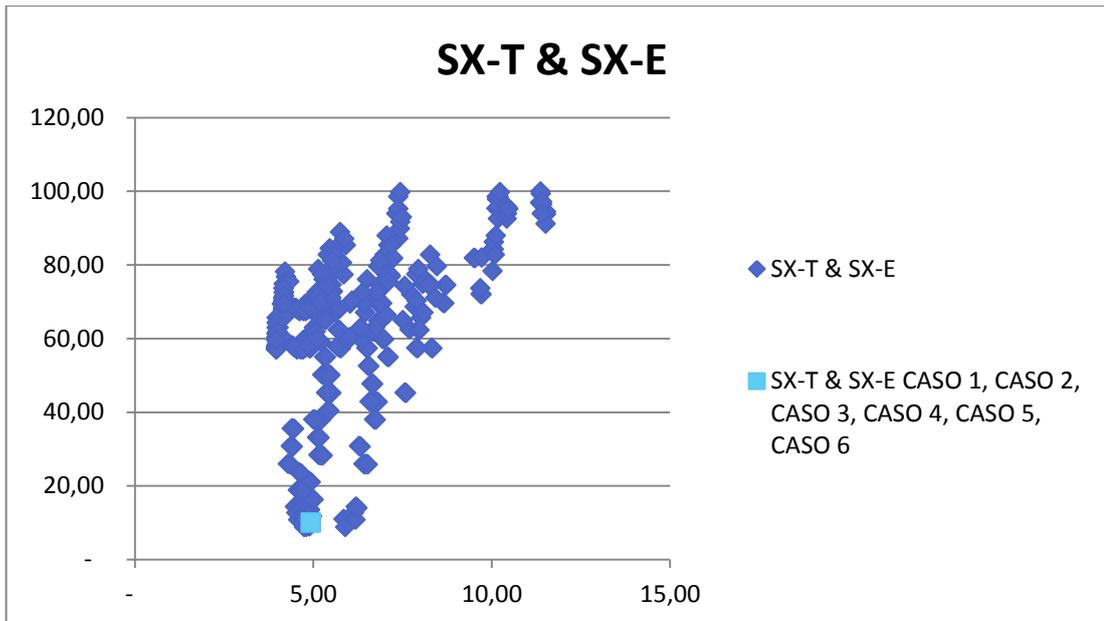


FIGURA 4.59 : rappresentazione delle soluzioni dei vari con limite energetico variabile nel grafico che mette a confronto M-MST e M-MSE degli scenari ottenuti con la programmazione lineare

Si inizi mettendo a confronto i vari casi ottenuti con il modello di programmazione lineare e  $\gamma_1$  in FIGURA 4.60. È possibile vedere come al diminuire del limite energetico accettabile in ascissa diminuisca anche il valore del risparmio energetico  $\gamma_1$ , questo è dovuto al fatto che avendo meno energia a disposizione minore è il rischio che vi sia dell'ozio.

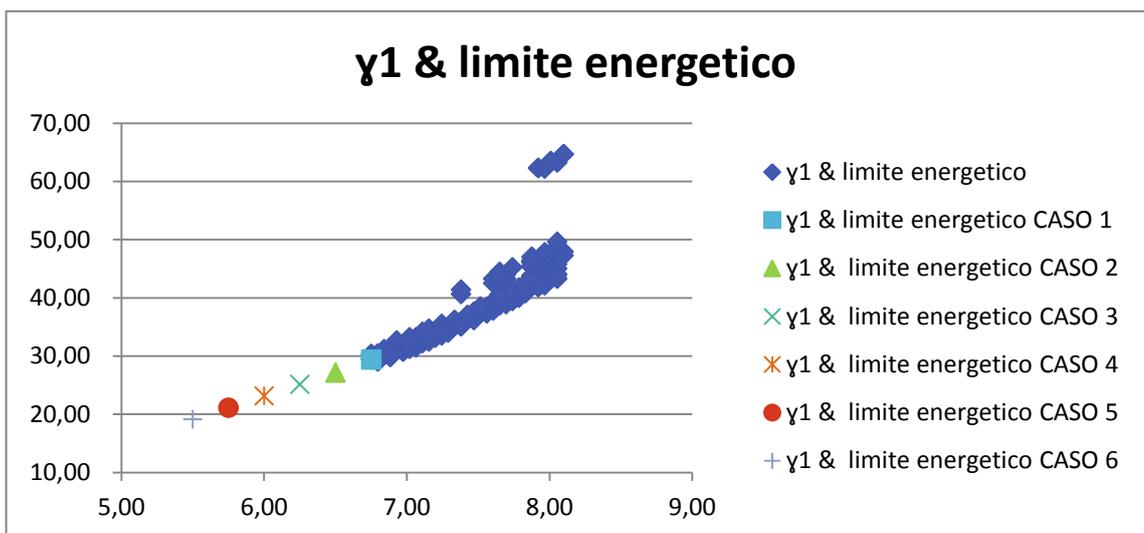


FIGURA 4.60 : rappresentazione di  $\gamma_1$  e del limite energetico degli scenari ottenuti con la programmazione lineare e dei vari casi ottenuti con l'euristico al variare del limite energetico

Proseguendo poi con l'analisi di  $\gamma_2$  al variare del limite energetico in FIGURA 4.61, si può vedere come al diminuire del limite energetico accettabile, aumenti l'indice di sovra consumo energetico. Questo andamento si contrappone a quello del grafico sovrastante in quanto al diminuire del limite energetico c'è un maggior rischio di sorpassare il limite energetico dato.

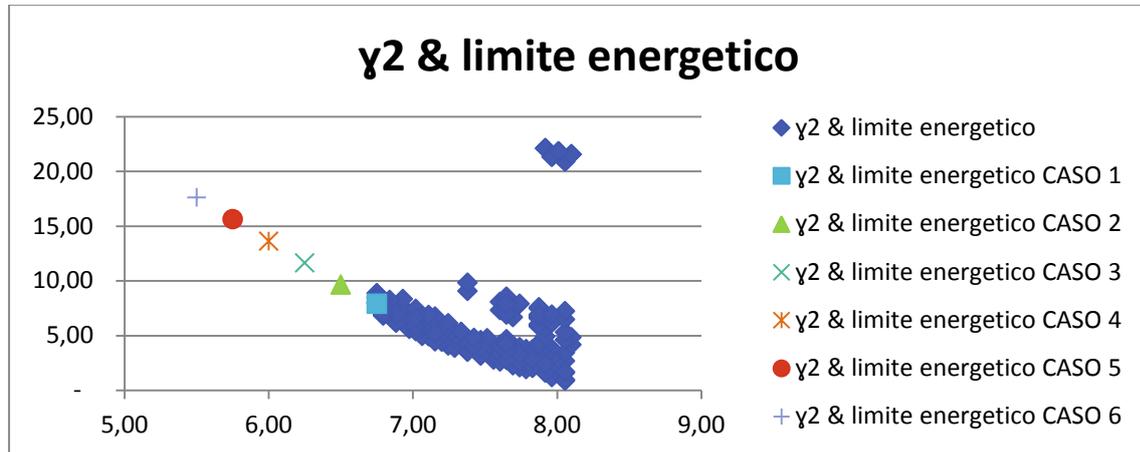


FIGURA 4.61 : rappresentazione di  $\gamma_2$  e del limite energetico degli scenari ottenuti con la programmazione lineare e dei vari casi ottenuti con l'euristico al variare del limite energetico

Procedendo poi con il coefficiente di efficienza  $\gamma_5$ , in FIGURA 4.62, si può vedere come al diminuire del limite energetico accettabile aumenti l'efficienza fino ad arrivare ad un 99% del CASO 6. Questo aumento dell'efficienza energetica non va a discapito dell'efficienza in termini di tempo come si vedrà in seguito.

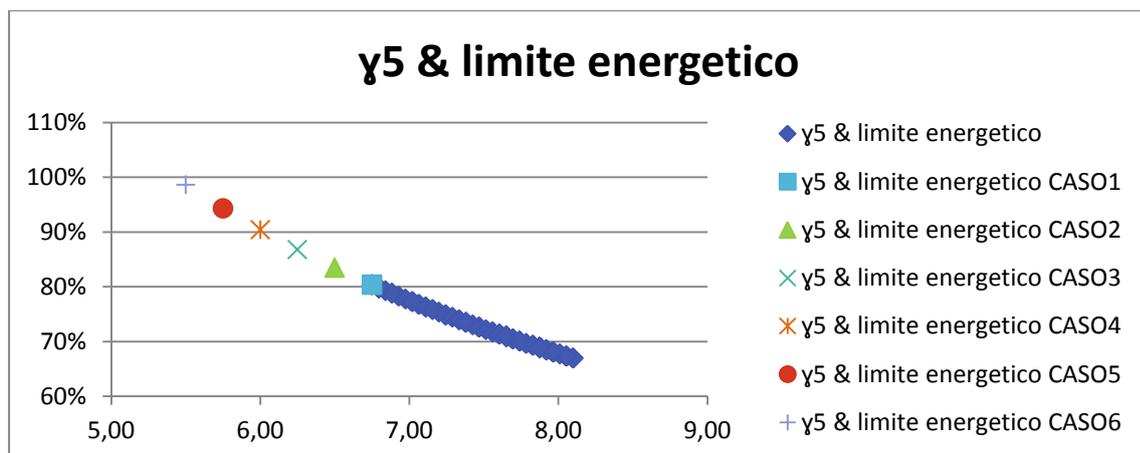


FIGURA 4.62 : rappresentazione di  $\gamma_5$  e del limite energetico degli scenari ottenuti con la programmazione lineare e dei vari casi ottenuti con l'euristico al variare del limite energetico

Di seguito, si riporteranno i grafici dei vari indici degli scenari ottenuti con la programmazione lineare in modo tale da verificare la validità dell'euristico anche variando il limite energetico accettabile.

Si parta dalla FIGURA 4.63, si può vedere come al diminuire del limite energetico la soluzione dell'euristico si sposti verso ad una valore contenuto di  $\gamma_1$  pur mantenendo il valore costante di  $\varphi_1$ .

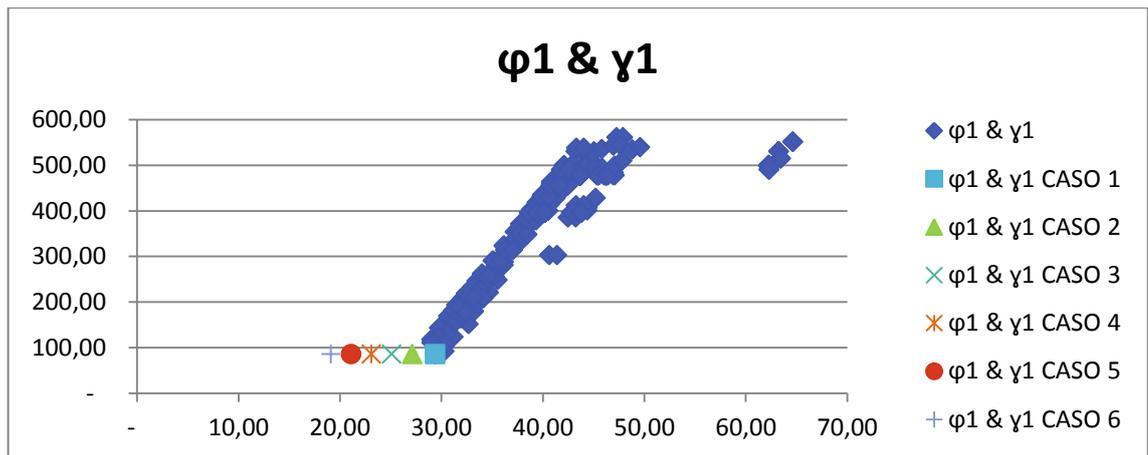


FIGURA 4.63 : rappresentazione di  $\varphi_1$  e  $\gamma_1$  degli scenari ottenuti con la programmazione lineare e dei vari casi ottenuti al variare del limite energetico

In FIGURA 4.64 poi, è possibile vedere come, diminuendo il livello energetico accettabile,  $\gamma_2$  si sposti verso un valore maggiore poichè vi è una maggiore probabilità di superare il limite energetico dato e pertanto vi sarà inevitabilmente un maggiore sovra consumo.

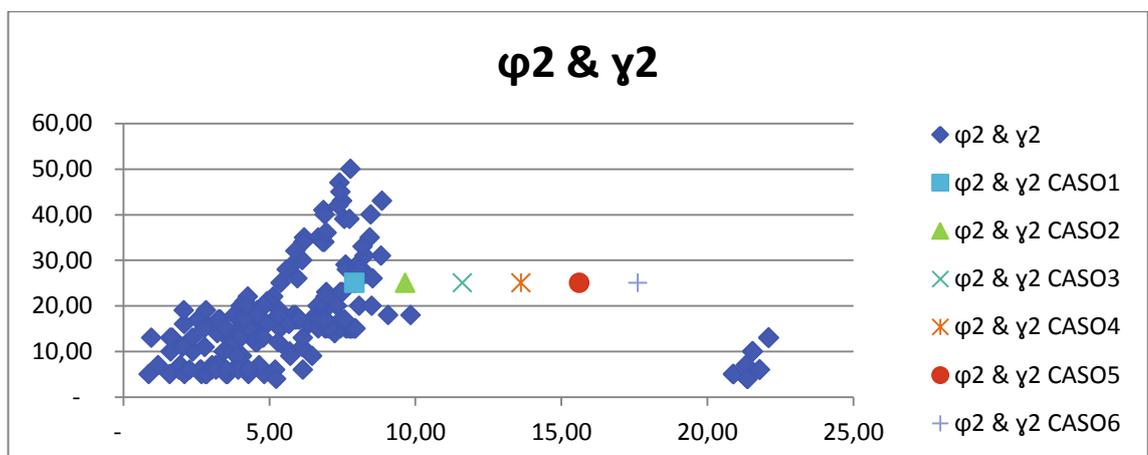


FIGURA 4.64 : rappresentazione di  $\varphi_2$  e  $\gamma_2$  degli scenari ottenuti con la programmazione lineare e dei vari casi ottenuti al variare del limite energetico

Passando infine all'ultimo coefficiente influenzato dalla variazione del limite energetico accettabile ovvero al coefficiente di efficienza energetica  $\varphi_5$  si può vedere in FIGURA 4.65, come al diminuire del limite energetico accettabile aumenti il coefficiente  $\gamma_5$ .

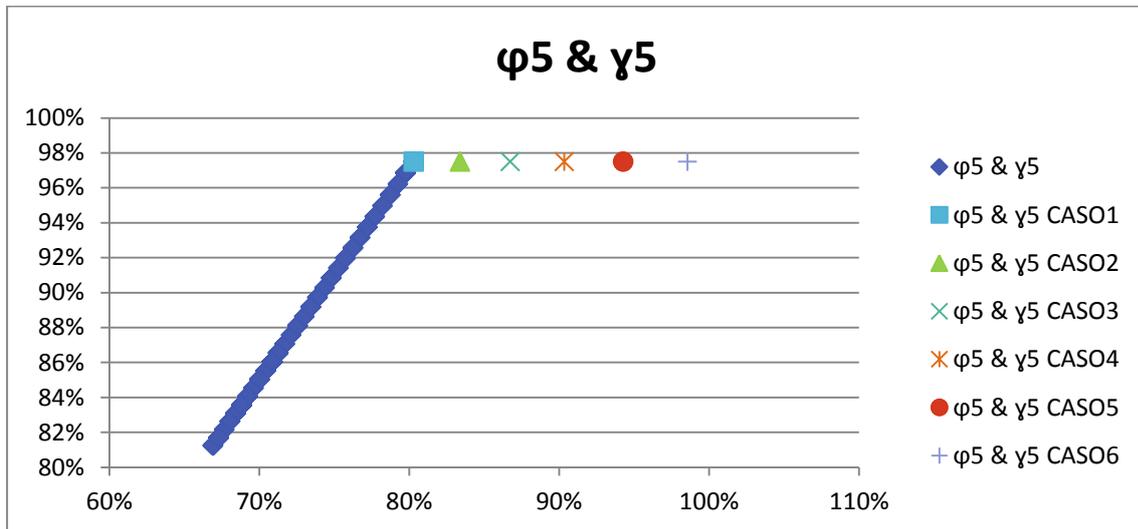


FIGURA 4.65 : rappresentazione di  $\varphi_5$  e  $\gamma_5$  degli scenari ottenuti con la programmazione lineare e dei vari casi ottenuti al variare del limite energetico

In base ai grafici presentati si può affermare che diminuendo la soglia del livello energetico massimo è possibile migliorare i coefficienti  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  e  $\gamma_5$  senza andare a discapito degli altri indici. Questo significa che l'euristico formulato, che presentava già buoni risultati con limite energetico impostato a 2,7 Kcal/min, può essere migliorato ulteriormente abbassando il livello energetico accettabile.

### 4.3.3 ANALISI CON IL MODELLO EURISTICO CON IL RAPPORTO ENERGIA E TEMPO VARIABILE

Si supponga a questo punto dell'analisi di volere approfondire l'efficacia dell'euristico apportando delle modifiche al caso studio finora analizzato. L'obiettivo è quello di capire come si modifichino i vari indici energetici e di tempo al variare del rapporto ET, formula (81):

$$ET = \frac{\sum_j e_j'}{\sum_j t_j'} \quad (81).$$

Si è pensato di mantenere costante il valore di  $t_j'$  del VAM e quindi anche i tempi associati ad ogni modello per ogni task ( $t_{j,Mx}$ ) mentre si è pensato di variare  $e_j'$  e quindi anche tutti le energie associate ai vari modelli per ogni task ( $e_{j,Mx}$ ).

Le dodici situazioni che si sono ottenute sono riportate in TABELLA 4.11 in ordine crescente di ET (il caso studio analizzato nei paragrafi precedenti è evidenziato in rosso):

Task	$t_j'$ [s]	$e_j'$ [kcal]
A	24	0,47
B	46	1,34
C	13	0,45
D	7	0,09
E	25	0,59
F	15	0,44
G	5	0,08
H	38	0,61
I	11	0,48
J	80	2,28
K	85	2,54
L	25	0,50
M	60	0,54
N	65	0,59
O	45	0,46
P	25	0,25
Q	16	0,32

ET 0,021

Task	$t_j'$ [s]	$e_j'$ [kcal]
A	24	0,57
B	46	1,61
C	13	0,54
D	7	0,11
E	25	0,71
F	15	0,53
G	5	0,09
H	38	0,74
I	11	0,58
J	80	2,74
K	85	3,04
L	25	0,60
M	60	0,65
N	65	0,70
O	45	0,55
P	25	0,30
Q	16	0,38

ET 0,025

Task	$t_j'$ [s]	$e_j'$ [kcal]
A	24	0,66
B	46	1,88
C	13	0,63
D	7	0,12
E	25	0,83
F	15	0,62
G	5	0,11
H	38	0,86
I	11	0,67
J	80	3,19
K	85	3,55
L	25	0,70
M	60	0,76
N	65	0,82
O	45	0,64
P	25	0,35
Q	16	0,44

ET 0,029

Task	$t_j'$ [s]	$e_j'$ [kcal]
A	24	0,76
B	46	2,15
C	13	0,72
D	7	0,14
E	25	0,95
F	15	0,70
G	5	0,12
H	38	0,98
I	11	0,77
J	80	3,65
K	85	4,06
L	25	0,80
M	60	0,87
N	65	0,94
O	45	0,74
P	25	0,40
Q	16	0,50

ET 0,033

Task	$t_j'$ [s]	$e_j'$ [kcal]
A	24	0,85
B	46	2,42
C	13	0,81
D	7	0,16
E	25	1,07
F	15	0,79
G	5	0,14
H	38	1,11
I	11	0,87
J	80	4,10
K	85	4,56
L	25	0,90
M	60	0,97
N	65	1,06
O	45	0,83
P	25	0,45
Q	16	0,57

ET 0,037

Task	$t_j'$ [s]	$e_j'$ [kcal]
A	24	0,95
B	46	2,69
C	13	0,90
D	7	0,18
E	25	1,19
F	15	0,88
G	5	0,15
H	38	1,23
I	11	0,96
J	80	4,56
K	85	5,07
L	25	1,00
M	60	1,08
N	65	1,17
O	45	0,92
P	25	0,50
Q	16	0,63

ET 0,041

Task	$t_j'$ [s]	$e_j'$ [kcal]
A	24	1,04
B	46	2,96
C	13	0,99
D	7	0,19
E	25	1,31
F	15	0,97
G	5	0,17
H	38	1,35
I	11	1,06
J	80	5,02
K	85	5,58
L	25	1,10
M	60	1,19
N	65	1,29
O	45	1,01
P	25	0,55
Q	16	0,69

ET 0,045

Task	$t_j'$ [s]	$e_j'$ [kcal]
A	24	1,14
B	46	3,23
C	13	1,08
D	7	0,21
E	25	1,43
F	15	1,06
G	5	0,18
H	38	1,47
I	11	1,16
J	80	5,47
K	85	6,09
L	25	1,20
M	60	1,30
N	65	1,41
O	45	1,10
P	25	0,60
Q	16	0,76

ET 0,049

Task	$t_j'$ [s]	$e_j'$ [kcal]
A	24	1,23
B	46	3,49
C	13	1,17
D	7	0,23
E	25	1,54
F	15	1,14
G	5	0,20
H	38	1,60
I	11	1,25
J	80	5,93
K	85	6,59
L	25	1,30
M	60	1,41
N	65	1,53
O	45	1,19
P	25	0,65
Q	16	0,82

ET 0,053

Task	$t_j'$ [s]	$e_j'$ [kcal]
A	24	1,33
B	46	3,76
C	13	1,26
D	7	0,25
E	25	1,66
F	15	1,23
G	5	0,21
H	38	1,72
I	11	1,35
J	80	6,38
K	85	7,10
L	25	1,40
M	60	1,52
N	65	1,64
O	45	1,29
P	25	0,70
Q	16	0,88

ET 0,058

Task	$t_j'$ [s]	$e_j'$ [kcal]
A	24	1,42
B	46	4,03
C	13	1,35
D	7	0,26
E	25	1,78
F	15	1,32
G	5	0,23
H	38	1,84
I	11	1,45
J	80	6,84
K	85	7,61
L	25	1,50
M	60	1,62
N	65	1,76
O	45	1,38
P	25	0,75
Q	16	0,95

ET 0,062

Task	$t_j'$ [s]	$e_j'$ [kcal]
A	24	1,51
B	46	4,30
C	13	1,44
D	7	0,28
E	25	1,90
F	15	1,41
G	5	0,24
H	38	1,97
I	11	1,54
J	80	7,30
K	85	8,11
L	25	1,60
M	60	1,73
N	65	1,88
O	45	1,47
P	25	0,80
Q	16	1,01

ET 0,066

TABELLA 4.11 : rappresentazione di casi studio con  $e_j'$  variabile e quindi con il rapporto energia e tempo variabile (ET)

Si è notato come al variare di  $e_j'$  e quindi anche di conseguenza  $e_j''$  l'assegnazione dei task alle varie stazioni non sia cambiato. Per il motivo appena palesato quindi gli indici temporali non subiscono alcuna modifica come visibile in TABELLA 4.12, gli indici che vengono intaccati sono invece quelli energetici come si può vedere in TABELLA 4.13.

M - MST	SX - T	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\varphi_5$	$\varphi_6$	$\varphi_6''$	$\varphi_7$	$\varphi_7''$	Tc_CL
150,00	10,05	86,00	25,00	31,00	9,00	98%	127,00	30,85	109,00	27,40	150,00

TABELLA 4.12 : rappresentazione degli indici di tempo con i rispettivi valori costanti per i dodici casi con ET variabile

ET \ INDICI	0,021	0,025	0,029	0,033	0,037	0,041	0,045	0,049	0,053	0,058	0,062	0,066
M - MSE	3,88	4,65	5,43	6,20	6,98	7,75	8,53	9,30	10,08	10,85	11,63	12,40
SX - E	2,46	2,96	3,45	3,94	4,43	4,93	5,42	5,91	6,41	6,90	7,39	7,88
$\gamma_1$	64,82	56,18	47,48	39,14	33,68	29,37	26,99	24,46	22,07	19,61	17,20	14,73
$\gamma_2$	-	-	-	0,28	3,47	7,90	14,11	20,32	26,47	32,69	38,87	45,04
$\gamma_3$	5,74	5,57	5,34	5,09	4,94	4,74	4,54	4,28	4,13	3,92	3,75	3,55
$\gamma_4$	-	-	-	0,18	1,05	1,92	2,79	3,65	4,62	5,52	6,25	7,12
$\gamma_5$	40%	48%	56%	64%	72%	80%	88%	97%	104%	113%	120%	129%
$\gamma_6$	64,82	56,18	47,48	39,42	37,15	36,70	41,10	44,78	48,54	52,30	56,07	59,77
$\gamma_6''$	16,16	14,01	11,82	9,81	9,23	9,25	10,41	11,33	12,24	13,24	14,19	15,13
$\gamma_7$	1,55	1,94	2,18	2,48	2,85	3,02	3,27	3,39	3,97	4,36	4,50	4,78
$\gamma_7''$	0,39	0,45	0,50	0,58	0,66	0,74	0,76	0,79	0,95	1,04	1,02	1,11
E_CI	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75

TABELLA 4.13 : rappresentazione di casi studio con  $e_j'$  variabile e quindi con il rapporto energia e tempo variabile (ET)

A questo punto è interessante esaminare al variare di ET (in ascissa) come sia l'andamento dei vari indici energetici (in ordinata).

Si cominci prendendo in considerazione la FIGURA 4.66, nella quale si può notare come all'aumentare di ET aumenti anche il Mini-Max Station Energy (M-MSE).

Questo è dovuto al fatto che all'aumentare dei dati di  $e_j'$ , a parità di configurazione, si ha un aumento del valore massimo di energia delle stazioni.

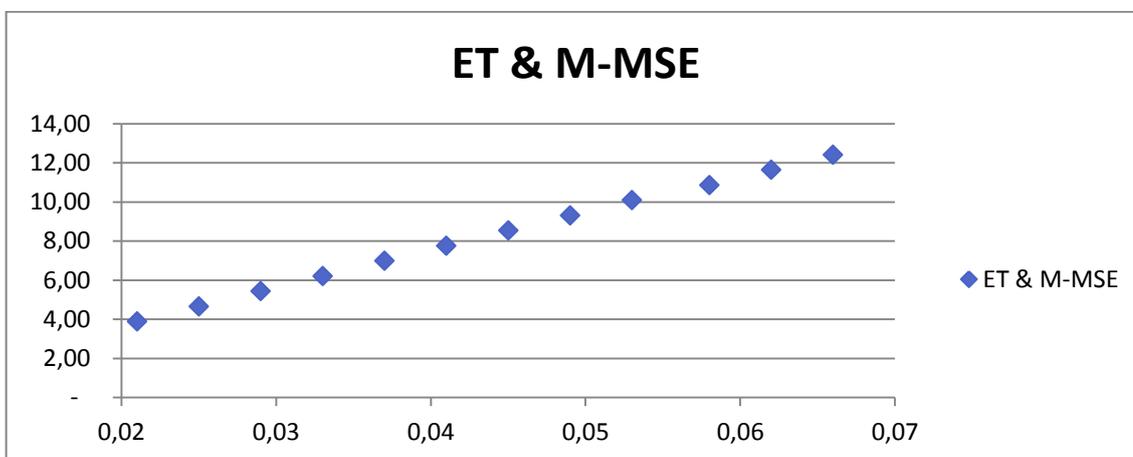


FIGURA 4.66 : rappresentazione di M-MSE al variare di ET

Si passi ora alla FIGURA 4.67 sottostante, in questo caso si mette a confronto l'Energy Smoothness Index (SX-E) con ET. È possibile constatare come all'aumentare di ET e quindi dei vari valori di  $e_j'$  aumenti SX-E a causa di uno sbilanciamento energetico maggiore.

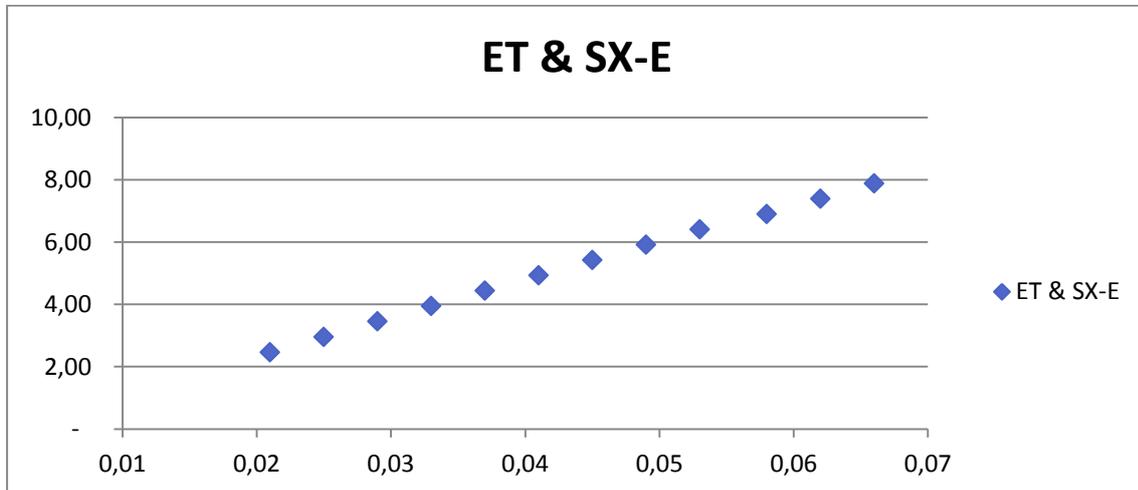


FIGURA 4.67 : rappresentazione di SX-E al variare di ET

Passando poi agli indici energetici si può vedere in FIGURA 4.68 come all'aumentare del rapporto tra energia e tempo diminuisca l'indice  $\gamma_1$ : all'aumentare di ET, a parità di  $t_j'$  e di configurazione, c'è per ogni task un aumento di  $e_j'$  che porta ad avere una riduzione del risparmio energetico in quanto si riesce meglio a saturare il limite.

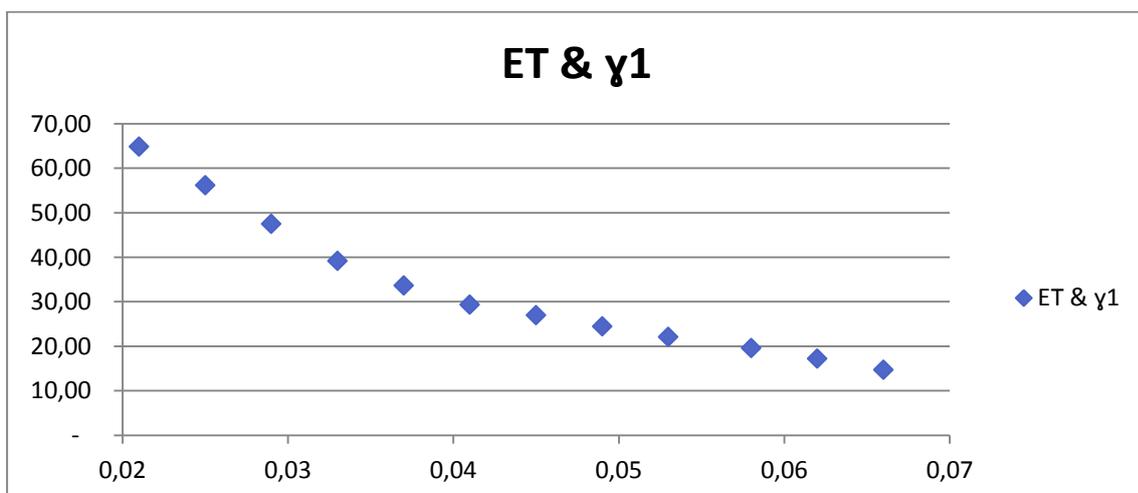


FIGURA 4.68 : rappresentazione di  $\gamma_1$  al variare di ET

In maniera contrapposta a quanto detto sopra si può vedere in FIGURA 4.69 come l'indice di sovra consumo energetico aumenti all'aumentare di ET. Questo andamento è dovuto al fatto che a parità di limite energetico e all'aumentare degli  $e_j$  si ha meno risparmio energetico per stazione. Questo il più delle volte si traduce in un superamento del limite energetico e quindi ad un aumento di  $\gamma_2$ .

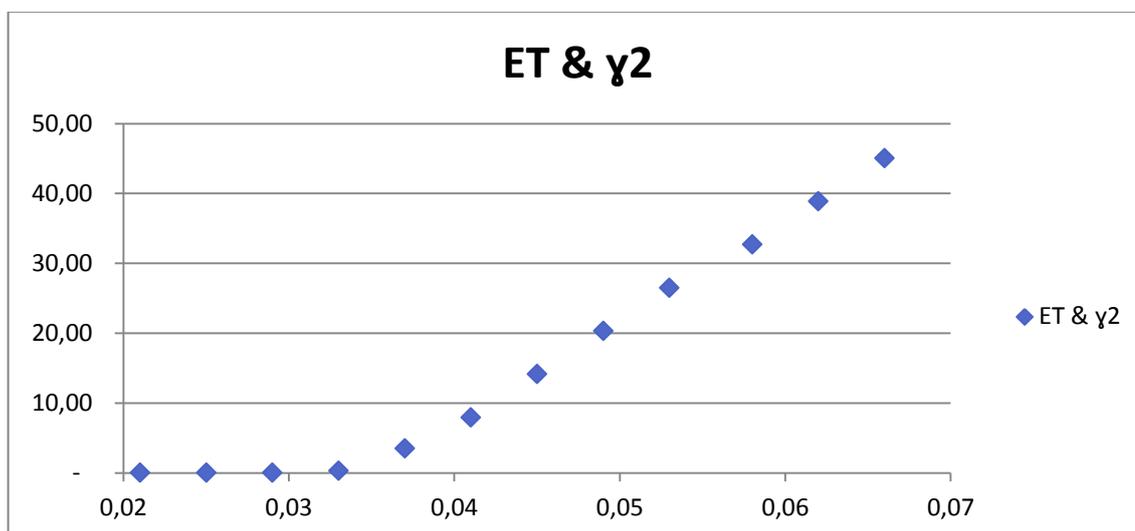


FIGURA 4.69 : rappresentazione di  $\gamma_2$  al variare di ET

Per quanto riguarda l'indice di efficienza energetica  $\gamma_5$  in FIGURA 4.70, si può vedere come aumenti all'aumentare di ET. L'andamento del grafico è la conseguenza del fatto che il limite energetico è sempre lo stesso e all'aumentare dei vari  $e_j$  si riescono a saturare meglio le varie stazioni dal punto di vista energetico (si supera addirittura il 100%).

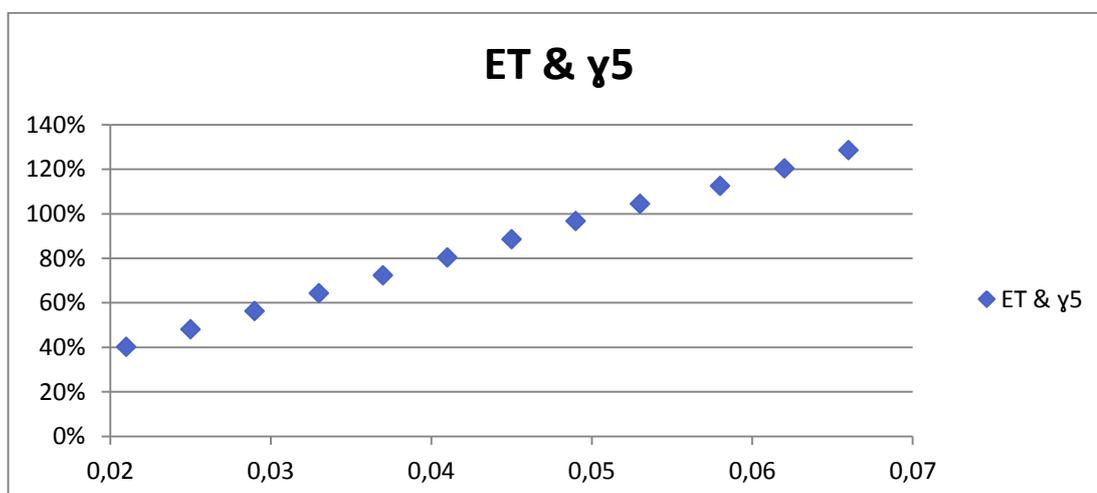


FIGURA 4.70 : rappresentazione di  $\gamma_5$  al variare di ET

Per quanto riguarda poi gli indici di sbilanciamento dei vari modelli sulle varie stazioni,  $\gamma_6$  e  $\gamma_6''$  in FIGURA 4.71 e FIGURA 4.72, si può vedere come lo sbilanciamento aumenti al variare di ET a causa dell'aumento dei valori di  $e_j'$ .

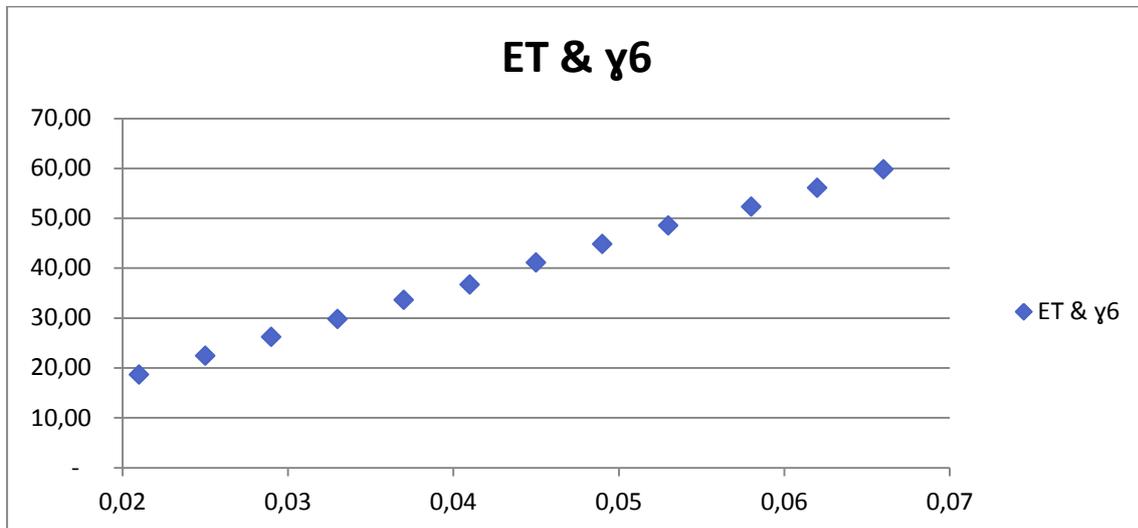


Figura 4.71 : rappresentazione di  $\gamma_6$  al variare di ET

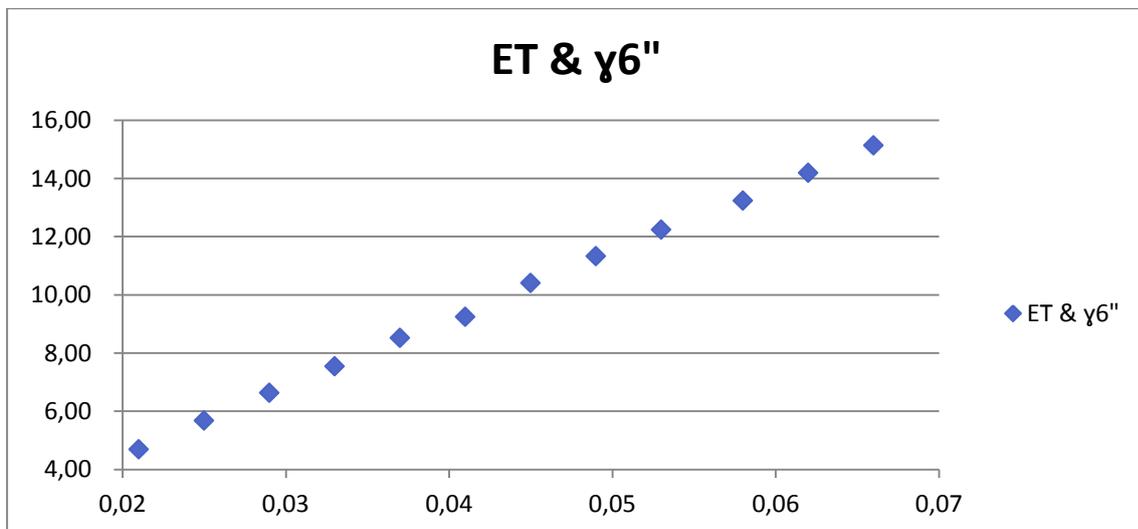


FIGURA 4.72 : rappresentazione di  $\gamma_6''$  al variare di ET

Per quanto riguarda infine gli indici di sbilanciamento tra le varie stazioni e tra i vari modelli,  $\gamma_7$  e  $\gamma_7''$  in FIGURA 4.73 e FIGURA 4.74, si può vedere come anche in questo caso lo sbilanciamento aumenti all'aumentare di ET.

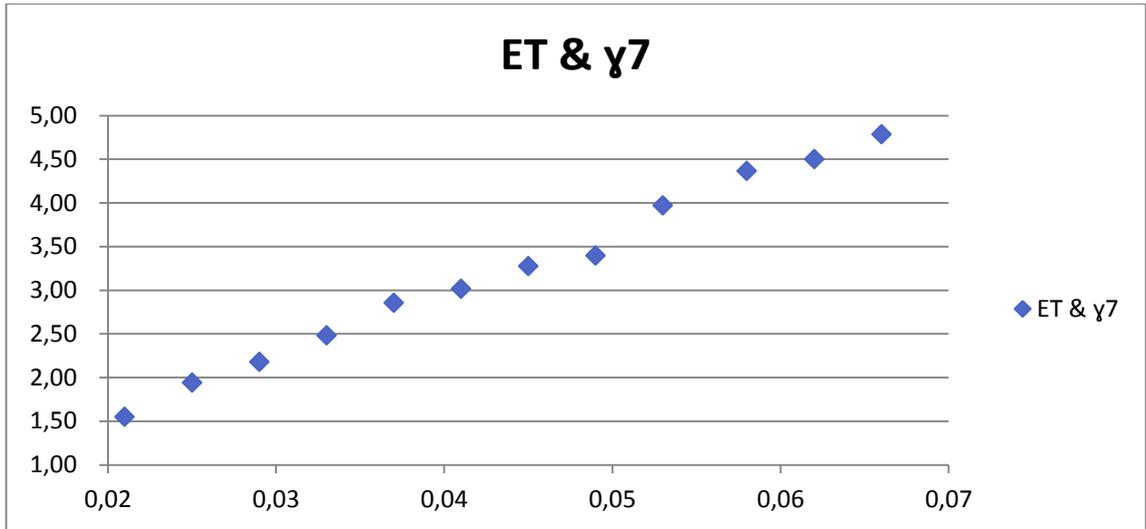


FIGURA 4.73 : rappresentazione di  $\gamma_7$  al variare di ET

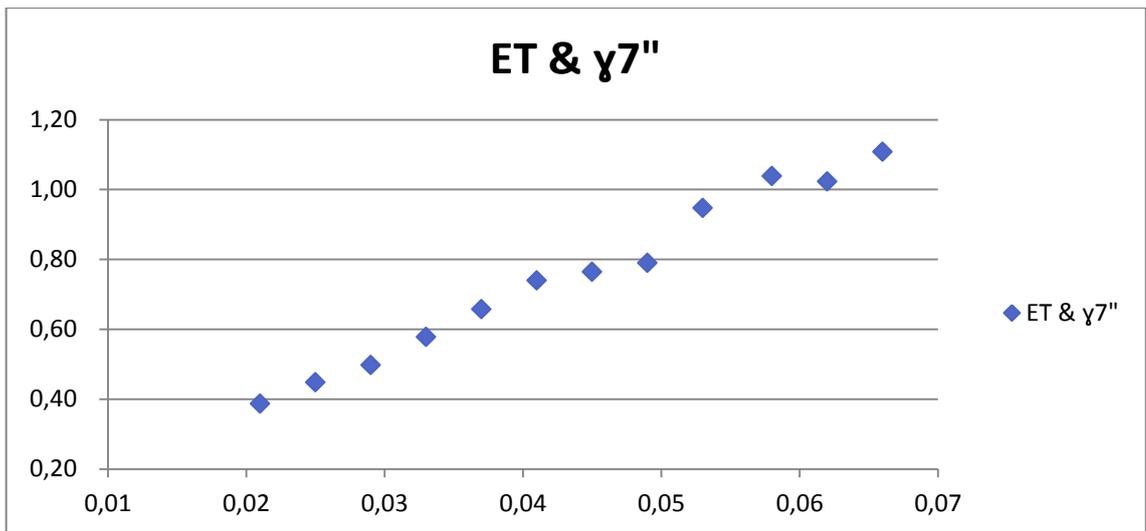


FIGURA 4.74 : rappresentazione di  $\gamma_7''$  al variare di ET

Si può quindi in generale vedere che all'aumentare di ET, a parità di  $t_j'$  e di configurazione, M-MSE aumenta, SX-E aumenta,  $\gamma_1$  diminuisce,  $\gamma_2$  aumenta,  $\gamma_5$  aumenta,  $\gamma_6$  e  $\gamma_6''$  aumentano e  $\gamma_7$  e  $\gamma_7''$  aumentano. A seconda dell'obiettivo che ci si prefigge si può privilegiare ET ridotto se si vuole ottimizzare M-MSE, SX-E,  $\gamma_6$  e  $\gamma_6''$  e  $\gamma_7$  e  $\gamma_7''$  oppure ET elevato se si vuole privilegiare l'efficienza  $\gamma_5$ ,  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ .

---

#### 4.3.4 ANALISI CON IL MODELLO EURISTICO CON IL RAPPORTO ENERGIA E TEMPO COSTANTE E CON COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE VARIABILE

---

Come ultima analisi, per riuscire ad approfondire ulteriormente la validità dell'euristico, si è mantenuto costante il rapporto energia e tempo ET introdotto nel paragrafo precedente e si è deciso invece di modificare il coefficiente di correlazione tra il tempo e l'energia. Dato un insieme di coppie di variabili  $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)$  il coefficiente di correlazione di Pearson viene definito come (82):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (82)$$

dove:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (83)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (84)$$

sono le medie campionarie.

Il coefficiente di correlazione è una quantità adimensionale che varia da -1 a +1 (quando R coincide con questi valori si parla di correlazione lineare esatta).

Nel caso specifico che si andrà ad analizzare le variabili sono rappresentate dai valori del VAM  $e_j'$  e  $t_j'$ .

Anche in questo caso, come nel paragrafo 3.3.2, si è preso il caso di partenza di riferimento e si sono modificati i dati ricreando altri nove casi distinti con R variabile. La strategia che si è voluta seguire è la seguente: si sono mantenuti costanti i tempi creando delle nuove combinazioni mescolando i dati energetici. I casi trovati sono rappresentati in TABELLA 4.14, il caso di partenza è evidenziato in rosso.

CASO 1			CASO 2			CASO 3			CASO 4			CASO 5		
Task	$t_i$ [s]	$e_i$ [kcal]												
A	24	0,95	A	24	0,92									
B	46	2,69	B	46	1,19	B	46	1,19	B	46	1,19	B	46	1,23
C	13	0,90	C	13	0,63									
D	7	0,18												
E	25	1,19	E	25	1,00									
F	15	0,88												
G	5	0,15												
H	38	1,23	H	38	1,08									
I	11	0,96	I	11	0,50									
J	80	4,56	J	80	4,56	J	80	2,69	J	80	1,23	J	80	5,07
K	85	5,07	K	85	4,56									
L	25	1,00	L	25	0,96									
M	60	1,08	M	60	1,23	M	60	1,23	M	60	2,69	M	60	1,19
N	65	1,17	N	65	2,69	N	65	4,56	N	65	4,56	N	65	2,69
O	45	0,92	O	45	1,17									
P	25	0,50	P	25	0,95									
Q	16	0,63	Q	16	0,90									

R	0,814
---	-------

R	0,893
---	-------

R	0,843
---	-------

R	0,791
---	-------

R	0,887
---	-------

CASO 6			CASO 7			CASO 8			CASO 9			CASO 10		
Task	$t_i$ [s]	$e_i$ [kcal]	Task	$t_i$ [s]	$e_i$ [kcal]									
A	24	0,92	A	24	0,92									
B	46	1,23	B	46	1,23	B	46	5,07	B	46	5,07	B	46	1,17
C	13	0,63	C	13	0,88									
D	7	0,18	D	7	0,18									
E	25	0,88	E	25	0,63									
F	15	1,19	F	15	1,19									
G	5	0,15	G	5	0,15	G	5	0,15	G	5	0,96	G	5	0,96
H	38	1,00	H	38	1,00									
I	11	0,50	I	11	0,50	I	11	0,50	I	11	0,90	I	11	0,90
J	80	2,69	J	80	1,08	J	80	1,08	J	80	1,08	J	80	1,08
K	85	4,56	K	85	4,56									
L	25	0,96	L	25	0,96	L	25	0,96	L	25	0,15	L	25	5,07
M	60	5,07	M	60	5,07	M	60	1,23	M	60	2,69	M	60	2,69
N	65	1,08	N	65	2,69	N	65	2,69	N	65	1,23	N	65	1,23
O	45	1,17	O	45	0,15									
P	25	0,95	P	25	0,95									
Q	16	0,90	Q	16	0,90	Q	16	0,90	Q	16	0,50	Q	16	0,50

R	0,775
---	-------

R	0,732
---	-------

R	0,636
---	-------

R	0,591
---	-------

R	0,404
---	-------

TABELLA 4.14 : rappresentazione di casi studio con ET costante e con R variabile

Ordinando i casi in base al coefficiente di correlazione crescente si ottiene la tabella sottostante TABELLA 4.15.

	R
CASO 10	0,404085
CASO 9	0,591042
CASO 8	0,636456
CASO 7	0,731961
CASO 6	0,774675
CASO 4	0,791321
CASO 1	0,813652
CASO 3	0,843113
CASO 5	0,887407
CASO 2	0,892971

TABELLA 4.15 : rappresentazione del valore di correlazione in ordine crescente

Per ogni caso si è ricalcolato l'euristico per determinare se il dato energetico influenzasse le assegnazione dei task alle varie stazioni: la configurazione però è rimasta costante come si può vedere nella tabella sottostante, TABELLA 4.16.

stazioni	task disp	task ass
1	A	A
	B,D,E,G,H	B
	C,D,E,G,H	H
	C,D,E,G,I	E
	C,D,F,G,I	F
ST 1		
2	C,D,G,I	C
	D,G,I	I
	D,G	D
	G	G
	J,L	J
	K,L	L
ST 2		
3	K	K
	M,N	N
ST 3		
4	M	M
	O	O
	P	P
	Q	Q
ST 4		

TABELLA 4.16 : rappresentazione dell'assegnazione dei task alle stazioni con R variabile

Gli indici di tempo quindi non sono variati perché, come detto, la durata dei task e le assegnazioni è rimasta costante. Sono variati invece gli indici energetici come si può vedere nella tabella sottostante, TABELLA 4.17.

	R	M - MSE	SX - E	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$	$\gamma_6''$	$\gamma_7$	$\gamma_7''$
CASO 10	0,404	9,08	7,15	38,96	4,25	4,80	1,22	68%	29,19	7,41	6,71	1,63
CASO 9	0,591	9,06	7,16	34,06	4,25	4,97	1,22	72%	28,07	6,97	4,00	1,04
CASO 8	0,636	9,06	7,57	38,44	10,55	5,02	2,73	73%	38,71	9,59	4,29	1,12
CASO 7	0,732	8,09	5,48	36,39	12,26	5,02	2,73	76%	45,68	10,94	5,19	1,26
CASO 6	0,775	8,09	4,82	27,75	5,26	4,22	1,20	78%	30,05	7,05	5,54	1,35
CASO 4	0,791	9,63	8,48	43,35	21,54	4,83	6,52	78%	53,98	12,97	6,06	1,47
CASO 1	0,814	7,75	4,93	29,37	7,90	4,74	1,92	80%	36,70	9,25	3,02	0,74
CASO 3	0,843	9,63	8,38	41,41	21,54	4,31	6,52	80%	53,01	12,72	6,16	1,50
CASO 5	0,887	7,49	4,06	32,34	14,12	4,36	2,73	82%	45,51	11,17	5,61	1,37
CASO 2	0,893	7,76	4,49	32,28	22,69	4,31	4,49	90%	54,05	13,42	10,41	2,49

TABELLA 4.17 : rappresentazione degli indici energetici dei casi con R variabile

È utile a questo punto capire come al variare di R, mantenendo ET costante, si modifichino i vari indici.

Si inizi ad analizzare la FIGURA 4.75 con il coefficiente di correlazione in ascissa e il Mini-Max Station Energy in ordinata. All'aumentare di R tendenzialmente il M-MSE diminuisce, questo è dovuto al fatto che all'aumentare della correlazione tra tempo ed energia non solo si riesce ad ottimizzare dal punto di vista temporale, ma contemporaneamente anche dal punto di vista energetico.

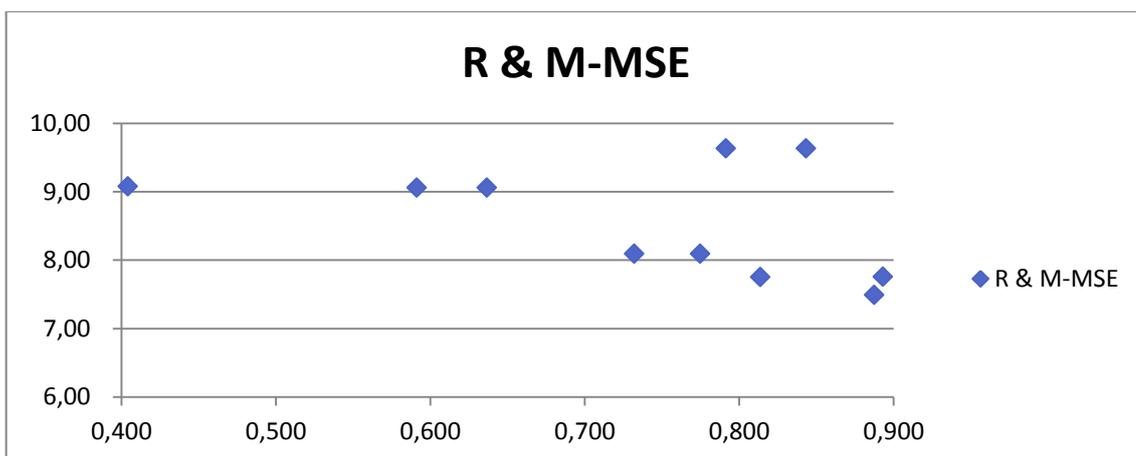


FIGURA 4.75 : rappresentazione di M-MSE al variare di R

Discorso analogo a quanto appena detto vale per la FIGURA 4.76. All'aumentare di R lo sbilanciamento delle stazioni (SX-E) diminuisce in quanto, maggiore è la correlazione tra energia e tempo, più si ottimizzano le stazioni in termini di tempo più si ottimizzano anche dal punto di vista energetico.

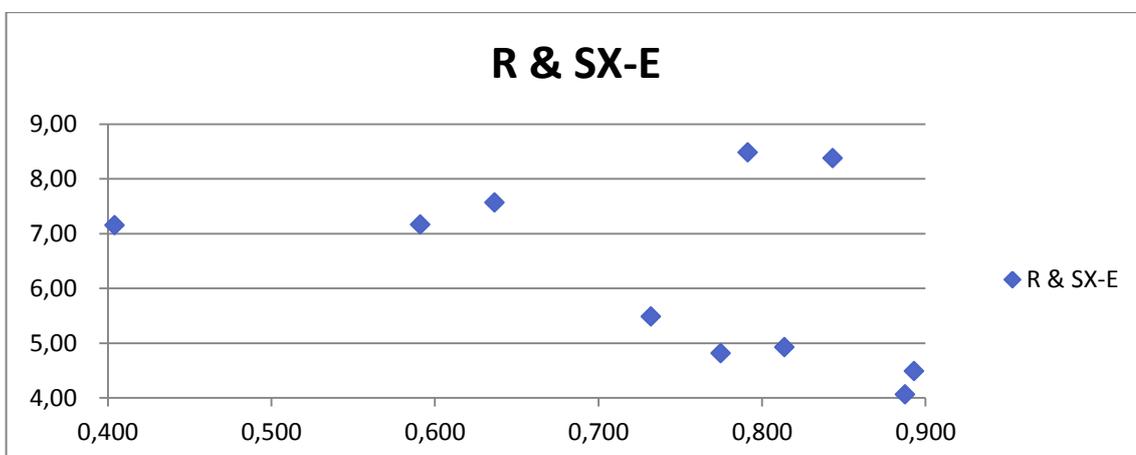


FIGURA 4.76 : rappresentazione di SX-E al variare di R

Passando poi agli indici energetici, se si comincia ad analizzare la FIGURA 4.77, si può vedere come all'aumentare di R cali  $\gamma_1$ , questo fenomeno è sintomo di una diminuzione dell'ozio energetico a favore di una maggiore ottimizzazione della stazione dal punto di vista energetico.

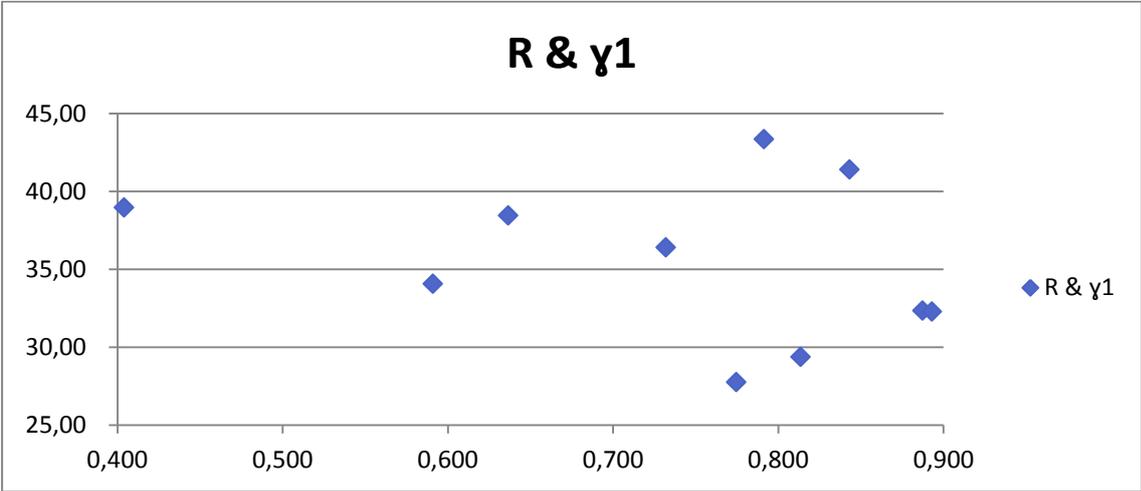


FIGURA 4.77 : rappresentazione di  $\gamma_1$  al variare di R

In maniera simile a quanto esposto sopra, in FIGURA 4.78 si può vedere come all'aumentare di R aumenti  $\gamma_2$ . Questo andamento trova spiegazione nel fatto che aumentando la correlazione tra tempo ed energia oltre ad avvicinarsi al tempo ciclo medio ci si avvicina assai anche al valore limite medio di energia disponibile. A volte ci si avvicina troppo a questo limite e per tanto si incombe in un sovra consumo energetico.

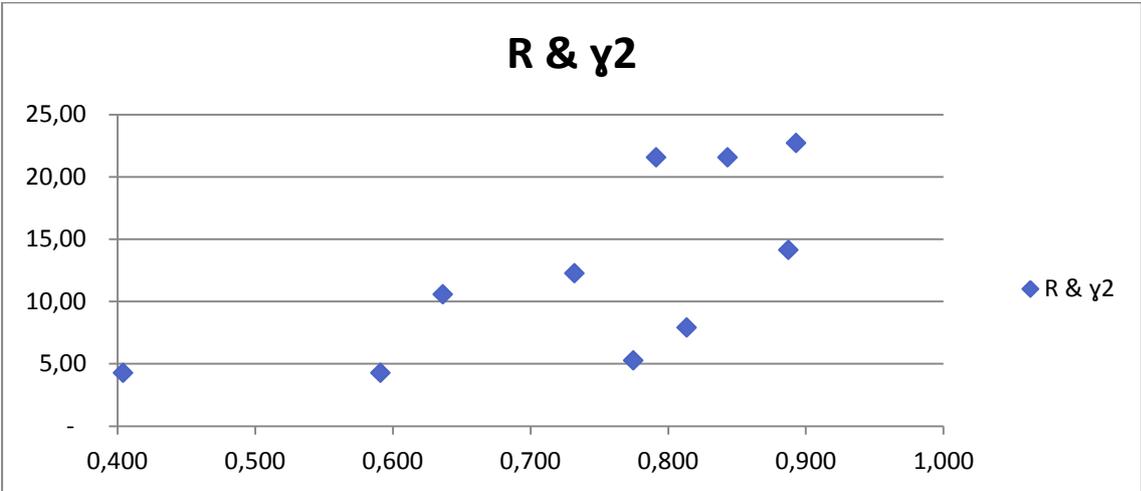


FIGURA 4.78 : rappresentazione di  $\gamma_2$  al variare di R

Analizzando poi la correlazione in relazione all'indice di efficienza energetica, in FIGURA 4.79, si può vedere come all'aumentare della correlazione aumenti  $\gamma_5$ . Di conseguenza quanto più aumenta R più si ottimizza, come già detto, la stazione anche dal punto di vista energetico.

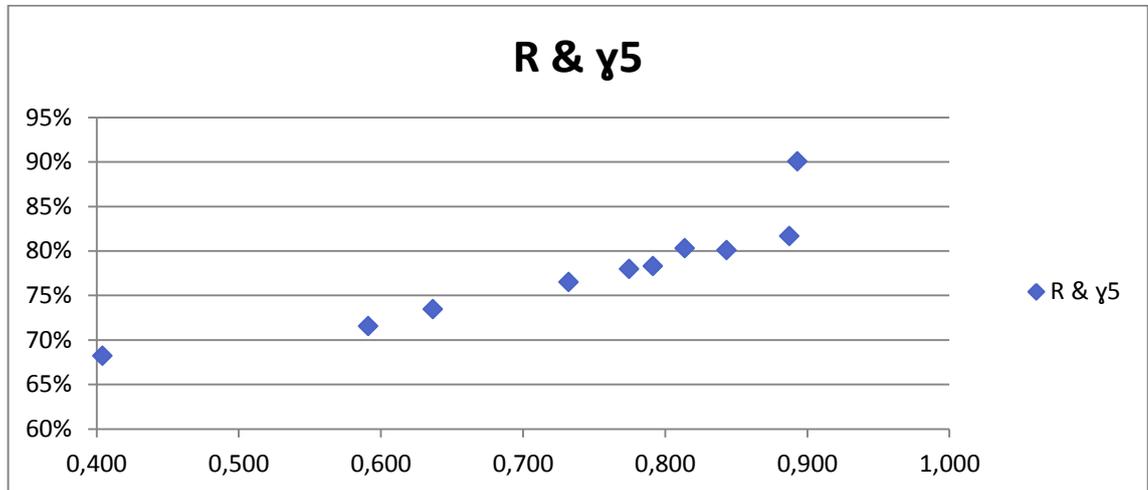


FIGURA 4.79 : rappresentazione di  $\gamma_5$  al variare di R

Considerando a questo punto gli indici di sbilanciamento  $\gamma_6$  e  $\gamma_6''$ , si può vedere come tendenzialmente all'aumentare di R essi aumentino. Tutto questo trova spiegazione in quanto già detto, ovvero più aumenta R più l'ottimizzazione dei due parametri è l'uno conseguenza dell'altro. Si faccia riferimento alla FIGURA 4.80 e FIGURA 4.81.

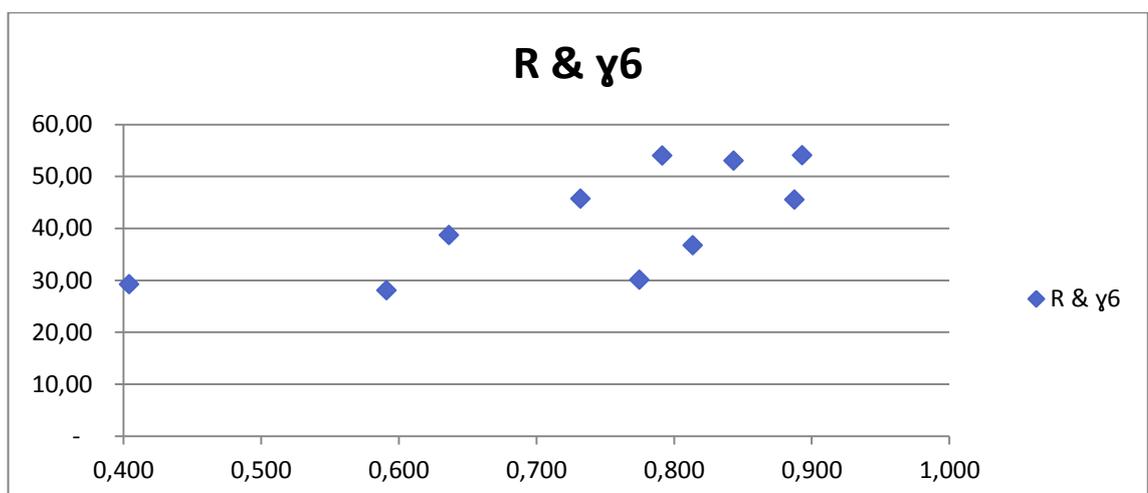


FIGURA 4.80 : rappresentazione di  $\gamma_6$  al variare di R

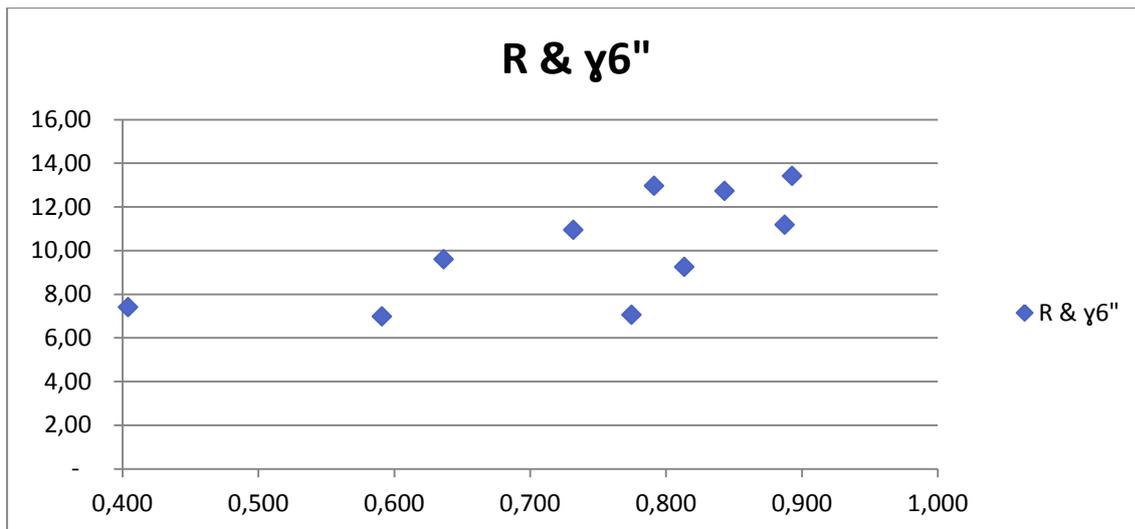


FIGURA 4.81 : rappresentazione di  $\gamma 6''$  al variare di R

Infine, lo stesso discorso vale anche per gli indici  $\gamma 7$  e  $\gamma 7''$  in ordinata rispettivamente in FIGURA 4.82 e FIGURA 4.83.

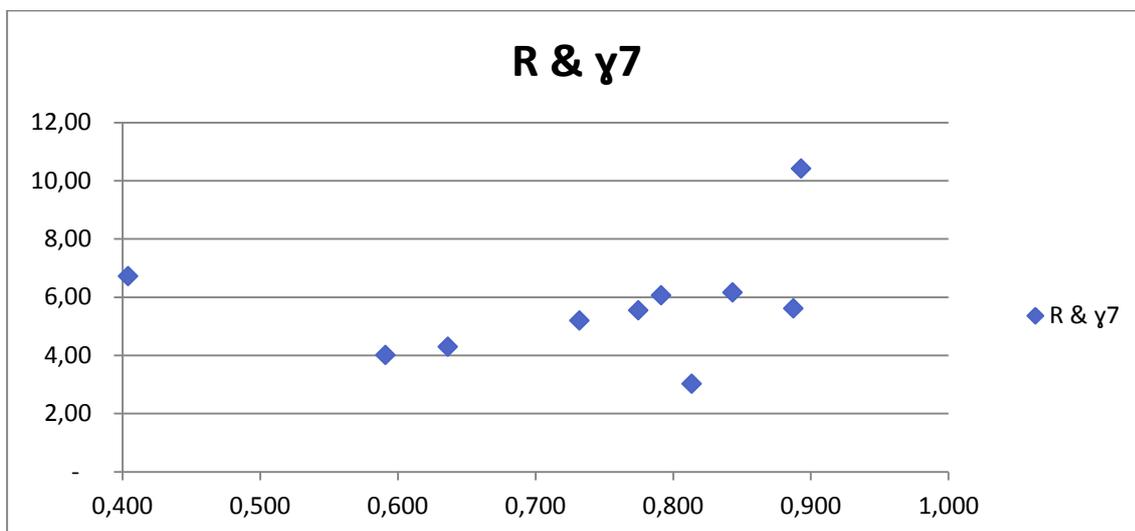


FIGURA 4.82 : rappresentazione di  $\gamma 7$  al variare di R

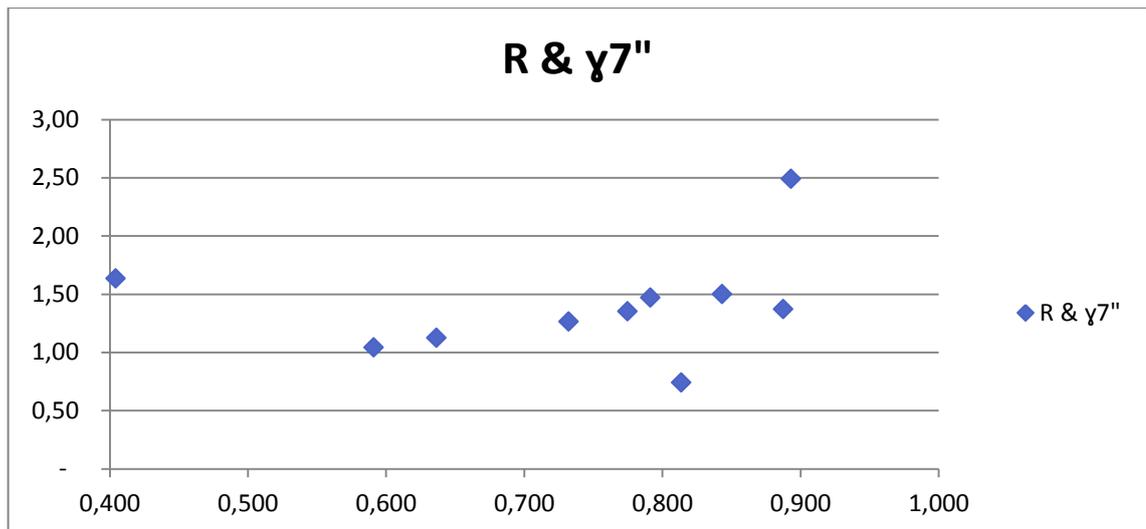


FIGURA 4.83 : rappresentazione di  $\gamma 7''$  al variare di R

Ricapitolando quindi osservando i vari grafici all'aumentare di R:

- tendenzialmente diminuisce il valore medio dell'energia;
- tendenzialmente diminuisce il coefficiente di livellamento;
- tendenzialmente diminuisce il risparmio energetico totale;
- tendenzialmente aumenta il rischio di superare il limite medio di energia accettabile per stazione;
- tendenzialmente aumenta l'efficienza;
- tendenzialmente aumenta lo sbilanciamento tra la stessa stazione.

Come già detto questi risultati derivano dal fatto che: maggiore è R, maggiore è la correlazione tra tempo ed energia e, dato che l'euristico si basa sull'ottimizzazione del tempo, più aumenta R più l'euristico non solo ottimizza il tempo ma ottimizza anche il sistema dal punto di vista energetico.



## 5 CONCLUSIONI

---

Nel testo si sono proposti due approcci multi-obiettivo per risolvere problemi mixed model che sono riusciti ad integrare il concetto di produttività a quello di ergonomia di una linea di assemblaggio, trovando delle soluzioni che rappresentano un trade off tra i due obiettivi. Le soluzioni trovate con il modello di programmazione lineare e il modello euristico sono state poi valutate attraverso degli indici di tempo e di energia. La peculiarità dello studio sulla quale porre l'attenzione è che la soluzione trovata con il metodo euristico ha dato buoni risultati se paragonata con le soluzioni trovate con il modello di programmazione lineare: il metodo euristico è meno oneroso dal punto di vista dei calcoli e può essere facilmente utilizzato per una rapida valutazione. Per dimostrare la validità dell'euristico si sono svolti ulteriori studi: si è variato il limite medio energetico accettabile (precedentemente fissato a 2,7 Kcal/min) mantenendo il limite medio temporale costante e si è visto come, a parità di configurazione, al diminuire del valore energetico sono migliorati i vari indici ergonomici. Si è deciso poi di vedere come le soluzioni variavano al variare del rapporto ET, a parità di dati, e si è visto che all'aumentare del valore c'è stato un miglioramento dell'efficienza del sistema a discapito però di un maggior sbilanciamento energetico. Come ultima verifica si è deciso di modificare il coefficiente di correlazione tra i dati di tempo e di energia dei vari task, mantenendo i valori numerici costanti ma mescolandoli, e si è visto come all'aumentare della correlazione i risultati siano migliorati anche se a discapito di un maggior sbilanciamento energetico tra le stazioni.

Si faccia riferimento alla seguente tabella in modo da avere un quadro sintetico della situazione, TABELLA 5.1 e TABELLA 5.2:

<b>APPROCCI MULTI-OBIETTIVO MIXED MODEL</b>			
<b>MODELLO DI PROGRAMMAZIONE LINEARE</b>			
<b>RIFERIMENTO NELLA LETTERATURA</b>	<b>ASPETTO INNOVATIVO INTRODOTTO</b>	<b>VALUTAZIONE DELLE SOLUZIONI</b>	
<i>Multi-objective SALBP model</i> , di Battini, D., Delorme, X., Dolgui, A., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rielaborazione del modello per casi mixed model;</li> <li>- valutazione delle soluzioni tramite indici di tempo ed indici ergonomici/energetici.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- le funzioni obiettivo riadattate prevedevano una minimizzazione di: <ul style="list-style-type: none"> <li>• M-MST e MSE;</li> <li>• SX-T e SX-E.</li> </ul> </li> <li>Si è visto come le soluzioni accettabili migliori siano da ricercare nella frontiera efficiente di Pareto;</li> <li>- le soluzioni accettabili trovate sono state valutate anche in base agli indici introdotti; si è dedotto che le scenari migliori sono quelli con tempo ciclo ridotto e limite energetico accettabile ridotto.</li> </ul>	

TABELLA 5.1 : rappresentazione riassuntiva del modello di programmazione lineare introdotto nel trattato con valutazione dei risultati ottenuti

<b>APPROCCI MULTI-OBIETTIVO MIXED MODEL</b>			
<b>MODELLO EURISTICO</b>			
<b>RIFERIMENTO NELLA LETTERATURA</b>	<b>ASPETTO INNOVATIVO INTRODOTTO</b>	<b>VALUTAZIONE DELLE SOLUZIONI</b>	
<i>Largest Candidate Rule, LCR</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rielaborazione del modello per casi mixed model;</li> <li>- si è utilizzato il modello per valutare il sistema anche dal punto di vista ergonomico (il modello della letteratura è stato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- la soluzione trovata è stata messa a confronto con le altre soluzioni trovate con il modello di programmazione lineare. Si sono valutati inizialmente M-MST, M-MSE, SX-T e SX-E; successivamente si sono</li> </ul>	

	<p>pensato solo per la valutazione della produttività);</p> <p>- si sono utilizzati dei riferimenti medi e non massimi per il bilanciamento delle stazioni: <math>tm'</math> ed <math>em'</math> (i riferimenti medi possono anche essere superati);</p> <p>- la soluzione trovata viene valutata in base agli indici di tempo e agli indici ergonomici/energetici.</p>	<p>considerati tutti gli altri indici. Da questo confronto si è visto come l'euristico dia una soluzione del tutto accettabile ed apprezzabile (tempo ciclo e limite energetico contenuti e soluzione che si trova all'interno della frontiera efficiente di Pareto);</p> <p>- si è deciso di variare il limite energetico accettabile : si è visto come, abbassandolo, gli indici <math>\gamma_1</math>, <math>\gamma_2</math> e <math>\gamma_5</math> siano migliorati senza andare a discapito di nessun altro parametro di valutazione;</p> <p>- si è deciso di variare il rapporto di energia e tempo ET: si è visto come, all'aumentare del rapporto, il sistema migliori dal punto di vista dell'efficienza (<math>\gamma_1</math>, <math>\gamma_2</math> e <math>\gamma_5</math>) seppur si abbia un leggero peggioramento degli altri indici di livellamento e sbilanciamento;</p> <p>- si è deciso infine di variare il coefficiente di correlazione R: si è visto come, aumentandolo, il sistema migliori dal punto degli indici <math>\gamma_1</math>, <math>\gamma_2</math> e <math>\gamma_5</math> seppur a discapito degli altri; più elevato è R più il sistema non solo viene ottimizzato dal punto di vista produttivo ma anche dal punto di vista ergonomico/energetico.</p>
--	---	---

TABELLA 5.2 : rappresentazione riassuntiva del modello euristico introdotto nel trattato con valutazione dei risultati ottenuti

Il concetto di ergonomia nelle linee di assemblaggio è, come si è visto, un tema quasi del tutto inesplorato anche se di fondamentale importanza dal punto di vista operativo in quanto i problemi che possono insorgere per posture scorrette o carichi errati possono portare a perdite di produttività e quindi ad una vanificazione della progettazione fatta solo dal punto di vista produttivo. È fondamentale quindi riuscire a trovare nuove metodologie che permettano di calcolare in rapidità la migliore configurazione sia dal punto di vista energetico-ergonomico che dal punto di vista produttivo.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

---

Battini, D., Delorme, X., Dolgui, A., & Sgarbossa, F. (2015). Assembly line balancing with ergonomics paradigms: two alternative methods. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 586-591.

Battini, D., Delorme, X., Dolgui, A., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2015). Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure: a multi-objective model. *International Journal of Production Research*, 1-22.

Battini, D., Faccio, M., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2011). New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(1), 30-42.

Bautista Valhondo, J., Batalla García, C., Alfaro Pozo, R., & Cano Pérez, A. (2013). Extended models for TSALBP with ergonomic risk constraints.

Cheshmehgaz, H. R., Haron, H., Kazemipour, F., & Desa, M. I. (2012). Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 63(2), 503-512.

Cohen, Y. (2012). Absenteeism as a major cause of bottlenecks in assembly lines. *International Journal of Production Research*, 50(21), 6072-6080.

Colombini, D., & Occhipinti, E. (2006). Preventing upper limb work-related musculoskeletal disorders (UL-WMSDs): New approaches in job (re) design and current trends in standardization. *Applied ergonomics*, 37(4), 441-450.

Garg, A., Chaffin, D. B., & Herrin, G. D. (1978). Prediction of metabolic rates for manual materials handling jobs. *The American Industrial Hygiene Association Journal*, 39(8), 661-674.

Gökçen, H., & Erel, E. (1998). Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 34(2), 451-461.

Karhu, O., Kansil, P., & Kuorinka, I. (1977). Correcting working postures in industry: a practical method for analysis. *Applied ergonomics*, 8(4), 199-201.

McAtamney, L., & Corlett, E. N. (1993). RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied ergonomics*, 24(2), 91-99.

Occhipinti, E. (1998). OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics*, 41(9), 1290-1311.

Otto, A., & Scholl, A. (2011). Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 212(2), 277-286.

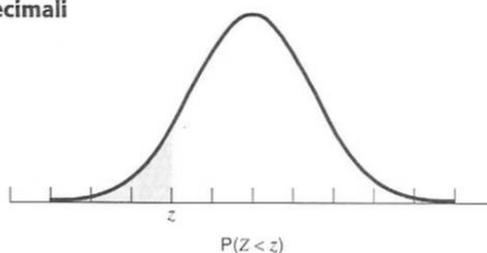
Price, A. D. (1990). Calculating relaxation allowances for construction operatives—Part 1: Metabolic cost. *Applied ergonomics*, 21(4), 311-317.

Scott, G. B., & Lambe, N. R. (1996). Working practices in a perchery system, using the OVAKO Working Posture Analysing System (OWAS). *Applied Ergonomics*, 27(4), 281-284.

# APPENDICE A

## TAVOLE DELLA DISTRIBUZIONE NORMALE STANDARD

Approssimazione a due decimali



<b>z</b>	<b>0.00</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>	<b>0.09</b>
-3.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-3.8	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
-3.7	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
-3.6	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
-3.5	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
-3.4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002
-3.3	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003
-3.2	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005
-3.1	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0007	0.0007
-3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010
-2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
-2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
-2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
-2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
-2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
-2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
-2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
-2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
-2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
-2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
-1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
-1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
-1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
-1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
-1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
-1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
-1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
-1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
-1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
-1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
-0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
-0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
-0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
-0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
-0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
-0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
-0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
-0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
-0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
<b>0.0</b>	<b>0.5000</b>	<b>0.4960</b>	<b>0.4920</b>	<b>0.4880</b>	<b>0.4840</b>	<b>0.4801</b>	<b>0.4761</b>	<b>0.4721</b>	<b>0.4681</b>	<b>0.4641</b>

<b>z</b>	<b>0.00</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>	<b>0.09</b>
<b>0.0</b>	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
<b>0.1</b>	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
<b>0.2</b>	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
<b>0.3</b>	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
<b>0.4</b>	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
<b>0.5</b>	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
<b>0.6</b>	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
<b>0.7</b>	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
<b>0.8</b>	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
<b>0.9</b>	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
<b>1.0</b>	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
<b>1.1</b>	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
<b>1.2</b>	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
<b>1.3</b>	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
<b>1.4</b>	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
<b>1.5</b>	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
<b>1.6</b>	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
<b>1.7</b>	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
<b>1.8</b>	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
<b>1.9</b>	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
<b>2.0</b>	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
<b>2.1</b>	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
<b>2.2</b>	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
<b>2.3</b>	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
<b>2.4</b>	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
<b>2.5</b>	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
<b>2.6</b>	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
<b>2.7</b>	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
<b>2.8</b>	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
<b>2.9</b>	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
<b>3.0</b>	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990
<b>3.1</b>	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9993	0.9993
<b>3.2</b>	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9995	0.9995
<b>3.3</b>	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997
<b>3.4</b>	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998
<b>3.5</b>	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998
<b>3.6</b>	0.9998	0.9998	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
<b>3.7</b>	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
<b>3.8</b>	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
<b>3.9</b>	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

# APPENDICE B

**Stoop Lift [kcal/movement] - for  $h_1 < h_2 \leq 0.81$**

$$\Delta E = 10^{-2}[0.325 \cdot BW \cdot (0.81 - h_1) + (1.41 \cdot L + 0.76 \cdot S \cdot L)(h_2 - h_1)]$$

$$\Delta E = 10^{-2}[0.325 \cdot BW \cdot (0.81 - h_1)] + 10^{-2}[1.41 \cdot L \cdot (h_2 - h_1)] + 10^{-2}[0.76 \cdot S \cdot L \cdot (h_2 - h_1)]$$

Stoop Lift [kcal/movement] = sum of terms from the following tables										
		h1								
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
BW	60	0.1580	0.1385	0.1190	0.0995	0.0800	0.0605	0.0410	0.0215	0.0020
	65	0.1711	0.1500	0.1289	0.1077	0.0866	0.0655	0.0444	0.0232	0.0021
	70	0.1843	0.1615	0.1388	0.1160	0.0933	0.0705	0.0478	0.0250	0.0023
	75	0.1974	0.1731	0.1487	0.1243	0.0999	0.0756	0.0512	0.0268	0.0024
	80	0.2106	0.1846	0.1586	0.1326	0.1066	0.0806	0.0546	0.0286	0.0026
	85	0.2238	0.1961	0.1685	0.1409	0.1133	0.0856	0.0580	0.0304	0.0028
	90	0.2369	0.2077	0.1784	0.1492	0.1199	0.0907	0.0614	0.0322	0.0029
	95	0.2501	0.2192	0.1883	0.1575	0.1266	0.0957	0.0648	0.0340	0.0031
100	0.2633	0.2308	0.1983	0.1658	0.1333	0.1008	0.0683	0.0358	0.0033	
to be multiple for L		h1								
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
h2	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.1	0.0014	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.2	0.0028	0.0014	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.3	0.0042	0.0028	0.0014	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.4	0.0056	0.0042	0.0028	0.0014	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.5	0.0071	0.0056	0.0042	0.0028	0.0014	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.6	0.0085	0.0071	0.0056	0.0042	0.0028	0.0014	0.0000	0.0000	0.0000
	0.7	0.0099	0.0085	0.0071	0.0056	0.0042	0.0028	0.0014	0.0000	0.0000
0.8	0.0113	0.0099	0.0085	0.0071	0.0056	0.0042	0.0028	0.0014	0.0000	
Only for males - to be multiple for L		h1								
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
h2	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.1	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.2	0.0015	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.3	0.0023	0.0015	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.4	0.0030	0.0023	0.0015	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.5	0.0038	0.0030	0.0023	0.0015	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.6	0.0046	0.0038	0.0030	0.0023	0.0015	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000
	0.7	0.0053	0.0046	0.0038	0.0030	0.0023	0.0015	0.0008	0.0000	0.0000
0.8	0.0061	0.0053	0.0046	0.0038	0.0030	0.0023	0.0015	0.0008	0.0000	

**Squat Lift [kcal/movement] - for  $h_1 < h_2 \leq 0.81$**

$$\Delta E = 10^{-2}[0.514 \cdot BW \cdot (0.81 - h_1) + (2.19 \cdot L + 0.62 \cdot S \cdot L)(h_2 - h_1)]$$

$$\Delta E = 10^{-2}[0.514 \cdot BW \cdot (0.81 - h_1)] + 10^{-2}[2.19 \cdot L \cdot (h_2 - h_1)]$$

$$+ 10^{-2}[0.62 \cdot S \cdot L \cdot (h_2 - h_1)]$$

Squat Lift [kcal/movement] = sum of terms from the following tables										
		<b>h1</b>								
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
<b>BW</b>	60	0.2498	0.2190	0.1881	0.1573	0.1264	0.0956	0.0648	0.0339	0.0031
	65	0.2706	0.2372	0.2038	0.1704	0.1370	0.1036	0.0702	0.0368	0.0033
	70	0.2914	0.2555	0.2195	0.1835	0.1475	0.1115	0.0756	0.0396	0.0036
	75	0.3123	0.2737	0.2352	0.1966	0.1581	0.1195	0.0810	0.0424	0.0039
	80	0.3331	0.2920	0.2508	0.2097	0.1686	0.1275	0.0864	0.0452	0.0041
	85	0.3539	0.3102	0.2665	0.2228	0.1791	0.1354	0.0917	0.0481	0.0044
	90	0.3747	0.3284	0.2822	0.2359	0.1897	0.1434	0.0971	0.0509	0.0046
	95	0.3955	0.3467	0.2979	0.2490	0.2002	0.1514	0.1025	0.0537	0.0049
100	0.4163	0.3649	0.3135	0.2621	0.2107	0.1593	0.1079	0.0565	0.0051	
		<b>h1</b>								
<b>to be multiple for L</b>		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
<b>h2</b>	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.1	0.0022	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.2	0.0044	0.0022	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.3	0.0066	0.0044	0.0022	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.4	0.0088	0.0066	0.0044	0.0022	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.5	0.0110	0.0088	0.0066	0.0044	0.0022	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.6	0.0131	0.0110	0.0088	0.0066	0.0044	0.0022	0.0000	0.0000	0.0000
	0.7	0.0153	0.0131	0.0110	0.0088	0.0066	0.0044	0.0022	0.0000	0.0000
0.8	0.0175	0.0153	0.0131	0.0110	0.0088	0.0066	0.0044	0.0022	0.0000	
		<b>h1</b>								
<b>Only for males - to be multiple for L</b>		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
<b>h2</b>	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.1	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.2	0.0012	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.3	0.0019	0.0012	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.4	0.0025	0.0019	0.0012	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.5	0.0031	0.0025	0.0019	0.0012	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.6	0.0037	0.0031	0.0025	0.0019	0.0012	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000
	0.7	0.0043	0.0037	0.0031	0.0025	0.0019	0.0012	0.0006	0.0000	0.0000
0.8	0.0050	0.0043	0.0037	0.0031	0.0025	0.0019	0.0012	0.0006	0.0000	

**Arm lift [kcal/movement] - for  $0.81 < h_1 < h_2$**

$$\Delta E = 10^{-2}[0.062 \cdot BW \cdot (h_2 - 0.81) + (3.19 \cdot L - 0.52 \cdot S \cdot L)(h_2 - h_1)]$$

$$\Delta E = 10^{-2}[0.062 \cdot BW \cdot (h_2 - 0.81)] + 10^{-2}[3.19 \cdot L(h_2 - h_1)] - 10^{-2}[0.52 \cdot S \cdot L(h_2 - h_1)]$$

Arm Lift [kcal/movement] = sum of terms from the following tables													
		h2											
		0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
BW	60	0.0033	0.0071	0.0108	0.0145	0.0182	0.0219	0.0257	0.0294	0.0331	0.0368	0.0405	0.0443
	65	0.0036	0.0077	0.0117	0.0157	0.0197	0.0238	0.0278	0.0318	0.0359	0.0399	0.0439	0.0480
	70	0.0039	0.0082	0.0126	0.0169	0.0213	0.0256	0.0299	0.0343	0.0386	0.0430	0.0473	0.0516
	75	0.0042	0.0088	0.0135	0.0181	0.0228	0.0274	0.0321	0.0367	0.0414	0.0460	0.0507	0.0553
	80	0.0045	0.0094	0.0144	0.0193	0.0243	0.0293	0.0342	0.0392	0.0441	0.0491	0.0541	0.0590
	85	0.0047	0.0100	0.0153	0.0206	0.0258	0.0311	0.0364	0.0416	0.0469	0.0522	0.0574	0.0627
	90	0.0050	0.0106	0.0162	0.0218	0.0273	0.0329	0.0385	0.0441	0.0497	0.0552	0.0608	0.0664
	95	0.0053	0.0112	0.0171	0.0230	0.0289	0.0348	0.0406	0.0465	0.0524	0.0583	0.0642	0.0701
100	0.0056	0.0118	0.0180	0.0242	0.0304	0.0366	0.0428	0.0490	0.0552	0.0614	0.0676	0.0738	
to be multiple for L		h2											
		0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
h1	0.8	0.0032	0.0064	0.0096	0.0128	0.0160	0.0191	0.0223	0.0255	0.0287	0.0319	0.0351	0.0383
	0.9	0.0000	0.0032	0.0064	0.0096	0.0128	0.0160	0.0191	0.0223	0.0255	0.0287	0.0319	0.0351
	1.0	0.0000	0.0000	0.0032	0.0064	0.0096	0.0128	0.0160	0.0191	0.0223	0.0255	0.0287	0.0319
	1.1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0032	0.0064	0.0096	0.0128	0.0160	0.0191	0.0223	0.0255	0.0287
	1.2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0032	0.0064	0.0096	0.0128	0.0160	0.0191	0.0223	0.0255
	1.3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0032	0.0064	0.0096	0.0128	0.0160	0.0191	0.0223
	1.4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0032	0.0064	0.0096	0.0128	0.0160	0.0191
	1.5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0032	0.0064	0.0096	0.0128	0.0160
	1.6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0032	0.0064	0.0096	0.0128
	1.7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0032	0.0064	0.0096
	1.8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0032	0.0064
	1.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0032
2.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Only for males - to be multiple for L		h2											
		0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
h1	0.8	-0.0005	-0.0010	-0.0016	-0.0021	-0.0026	-0.0031	-0.0036	-0.0042	-0.0047	-0.0052	-0.0057	-0.0062
	0.9	0.0000	-0.0005	-0.0010	-0.0016	-0.0021	-0.0026	-0.0031	-0.0036	-0.0042	-0.0047	-0.0052	-0.0057
	1.0	0.0000	0.0000	-0.0005	-0.0010	-0.0016	-0.0021	-0.0026	-0.0031	-0.0036	-0.0042	-0.0047	-0.0052
	1.1	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0005	-0.0010	-0.0016	-0.0021	-0.0026	-0.0031	-0.0036	-0.0042	-0.0047
	1.2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0005	-0.0010	-0.0016	-0.0021	-0.0026	-0.0031	-0.0036	-0.0042
	1.3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0005	-0.0010	-0.0016	-0.0021	-0.0026	-0.0031	-0.0036
	1.4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0005	-0.0010	-0.0016	-0.0021	-0.0026	-0.0031
	1.5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0005	-0.0010	-0.0016	-0.0021	-0.0026
	1.6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0005	-0.0010	-0.0016	-0.0021
	1.7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0005	-0.0010	-0.0016
	1.8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0005	-0.0010
	1.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0005
2.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	

**Stoop Lower [kcal/movement] - for  $h_1 < h_2 \leq 0.81$**

$$\Delta E = 10^{-2}[0.268 \cdot BW \cdot (0.81 - h_1) + 0.675 \cdot L \cdot (h_2 - h_1) + 5.22 \cdot S \cdot (0.81 - h_1)]$$

$$\Delta E = 10^{-2}[0.268 \cdot BW \cdot (0.81 - h_1)] + 10^{-2}[0.675 \cdot L \cdot (h_2 - h_1)] + 10^{-2}[5.22 \cdot S \cdot (0.81 - h_1)]$$

<b>Stoop Lower [kcal/movement] = sum of terms from the following tables</b>										
		<b>h1</b>								
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
<b>BW</b>	60	0.1302	0.1142	0.0981	0.0820	0.0659	0.0498	0.0338	0.0177	0.0016
	65	0.1411	0.1237	0.1063	0.0888	0.0714	0.0540	0.0366	0.0192	0.0017
	70	0.1520	0.1332	0.1144	0.0957	0.0769	0.0582	0.0394	0.0206	0.0019
	75	0.1628	0.1427	0.1226	0.1025	0.0824	0.0623	0.0422	0.0221	0.0020
	80	0.1737	0.1522	0.1308	0.1093	0.0879	0.0665	0.0450	0.0236	0.0021
	85	0.1845	0.1617	0.1390	0.1162	0.0934	0.0706	0.0478	0.0251	0.0023
	90	0.1954	0.1713	0.1471	0.1230	0.0989	0.0748	0.0507	0.0265	0.0024
	95	0.2062	0.1808	0.1553	0.1298	0.1044	0.0789	0.0535	0.0280	0.0025
	100	0.2171	0.1903	0.1635	0.1367	0.1099	0.0831	0.0563	0.0295	0.0027
		<b>h1</b>								
<b>to be multiple for L</b>		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
<b>h2</b>	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.1	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.2	0.0014	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.3	0.0020	0.0014	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.4	0.0027	0.0020	0.0014	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.5	0.0034	0.0027	0.0020	0.0014	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.6	0.0041	0.0034	0.0027	0.0020	0.0014	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000
	0.7	0.0047	0.0041	0.0034	0.0027	0.0020	0.0014	0.0007	0.0000	0.0000
	0.8	0.0054	0.0047	0.0041	0.0034	0.0027	0.0020	0.0014	0.0007	0.0000
		<b>h1</b>								
<b>Only for males - to be multiple for L</b>		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
<b>S</b>	1	0.0423	0.0371	0.0318	0.0266	0.0214	0.0162	0.0110	0.0057	0.0005

**Squat Lower [kcal/movement] - for  $h_1 < h_2 \leq 0.81$**

$$\Delta E = 10^{-2}[0.511 \cdot BW \cdot (0.81 - h_1) + 0.701 \cdot L \cdot (h_2 - h_1)]$$

$$\Delta E = 10^{-2}[0.511 \cdot BW \cdot (0.81 - h_1)] + 10^{-2}[0.701 \cdot L \cdot (h_2 - h_1)]$$

Squat Lower [kcal/movement] = sum of terms from the following tables										
		<b>h1</b>								
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
<b>BW</b>	60	0.2483	0.2177	0.1870	0.1564	0.1257	0.0950	0.0644	0.0337	0.0031
	65	0.2690	0.2358	0.2026	0.1694	0.1362	0.1030	0.0698	0.0365	0.0033
	70	0.2897	0.2540	0.2182	0.1824	0.1467	0.1109	0.0751	0.0393	0.0036
	75	0.3104	0.2721	0.2338	0.1955	0.1571	0.1188	0.0805	0.0422	0.0038
	80	0.3311	0.2902	0.2494	0.2085	0.1676	0.1267	0.0858	0.0450	0.0041
	85	0.3518	0.3084	0.2650	0.2215	0.1781	0.1346	0.0912	0.0478	0.0043
	90	0.3725	0.3265	0.2805	0.2345	0.1886	0.1426	0.0966	0.0506	0.0046
	95	0.3932	0.3447	0.2961	0.2476	0.1990	0.1505	0.1019	0.0534	0.0049
	100	0.4139	0.3628	0.3117	0.2606	0.2095	0.1584	0.1073	0.0562	0.0051
		<b>h1</b>								
<b>to be multiple for L</b>		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
<b>h2</b>	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.1	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.2	0.0014	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.3	0.0021	0.0014	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.4	0.0028	0.0021	0.0014	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.5	0.0035	0.0028	0.0021	0.0014	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.6	0.0042	0.0035	0.0028	0.0021	0.0014	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000
	0.7	0.0049	0.0042	0.0035	0.0028	0.0021	0.0014	0.0007	0.0000	0.0000
	0.8	0.0056	0.0049	0.0042	0.0035	0.0028	0.0021	0.0014	0.0007	0.0000

**Arm Lower [kcal/movement] - for  $0.81 < h_1 < h_2$**

$$\Delta E = 10^{-2}[0.062 \cdot BW \cdot (h_2 - 0.81) + (3.19 \cdot L + 0.52 \cdot S \cdot L)(h_2 - h_1)]$$

$$\begin{aligned} \Delta E = & 10^{-2}[0.062 \cdot BW \cdot (h_2 - 0.81)] \\ & + 10^{-2}[3.19 \cdot (h_2 - h_1)] \cdot L \\ & + 10^{-2}[0.52 \cdot (h_2 - h_1)] \cdot S \cdot L \end{aligned}$$

Arm Lower [kcal/movement] = sum of terms from the following tables													
		<b>h2</b>											
		0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
<b>BW</b>	60	0.0050	0.0106	0.0162	0.0218	0.0273	0.0329	0.0385	0.0441	0.0497	0.0552	0.0608	0.0664
	65	0.0054	0.0115	0.0175	0.0236	0.0296	0.0357	0.0417	0.0478	0.0538	0.0598	0.0659	0.0719
	70	0.0059	0.0124	0.0189	0.0254	0.0319	0.0384	0.0449	0.0514	0.0579	0.0644	0.0710	0.0775
	75	0.0063	0.0133	0.0202	0.0272	0.0342	0.0412	0.0481	0.0551	0.0621	0.0691	0.0760	0.0830
	80	0.0067	0.0141	0.0216	0.0290	0.0365	0.0439	0.0513	0.0588	0.0662	0.0737	0.0811	0.0885
	85	0.0071	0.0150	0.0229	0.0308	0.0387	0.0466	0.0545	0.0624	0.0704	0.0783	0.0862	0.0941
	90	0.0075	0.0159	0.0243	0.0326	0.0410	0.0494	0.0578	0.0661	0.0745	0.0829	0.0912	0.0996
	95	0.0080	0.0168	0.0256	0.0345	0.0433	0.0521	0.0610	0.0698	0.0786	0.0875	0.0963	0.1051
100	0.0084	0.0177	0.0270	0.0363	0.0456	0.0549	0.0642	0.0735	0.0828	0.0921	0.1014	0.1107	
		<b>h2</b>											
to be multiple for L		0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
<b>h1</b>	0.8	0.0010	0.0020	0.0031	0.0041	0.0051	0.0061	0.0071	0.0082	0.0092	0.0102	0.0112	0.0122
	0.9	0.0000	0.0010	0.0020	0.0031	0.0041	0.0051	0.0061	0.0071	0.0082	0.0092	0.0102	0.0112
	1.0	0.0000	0.0000	0.0010	0.0020	0.0031	0.0041	0.0051	0.0061	0.0071	0.0082	0.0092	0.0102
	1.1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0020	0.0031	0.0041	0.0051	0.0061	0.0071	0.0082	0.0092
	1.2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0020	0.0031	0.0041	0.0051	0.0061	0.0071	0.0082
	1.3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0020	0.0031	0.0041	0.0051	0.0061	0.0071
	1.4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0020	0.0031	0.0041	0.0051	0.0061
	1.5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0020	0.0031	0.0041	0.0051
	1.6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0020	0.0031	0.0041
	1.7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0020	0.0031
	1.8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0020
	1.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010
2.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
		<b>h2</b>											
Only for males - to be multiple for L		0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
<b>h1</b>	0.8	0.0004	0.0007	0.0011	0.0015	0.0019	0.0022	0.0026	0.0030	0.0033	0.0037	0.0041	0.0044
	0.9	0.0000	0.0004	0.0007	0.0011	0.0015	0.0019	0.0022	0.0026	0.0030	0.0033	0.0037	0.0041
	1.0	0.0000	0.0000	0.0004	0.0007	0.0011	0.0015	0.0019	0.0022	0.0026	0.0030	0.0033	0.0037
	1.1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0007	0.0011	0.0015	0.0019	0.0022	0.0026	0.0030	0.0033
	1.2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0007	0.0011	0.0015	0.0019	0.0022	0.0026	0.0030
	1.3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0007	0.0011	0.0015	0.0019	0.0022	0.0026
	1.4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0007	0.0011	0.0015	0.0019	0.0022
	1.5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0007	0.0011	0.0015	0.0019
	1.6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0007	0.0011	0.0015
	1.7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0007	0.0011
	1.8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0007
	1.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004
2.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	

**Walking [kcal/movement]**

$$\Delta E = 10^{-2}[51 + 2.54 \cdot BW \cdot V^2 + 0.379 \cdot BW \cdot G \cdot V] \cdot t$$

$$\Delta E = 10^{-2}[51 + 2.54 \cdot BW \cdot V^2] \cdot t$$

$$+ 10^{-2}[0.379 \cdot BW \cdot V] \cdot G \cdot t$$

<b>Walking [kcal/movement] = sum of terms from the following tables</b>						
<b>to be multiple for t [min]</b>		<b>V</b>				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
<b>BW</b>	60	0.8910	2.0340	3.9390	6.6060	10.0350
	65	0.9228	2.1610	4.2248	7.1140	10.8288
	70	0.9545	2.2880	4.5105	7.6220	11.6225
	75	0.9863	2.4150	4.7963	8.1300	12.4163
	80	1.0180	2.5420	5.0820	8.6380	13.2100
	85	1.0498	2.6690	5.3678	9.1460	14.0038
	90	1.0815	2.7960	5.6535	9.6540	14.7975
	95	1.1133	2.9230	5.9393	10.1620	15.5913
	100	1.1450	3.0500	6.2250	10.6700	16.3850
<b>to be multiple for t [min] and G [%]</b>		<b>V</b>				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
<b>BW</b>	60	0.0569	0.2274	0.5117	0.9096	1.4213
	65	0.0616	0.2464	0.5543	0.9854	1.5397
	70	0.0663	0.2653	0.5969	1.0612	1.6581
	75	0.0711	0.2843	0.6396	1.1370	1.7766
	80	0.0758	0.3032	0.6822	1.2128	1.8950
	85	0.0805	0.3222	0.7248	1.2886	2.0134
	90	0.0853	0.3411	0.7675	1.3644	2.1319
	95	0.0900	0.3601	0.8101	1.4402	2.2503
	100	0.0948	0.3790	0.8528	1.5160	2.3688

### Carrying loads held against things or against waist [kcal/movement]

$$\Delta E = 10^{-2}[68 + 2.54 \cdot BW \cdot V^2 + 4.08 \cdot L \cdot V^2 + 11.4 \cdot L + 0.379 \cdot (L + BW) \cdot G \cdot V] \cdot t$$

$$\begin{aligned} \Delta E &= 10^{-2}[68 + 2.54 \cdot BW \cdot V^2] \cdot t \\ &+ 10^{-2}[4.08 \cdot L \cdot V^2 + 11.4 \cdot L] \cdot t \\ &+ 10^{-2}[0.379 \cdot L \cdot V] \cdot t \cdot G \\ &+ 10^{-2}[0.379 \cdot BW \cdot V] \cdot t \cdot G \end{aligned}$$

Carrying loads held against things or against waist [kcal/movement] = sum of terms from the following tables

to be multiple for t [min]		V				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
BW	60	1.0610	2.2040	4.1090	6.7760	10.2050
	65	1.0928	2.3310	4.3948	7.2840	10.9988
	70	1.1245	2.4580	4.6805	7.7920	11.7925
	75	1.1563	2.5850	4.9663	8.3000	12.5863
	80	1.1880	2.7120	5.2520	8.8080	13.3800
	85	1.2198	2.8390	5.5378	9.3160	14.1738
	90	1.2515	2.9660	5.8235	9.8240	14.9675
	100	1.3150	3.2200	6.3950	10.8400	16.5550

to be multiple for t [min]		V				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
L	0.5	0.0621	0.0774	0.1029	0.1386	0.1845
	1.0	0.1242	0.1548	0.2058	0.2772	0.3690
	1.5	0.1863	0.2322	0.3087	0.4158	0.5535
	2.0	0.2484	0.3096	0.4116	0.5544	0.7380
	3.0	0.3726	0.4644	0.6174	0.8316	1.1070
	4.0	0.4968	0.6192	0.8232	1.1088	1.4760
	5.0	0.6210	0.7740	1.0290	1.3860	1.8450
	7.5	0.9315	1.1610	1.5435	2.0790	2.7675
	10.0	1.2420	1.5480	2.0580	2.7720	3.6900
	12.5	1.5525	1.9350	2.5725	3.4650	4.6125
	15.0	1.8630	2.3220	3.0870	4.1580	5.5350
	20.0	2.4840	3.0960	4.1160	5.5440	7.3800

to be multiple for t [min] and G [%]		V				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
L	0.5	0.0009	0.0019	0.0028	0.0038	0.0047
	1.0	0.0019	0.0038	0.0057	0.0076	0.0095
	1.5	0.0028	0.0057	0.0085	0.0114	0.0142
	2.0	0.0038	0.0076	0.0114	0.0152	0.0190
	3.0	0.0057	0.0114	0.0171	0.0227	0.0284
	4.0	0.0076	0.0152	0.0227	0.0303	0.0379
	5.0	0.0095	0.0190	0.0284	0.0379	0.0474
	7.5	0.0142	0.0284	0.0426	0.0569	0.0711
	10.0	0.0190	0.0379	0.0569	0.0758	0.0948
	12.5	0.0237	0.0474	0.0711	0.0948	0.1184
	15.0	0.0284	0.0569	0.0853	0.1137	0.1421
	20.0	0.0379	0.0758	0.1137	0.1516	0.1895

to be multiple for t [min] and G [%]		V				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
BW	60	0.1137	0.2274	0.3411	0.4548	0.5685
	65	0.1232	0.2464	0.3695	0.4927	0.6159
	70	0.1327	0.2653	0.3980	0.5306	0.6633
	75	0.1421	0.2843	0.4264	0.5685	0.7106
	80	0.1516	0.3032	0.4548	0.6064	0.7580
	85	0.1611	0.3222	0.4832	0.6443	0.8054
	90	0.1706	0.3411	0.5117	0.6822	0.8528
	95	0.1800	0.3601	0.5401	0.7201	0.9001
	100	0.1895	0.3790	0.5685	0.7580	0.9475

**Carrying loads held against things or against waist [kcal/movement]**

$$\Delta E = 10^{-2}[68 + 2.54 \cdot BW \cdot V^2 + 4.08 \cdot L \cdot V^2 + 11.4 \cdot L + 0.379 \cdot (L + BW) \cdot G \cdot V] \cdot t$$

$$\Delta E = 10^{-2}[68 + 2.54 \cdot BW \cdot V^2] \cdot t$$

$$+10^{-2}[4.08 \cdot L \cdot V^2 + 11.4 \cdot L] \cdot t$$

$$+10^{-2}[0.379 \cdot L \cdot V] \cdot t \cdot G$$

$$+10^{-2}[0.379 \cdot BW \cdot V] \cdot t \cdot G$$

**Carrying loads held against things or against waist [kcal/task] = sum of terms from the following tables**

to be multiplied by		V				
		t	0.5	1.0	1.5	2.0
BW	60	1.0610	2.2040	4.1090	6.7760	10.2050
	65	1.0928	2.3310	4.3948	7.2840	10.9988
	70	1.1245	2.4580	4.6805	7.7920	11.7925
	75	1.1563	2.5850	4.9663	8.3000	12.5863
	80	1.1880	2.7120	5.2520	8.8080	13.3800
	85	1.2198	2.8390	5.5378	9.3160	14.1738
	90	1.2515	2.9660	5.8235	9.8240	14.9675
	95	1.2833	3.0930	6.1093	10.3320	15.7613
100	1.3150	3.2200	6.3950	10.8400	16.5550	

to be multiplied by		V				
		t	0.5	1.0	1.5	2.0
L	0.5	0.0621	0.0774	0.1029	0.1386	0.1845
	1.0	0.1242	0.1548	0.2058	0.2772	0.3690
	1.5	0.1863	0.2322	0.3087	0.4158	0.5535
	2.0	0.2484	0.3096	0.4116	0.5544	0.7380
	3.0	0.3726	0.4644	0.6174	0.8316	1.1070
	4.0	0.4968	0.6192	0.8232	1.1088	1.4760
	5.0	0.6210	0.7740	1.0290	1.3860	1.8450
	7.5	0.9315	1.1610	1.5435	2.0790	2.7675
	10.0	1.2420	1.5480	2.0580	2.7720	3.6900
	12.5	1.5525	1.9350	2.5725	3.4650	4.6125
	15.0	1.8630	2.3220	3.0870	4.1580	5.5350
	20.0	2.4840	3.0960	4.1160	5.5440	7.3800

to be multiplied by		V				
		t and by G	0.5	1.0	1.5	2.0
L	0.5	0.0009	0.0019	0.0028	0.0038	0.0047
	1.0	0.0019	0.0038	0.0057	0.0076	0.0095
	1.5	0.0028	0.0057	0.0085	0.0114	0.0142
	2.0	0.0038	0.0076	0.0114	0.0152	0.0190
	3.0	0.0057	0.0114	0.0171	0.0227	0.0284
	4.0	0.0076	0.0152	0.0227	0.0303	0.0379
	5.0	0.0095	0.0190	0.0284	0.0379	0.0474
	7.5	0.0142	0.0284	0.0426	0.0569	0.0711
	10.0	0.0190	0.0379	0.0569	0.0758	0.0948
	12.5	0.0237	0.0474	0.0711	0.0948	0.1184
	15.0	0.0284	0.0569	0.0853	0.1137	0.1421
	20.0	0.0379	0.0758	0.1137	0.1516	0.1895

to be multiple for t and G		V				
		t	0.5	1.0	1.5	2.0
BW	60	0.1137	0.2274	0.3411	0.4548	0.5685
	65	0.1232	0.2464	0.3695	0.4927	0.6159
	70	0.1327	0.2653	0.3980	0.5306	0.6633
	75	0.1421	0.2843	0.4264	0.5685	0.7106
	80	0.1516	0.3032	0.4548	0.6064	0.7580
	85	0.1611	0.3222	0.4832	0.6443	0.8054
	90	0.1706	0.3411	0.5117	0.6822	0.8528
	95	0.1800	0.3601	0.5401	0.7201	0.9001
100	0.1895	0.3790	0.5685	0.7580	0.9475	

**Lateral movement of arms of 180 degrees, both hands [kcal/movement]**

$$\Delta E = 10^{-2}[0.11 \cdot BW + 0.726 \cdot L]$$

Lateral movement of arms of 180 degrees, both hands [kcal/movement] = sum of terms from the following tables													
		L											
		0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	20.0
BW	60	0.0696	0.0733	0.0769	0.0805	0.0878	0.0950	0.1023	0.1205	0.1386	0.1568	0.1749	0.2112
	65	0.0751	0.0788	0.0824	0.0860	0.0933	0.1005	0.1078	0.1260	0.1441	0.1623	0.1804	0.2167
	70	0.0806	0.0843	0.0879	0.0915	0.0988	0.1060	0.1133	0.1315	0.1496	0.1678	0.1859	0.2222
	75	0.0861	0.0898	0.0934	0.0970	0.1043	0.1115	0.1188	0.1370	0.1551	0.1733	0.1914	0.2277
	80	0.0916	0.0953	0.0989	0.1025	0.1098	0.1170	0.1243	0.1425	0.1606	0.1788	0.1969	0.2332
	85	0.0971	0.1008	0.1044	0.1080	0.1153	0.1225	0.1298	0.1480	0.1661	0.1843	0.2024	0.2387
	90	0.1026	0.1063	0.1099	0.1135	0.1208	0.1280	0.1353	0.1535	0.1716	0.1898	0.2079	0.2442
	95	0.1081	0.1118	0.1154	0.1190	0.1263	0.1335	0.1408	0.1590	0.1771	0.1953	0.2134	0.2497
	100	0.1136	0.1173	0.1209	0.1245	0.1318	0.1390	0.1463	0.1645	0.1826	0.2008	0.2189	0.2552

**Lateral movement of arms of 90 degrees, standing one or both hands**

**[kcal/movement]**

$$\Delta E = 10^{-2}[3.31 + 0.629 \cdot L + 0.143 \cdot S \cdot L]$$

Lateral movement of arms of 90 degrees, standing one or both hands [kcal/movement] = sum of terms from the following tables													
		L											
		0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	20.0
S	0	0.0362	0.0394	0.0425	0.0457	0.0520	0.0583	0.0646	0.0803	0.0960	0.1117	0.1275	0.1589
	1	0.0370	0.0408	0.0447	0.0485	0.0563	0.0640	0.0717	0.0910	0.1103	0.1296	0.1489	0.1875

**Forward movement of arms, standing one or both hands [kcal/movement]**

$$\Delta E = 10^{-2} \cdot X \cdot [3.57 + 1.23 \cdot L]$$

Lateral movement of arms of 180 degrees, both hands [kcal/movement] = sum of terms from the following tables													
		L											
		0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	20.0
X	0.1	0.0042	0.0048	0.0054	0.0060	0.0073	0.0085	0.0097	0.0128	0.0159	0.0189	0.0220	0.0282
	0.2	0.0084	0.0096	0.0108	0.0121	0.0145	0.0170	0.0194	0.0256	0.0317	0.0379	0.0440	0.0563
	0.3	0.0126	0.0144	0.0162	0.0181	0.0218	0.0255	0.0292	0.0384	0.0476	0.0568	0.0661	0.0845
	0.4	0.0167	0.0192	0.0217	0.0241	0.0290	0.0340	0.0389	0.0512	0.0635	0.0758	0.0881	0.1127
	0.5	0.0209	0.0240	0.0271	0.0302	0.0363	0.0425	0.0486	0.0640	0.0794	0.0947	0.1101	0.1409
	0.6	0.0251	0.0288	0.0325	0.0362	0.0436	0.0509	0.0583	0.0768	0.0952	0.1137	0.1321	0.1690
	0.7	0.0293	0.0336	0.0379	0.0422	0.0508	0.0594	0.0680	0.0896	0.1111	0.1326	0.1541	0.1972
	0.8	0.0335	0.0384	0.0433	0.0482	0.0581	0.0679	0.0778	0.1024	0.1270	0.1516	0.1762	0.2254
	0.9	0.0377	0.0432	0.0487	0.0543	0.0653	0.0764	0.0875	0.1152	0.1428	0.1705	0.1982	0.2535