



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA
MECCANICA

QUANTIFICAZIONE DEL CONSUMO
METABOLICO DELL'OPERATORE
NELLA ROBOTICA
COLLABORATIVA

RELATORE: CH.MO PROF. ING. GIULIO ROSATI

LAUREANDO: GIACOMO VERONESE

MATRICOLA: 2020181

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

a mia mamma

“ La gioia nell’osservare e nel comprendere è il dono più bello della natura. ”

ALBERT EINSTEIN

Indice

Sommario	XI
Introduzione	XIII
1 Stato dell'arte	1
1.1 Università di Aalborg (2017)	1
1.1.1 Metodologia	2
1.1.2 Risultati	4
1.2 Università di Taichung (2009)	4
1.2.1 Metodologia	5
1.2.2 Risultati	6
1.3 Università di Siegen (1992)	6
1.3.1 Metodologia	7
1.3.2 Risultati	8
1.4 Università di Nagoya (2002)	8
1.4.1 Metodologia	8
1.4.2 Risultati	11
1.5 Università di Sydney (1998)	11
1.5.1 Metodologia	12
1.5.2 Risultati	12
1.6 Università di Fukui (2015)	15
1.6.1 Metodologia	16
1.6.2 Risultati	17
1.7 Università di Calgary (2015)	20
1.7.1 Metodologia	20

1.7.2	Risultati	22
1.8	Università di Stanford (2013)	24
1.8.1	Metodologia	24
1.8.2	Risultati	25
1.9	Considerazioni finali	26
1.10	Obiettivi della tesi	27
2	Guida all'uso del metabolimetro	29
2.1	Introduzione all' <i>Oxycon Mobile</i>	29
2.2	Utilizzo dell' <i>Oxycon Mobile</i>	31
3	Modello matematico	39
3.1	Modello planare del braccio umano	39
3.1.1	Modello metabolico	39
3.1.2	Modello antropometrico	42
3.2	Modello spaziale del braccio umano	44
3.2.1	Modello metabolico	44
3.2.2	Modello antropometrico	44
4	Prove preliminari	47
4.1	Misure da fermo	47
4.1.1	Risultati	47
4.2	Misure di movimento di curl continuo	50
4.2.1	Risultati	51
4.3	Misure di movimento di curl intervallato	53
4.3.1	Risultati	53
4.4	Considerazioni finali	56
5	Prove sperimentali	57
5.1	Metodologia	57
5.1.1	Soggetti	57
5.1.2	Procedura	58
5.2	Risultati	60
5.2.1	Prima prova	60

5.2.2	Seconda prova	64
5.2.3	Terza prova	67
6	Calibrazione del modello	75
6.1	Correzione del modello	75
6.1.1	Energia del giunto 4	75
6.1.2	Energia del giunto 2	79
6.1.3	Energia del giunto 1	82
6.2	Verifica delle correzioni	84
	Conclusioni	89
	Bibliografia	93

Sommario

La robotica collaborativa è diventata un elemento fondamentale dell'Industria 4.0, suo scopo é affiancare esseri umani e robot in un'attività efficiente, produttiva, flessibile e sicura.

Il notevole sviluppo di questa forma di automazione ha portato la nascita di studi riguardo metodi per l'allocazione di task tra essere umano e robot, in modo da aumentare l'efficienza nelle operazioni collaborative, aumentare l'ergonomia dell'operatore e diminuire il consumo energetico. In particolare, è stato sviluppato un modello matematico in grado di prevedere il costo energetico dell'operatore in semplici movimenti articolari.

Obiettivo della tesi magistrale è quello di validare, tramite prove sperimentali, tale modello matematico. Per farlo si analizzeranno dapprima eventuali studi in letteratura che trattano questo argomento e si procederà quindi con la schedulazione delle prove da effettuare. In seguito, sulla base dei dati raccolti, si eseguirà una valutazione sulla precisione del modello matematico e sull'eventuale taratura dello stesso, in modo da ottenere uno strumento che permetta di prevedere facilmente e con migliore accuratezza il costo energetico dell'operatore.

Introduzione

Il seguente lavoro ha come obiettivo quello di ricavare, mediante prove sperimentali, il costo metabolico speso da un essere umano in semplici movimenti articolari. La finalità principale di questo studio consiste nel validare, tramite i dati ricavati dalle prove, un modello matematico in grado di predire il consumo energetico di un braccio umano nello spazio. L'aspetto innovativo di tale modello è quello di trattare anche task nello spazio tridimensionale, quando i modelli proposti in letteratura si limitano a task planari.

L'utilità di tale modello è duplice: in primis può essere utilizzato come confronto tra la spesa energetica di un operatore umano e di un robot industriale, in modo da ricavare quale dei due sia più efficiente nelle diverse task operative all'interno di un'azienda, e in secundis può essere utilizzato per aumentare l'ergonomia dell'operatore.

Il primo capitolo si pone l'obiettivo di delineare lo stato dell'arte nell'ambito della misurazione della spesa metabolica dell'uomo in diverse applicazioni lavorative, tramite utilizzo di appositi macchinari.

Il secondo capitolo consiste in una guida per l'utilizzo del metabolometro *Oxycon mobile*, ovvero l'apparecchio utilizzato in questa sede per ricavare la spesa metabolica. Lo strumento misura due parametri respiratori, il consumo di ossigeno e la produzione di anidride carbonica. Da quest'ultimi è possibile ricavare l'energia metabolica spesa dal soggetto.

Nel terzo capitolo viene brevemente trattato il modello matematico sviluppato per individuare il costo energetico del braccio umano in semplici movimenti nello spazio.

Il quarto capitolo è dedicato alle prove eseguite per la calibrazione del meta-

bolometro e la verifica della validità dei dati ricavati con tale strumento.

Il quinto capitolo riguarda la descrizione delle prove ufficiali eseguite su 7 soggetti maschili (età media 25.5 anni). Essi hanno completato alcune attività in cui è stato chiesto di muovere ripetutamente gli arti superiori per ricavare il consumo energetico tramite il metabolometro in diverse situazioni lavorative, tali movimenti sono stati progettati per isolare il più possibile i vari gruppi muscolari.

Il sesto capitolo infine tratta dello studio dei dati raccolti, il calcolo della spesa energetica sviluppata nelle prove e l'utilizzo di tali risultati per tarare e affinare il modello matematico in modo da ricavare valori più veritieri. Per testare la validità di queste correzioni viene quindi eseguito un confronto con i dati raccolti in un'ulteriore prova sperimentale che simula un task di assemblaggio industriale.

Infine vengono tratte le conclusioni in un apposito capitolo.

Capitolo 1

Stato dell'arte

Lo scopo del presente capitolo é quello di presentare lo stato dell'arte nell'ambito della misura e previsione della spesa energetica dell'essere umano durante movimenti articolari. In particolare, in questo capitolo vengono riportati e catalogati una selezione degli esperimenti piú significativi condotti in ambito accademico.

Per ognuno dei lavori viene riportato l'anno di pubblicazione, la rivista e un breve riassunto della specificitá del lavoro condotto. Tali studi sono concentrati sul calcolo previsionale dell'energia spesa dall'essere umano utilizzando diversi modelli matematici; nella maggior parte dei casi queste previsioni vengono in seguito confrontate con le reali spese energetiche in modo da validare le rilevazioni.

In seguito vengono riassunti gli articoli che piú possono essere paragonati allo studio effettuato in questa tesi.

1.1 Università di Aalborg (2017)

Nel 2017 Lelai Zhou, Shaoping Bai e Yibin Li hanno pubblicato un articolo per il *MIC Journal* per proporre un nuovo metodo per il calcolo del costo metabolico del braccio umano. L'obiettivo é quello di determinare la relazione tra il consumo energetico e la traiettoria del braccio. [1]

1.1.1 Metodologia

Un soggetto è seduto di fronte ad un tavolo, la cui altezza è regolata appena al di sotto delle sue articolazioni della spalla. Sono definiti sei punti nel piano e il soggetto deve muovere il dito indice da un punto ad un altro con velocità normale (Fig. 1.1). Sono consentite tre diverse traiettorie (dritta, curva e a forma di S) ed ogni movimento viene ripetuto 10 volte.

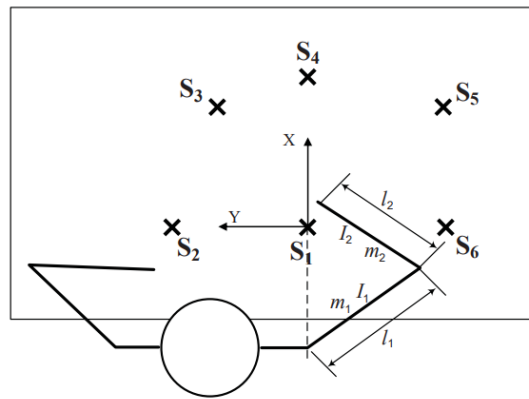


Figura 1.1: Tavolo di lavoro con le coordinate dei sei punti che il braccio umano del soggetto deve raggiungere [1]

In totale sono definite cinque coppie di punti. Per il caso A sono consentite le tre diverse traiettorie già citate; per le restanti coppie sono concesse solo la traiettoria dritta e curva (Fig. 1.2).

Il movimento del braccio viene ricostruito tramite *Qualisys Motion Capture System* mentre l'elaborazione dei dati viene effettuata tramite *Qualisys Track Manager* e *Anybody Modeling System*. Basandosi sul profilo dell'energia cinetica, il metabolismo muscolare può essere ricavato con il metodo rappresentato in Figura 1.3: dal tempo $t = 0$ a $t = t_1$ i muscoli del braccio compiono un lavoro positivo e il metabolismo è pari a K_1 . Da $t = t_1$ a $t = t_2$ il lavoro è negativo e il metabolismo è K_2 . Di conseguenza il metabolismo muscolare totale del movimento del braccio è dato da:

$$E = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 \quad (1.1)$$

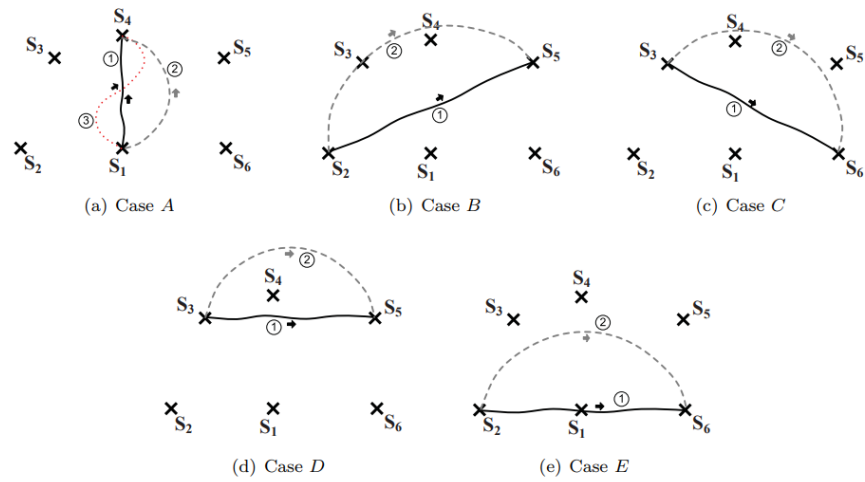


Figura 1.2: Cinque casi di movimento del braccio e relative traiettorie [1]

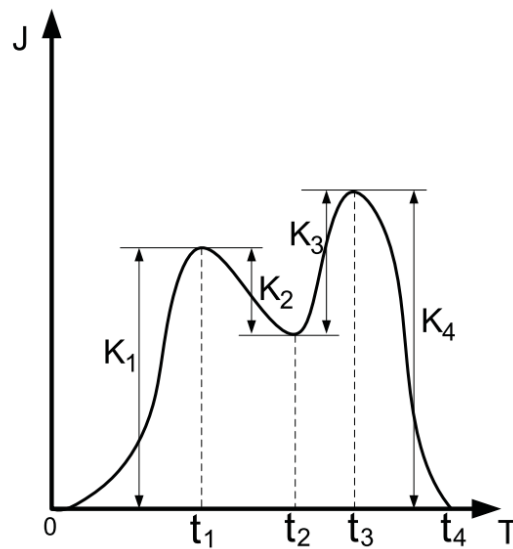


Figura 1.3: Profilo dell'energia cinetica per il calcolo del metabolismo muscolare [1]

1.1.2 Risultati

Dai risultati presenti nella Tabella 1.1 si evince che il minimo costo metabolico si ha con una traiettoria dritta eccetto che per il caso C, dove si ha un'energia minore utilizzando una traiettoria curva; inoltre il consumo per il caso C è maggiore del consumo per il caso B, pur avendo una distanza minore.

Ciò significa che non sempre la traiettoria più lunga consumi più energia: il percorso può essere il principale fattore per il controllo del consumo energetico, ma non l'unico. Infatti ad influire sul costo metabolico sono anche l'accelerazione della mano e l'orientazione del braccio.

Caso	Traiettoria	Energia
A	1	0.73 J
	2	3.74 J
	3	1.39 J
B	1	0.64 J
	2	1.33 J
C	1	2.33 J
	2	2.03 J
D	1	1.14 J
	2	1.45 J
E	1	1.78 J
	2	1.26 J

Tabella 1.1: Consumo metabolico per ogni traiettoria [1]

1.2 Università di Taichung (2009)

Nel 2009 Ching-Hua Chiu, Jin-Cherng Wang e Chen Chin-Fa hanno proposto uno studio per ricavare la traiettoria ottimizzata del braccio e della gamba di un essere umano tramite simulazione computerizzata. Il seguente sottocapitolo sarà focalizzato solo sul movimento del braccio. [2]

1.2.1 Metodologia

Per questo esperimento sono stati studiati 16 soggetti maschili. Nella posizione iniziale ogni soggetto si trova in piedi e deve mantenere il suo braccio destro parallelo al corpo. Successivamente il soggetto esegue un sollevamento del braccio fino ad alzata massima (Fig. 1.4). Il tempo medio per il completamento dell'operazione è di 1.16 sec.

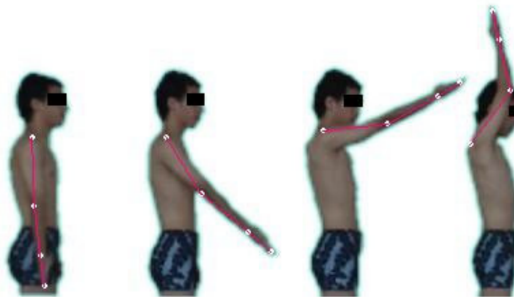


Figura 1.4: Movimento del braccio [2]

Viene utilizzata una videocamera per ricostruire i movimenti del braccio dei soggetti e analizzare e calcolare il consumo di energia reale.

Per il modello dinamico vengono utilizzate le equazioni di Eulero-Lagrange: come mostrato in Figura 1.5, il braccio umano viene considerato come formato da tre segmenti (braccio, avambraccio e mano) e avente 10 gradi di libertà ($q_i =$ coordinata generalizzata).

L'energia meccanica E_i per ogni *link* i viene calcolata con la seguente equazione:

$$E_i = \int_{t_0}^{t_1} |\tau_i \dot{q}_i| dt \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (1.2)$$

Dove τ_i è la coppia generalizzata, definita in accordo con le equazioni di Eulero-Lagrange per il movimento, e \dot{q}_i è la velocità generalizzata.

L'energia meccanica totale E per il periodo di tempo che va da t_0 a t_1 sarà quindi:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad (1.3)$$

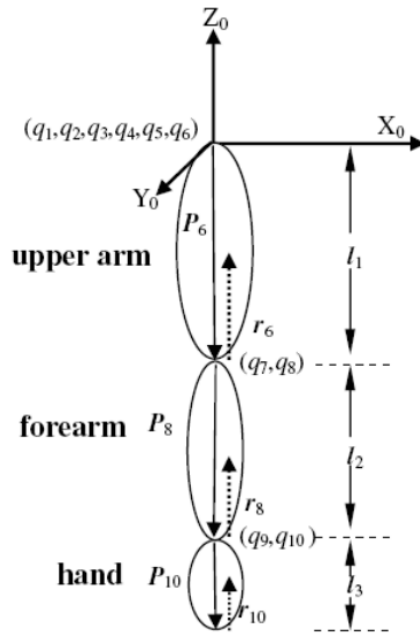


Figura 1.5: Modello del braccio umano [2]

1.2.2 Risultati

Dai risultati raffigurati in Figura 1.6, si evince che la traiettoria ottimale dei giunti della spalla e del gomito del braccio (linea continua) è regolare e senza picchi; la traiettoria reale (linea tratteggiata) risulta invece fluttuare più ampiamente.

Dal calcolo dell'energia invece è stato ricavato che la traiettoria ottimale richiede una spesa di 15.55 J, minore rispetto al costo della traiettoria reale pari a 16.64 J. I risultati ottenuti con il modello ottimale di energia risultano quindi coerenti con quelli ricavati dall'analisi del movimento reale.

1.3 Università di Siegen (1992)

Helmut Strasser e Josef Ernst nel 1992 pubblicarono un articolo nel quale era proposto uno studio sul dispendio energetico considerati i valori di consumo di ossigeno, del battito cardiaco e l'attività elettromiografica dei muscoli coinvolti in un movimento orizzontale nel piano. [3]

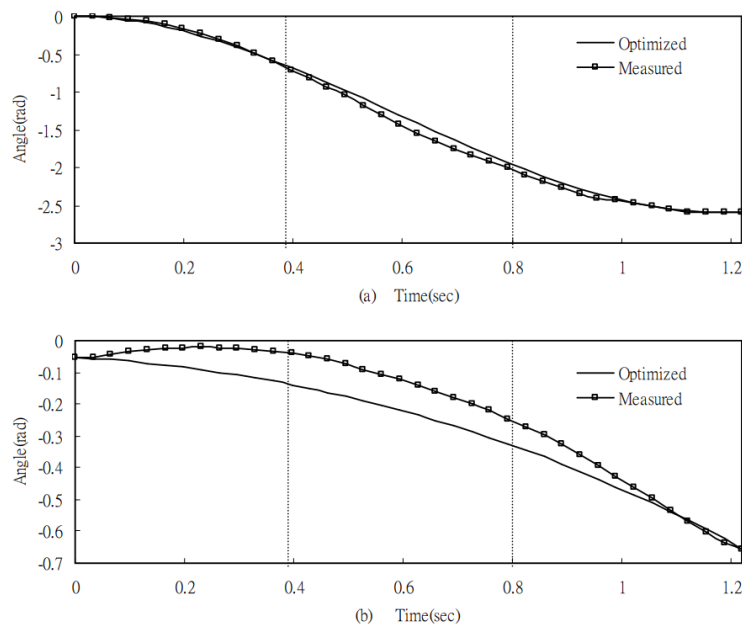


Figura 1.6: (a) Traiettoria del giunto della spalla (b) Traiettoria del giunto del gomito [2]

1.3.1 Metodologia

Nell'esperimento proposto il soggetto deve sollevare ripetutamente per 24 volte al minuto un peso di 2 kg da un punto vicino al corpo a tre diverse posizioni (30° , 110° e 150°) distanti 38 cm dal punto iniziale; lo stesso esperimento viene ripetuto utilizzando un peso da 0 kg. 11 soggetti femminili sono stati studiati per questa prova ed ogni task dura 20 minuti: 3 minuti di riscaldamento, 5 minuti di esecuzione e 12 minuti di pausa. Il consumo di ossigeno è misurato analizzando la concentrazione di ossigeno nell'aria espirata mentre il battito cardiaco viene ricavato tramite cardiotalchmetro. L'attività elettromiografica viene rilevata tramite elettrodi superficiali applicati ai muscoli interessati al movimento, elencati in seguito:

- Deltoide clavicolare
- Deltoide acromiale
- Deltoide spinale
- Pettorale maggiore

- Dorsale
- Bicipite
- Tricipite

Per ogni muscolo viene quindi ricavato un valore minimo, che rappresenta la componente statica, e un valore massimo, che rappresenta la componente dinamica.

1.3.2 Risultati

Nella Figura 1.7 sono rappresentati i risultati dell'analisi dell'attività elettromiografica dei 7 muscoli coinvolti nel movimento per ogni posizione (30°, 110° e 150°). La colonna più larga e quella più sottile rappresentano rispettivamente la prova con peso e senza peso. Si può notare come il costo fisiologico aumenti quando il punto di partenza si trova in una posizione più esterna rispetto al corpo. La posizione 150° risulta quella più dispendiosa, con uno sforzo muscolare circa doppio rispetto alla posizione più favorevole di 30°. Unica eccezione è il pettorale maggiore per il quale si ha uno sforzo superiore per la posizione di 30°.

In Figura 1.8 sono invece rappresentati i risultati relativi al consumo di ossigeno e al *work pulse*, definito come l'aumento dei battiti cardiaci a seguito del movimento. È evidente come anche in questo caso la posizione di 150° utilizzando il peso di 2 kg sia la più dispendiosa dal punto di vista energetico.

1.4 Università di Nagoya (2002)

Nel 2002 Kunio Tsurumi ha pubblicato un articolo per il *Journal of Occupational Health* nel quale veniva verificata la validità dell'elettromiografia e dell'accelerazione del polso per prevedere la spesa energetica, ricavata tramite il consumo di ossigeno, durante un movimento degli arti superiori. [4]

1.4.1 Metodologia

A 12 soggetti femminili viene chiesto di eseguire 4 differenti prove nelle quali l'obiettivo è toccare alternativamente con il dito indice della mano destra due

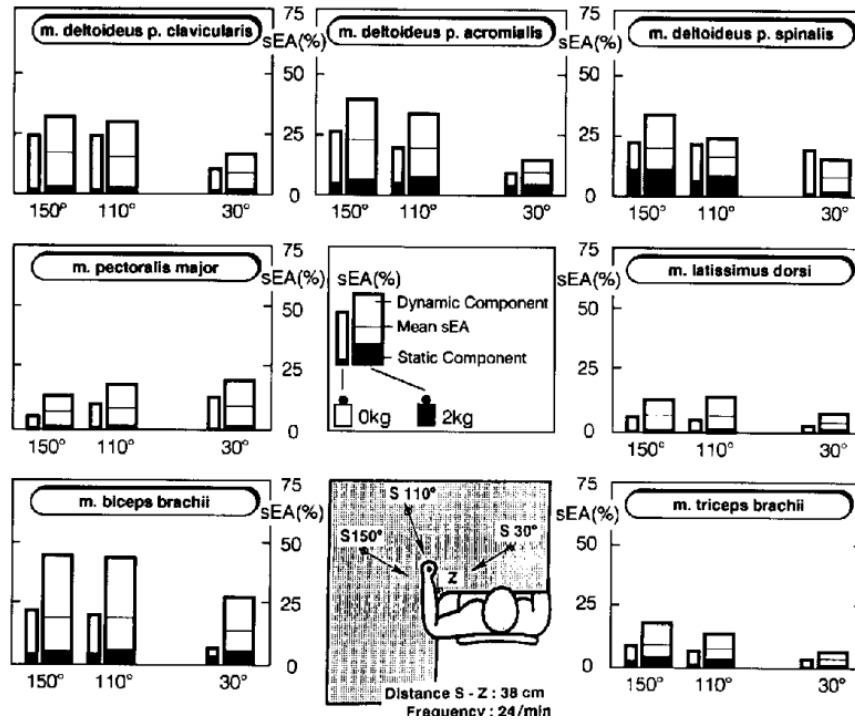


Figura 1.7: Attività elettromiografica dei muscoli coinvolti nel movimento [3]

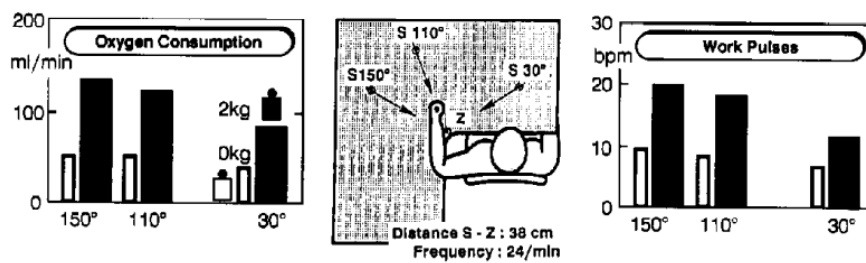


Figura 1.8: Valori del consumo di ossigeno e del *work pulses* [3]

quadrati. Nelle prime tre esecuzioni il movimento viene eseguito sul piano orizzontale, come mostrato in Figura 1.9: nel secondo test i due quadrati sono posti ad una distanza di 100 cm, contro i 50 cm nelle altre prove; nella terza esecuzione la velocità di movimento è di 152 tocchi al minuto, contro i 100 tocchi al minuto eseguiti negli altri test. Nella quarta prova invece i quadrati vengono posti sul piano verticale (Fig.1.10).



Figura 1.9: Movimento orizzontale per le prime tre prove [4]



Figura 1.10: Movimento verticale nella quarta prova [4]

Ogni test viene eseguito per un periodo di 4 minuti con 5 minuti di recupero tra le diverse prove. Durante l'esecuzione, per ogni soggetto vengono calcolati i seguenti parametri:

- Il volume di ossigeno nell'aria espirata tramite analizzatore metabolico, rilevato prima della prova e un minuto dopo l'inizio della prova. Per deter-

minare l'incremento di spesa energetica si moltiplica il valore di consumo d'ossigeno per 5 e si divide per il peso individuale;

- Il battito cardiaco rilevato prima del task e un minuto dopo l'inizio della prova (periodo in cui il battito rimane costante);
- L'accelerazione del polso del braccio destro rilevata tramite accelerometro;
- Elettromiografia del muscolo deltoide anteriore e mediale tramite utilizzo di elettrodi superficiali.

1.4.2 Risultati

I risultati di questo esperimento si focalizzano sulla correlazione tra la spesa energetica calcolata tramite il consumo di ossigeno e i vari parametri misurati durante l'attività.

Il coefficiente di correlazione tra l'aumento del battito cardiaco e la spesa energetica è di 0.746 per i primi tre test, valore che si abbassa a 0.285 considerando anche la quarta prova.

La correlazione tra l'accelerazione del polso e della spesa energetica è di 0.581, valore simile si ottiene anche senza considerare il test 4.

Per l'EMG del muscolo deltoide mediale e anteriore invece si ha un coefficiente di correlazione pari a 0.676 e 0.559, rispettivamente.

In conclusione la correlazione peggiore si ha con il battito cardiaco, in quanto esso può essere influenzato dalle emozioni, dalla temperatura o da attività svolte prima della prova. L'EMG dei muscoli deltoidei risulta un buon metodo per la previsione della spesa energetica nei movimenti degli arti superiori mentre l'accelerazione del polso è utile quando il movimento della mano non è troppo veloce, in quanto si avrebbe una sovrastima dell'energia.

1.5 Università di Sydney (1998)

Nel 1998 Martin Mackey, Elizabeth Ellis e Max Nicholls proposero uno studio sul costo fisiologico durante un'attività in cui è richiesto il movimento delle braccia.

L'obiettivo è quello di determinare i vari parametri respiratori e vitali in due differenti situazioni: con braccia supportate e non supportate. [5]

1.5.1 Metodologia

L'esperimento è stato condotto su 10 persone. Ad ogni soggetto è stato richiesto di eseguire una test che simula una manipolazione e una ispezione di un oggetto da posizione seduta con movimento degli arti superiori nelle due condizioni sopra citate.

Il protocollo per ogni condizione di esercizio consiste in un minuto di riposo, 4 minuti di esecuzione dell'attività e due minuti di recupero. L'attività consiste nel raccogliere con la mano sinistra un oggetto da un cesto posto alla sinistra del soggetto. Nella condizione di braccia supportate il gomito destro appoggia sul tavolo di lavoro mentre la mano sinistra raccoglie il pezzo. In seguito il soggetto porta l'oggetto direttamente di fronte a sé con due mani, simulando un'attività di ispezione della durata di 15 secondi. In questo caso, nella condizione di braccia supportate, entrambi i gomiti sono appoggiati al tavolo di lavoro. Infine il soggetto ripone il pezzo con la mano destra in un cesto posto alla sua destra, con il gomito sinistro appoggiato al tavolo di lavoro se in condizione di braccia supportate.

Durante l'esperimento vengono calcolati, tramite l'utilizzo di un pneumotacografo e di un pletismografo, i parametri respiratori più importanti: la frequenza di respirazione (R_f), il volume corrente (V_T) e la ventilazione minima (V_E). Viene inoltre determinato il battito cardiaco.

1.5.2 Risultati

Ventilazione minima (V_E)

Questo parametro è sensibilmente maggiore nel lavoro con braccia non supportate (14.8 L/min) rispetto al movimento con braccia supportate (13.4 L/min). Come si può notare in Figura 1.11, la V_E aumenta durante la fase di movimentazione in entrambe le condizioni, benchè questo incremento sia maggiore con i gomiti non appoggiati. Durante la fase di recupero tale variabile decresce in entrambi i

casi ma nell condizione di braccia non supportate essa non raggiunge i valori di riposo pre-attività.

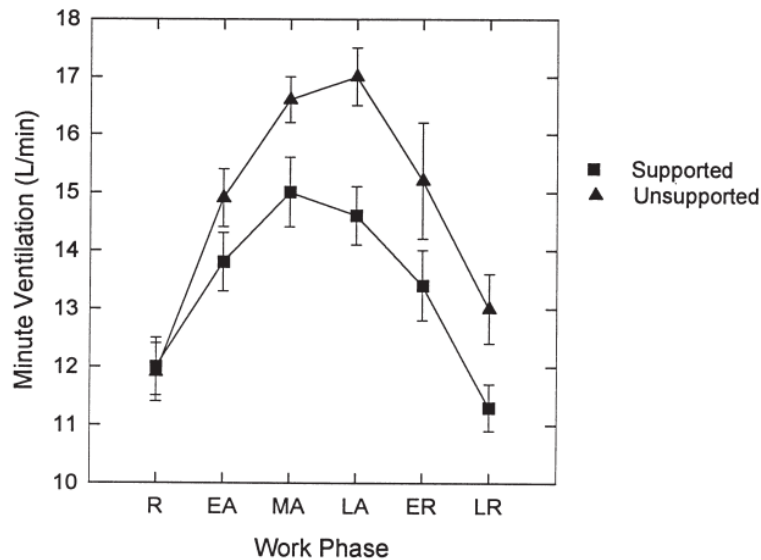


Figura 1.11: Ventilazione minima durante le fasi di riposo, attività e recupero; R = riposo, EA = attività iniziale, MA = attività centrale, LA = attività finale, ER = recupero iniziale, LR = recupero finale [5]

Frequenza respiratoria (Rf)

Come la V_E , anche la frequenza respiratoria è maggiore nella condizione di braccia non supportate (21.4 respiri/min) rispetto alla condizione di braccia supportate (19.5 respiri/min). Durante la fase di attività iniziale vi è un incremento di tale parametro in entrambi i casi, durante la fase di movimentazione invece la Rf continua ad aumentare solo nel caso di gomiti non appoggiati. Nella fase di recupero tale variabile ritorna nelle condizioni di pre-attività in entrambe le condizioni (Fig. 1.12).

Volume corrente (V_T)

Diversamente dai parametri precedenti, il volume corrente non presenta particolari differenze tra le due condizioni di lavoro (707.3 ml contro 712 ml). All'inizio dell'attività il V_T aumenta lievemente in entrambi i casi mentre vi è un incre-

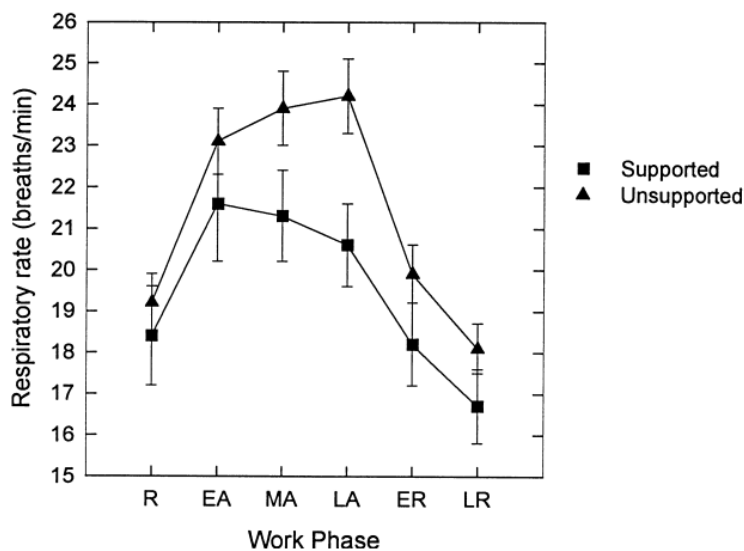


Figura 1.12: Frequenza respiratoria durante le fasi di riposo, attività e recupero [5]

mento maggiore nella fase di recupero iniziale con le braccia non supportate (Fig. 1.13).

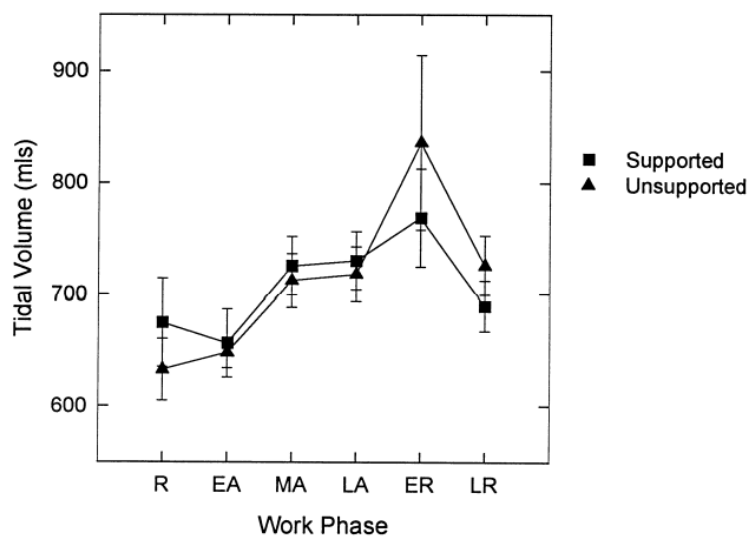


Figura 1.13: Volume corrente durante le fasi di riposo, attività e recupero [5]

Battito cardiaco (HR)

Come si può notare in Figura 1.14, il battito cardiaco nelle condizioni di braccia non supportate (79 battiti/min) è maggiore rispetto alla condizione di braccia supportate (73.6 battiti/min). Vi è un notevole incremento di HR tra la fase di riposo e inizio attività in entrambi i casi, anche se tale aumento è maggiore nel caso di gomiti non appoggiati. Durante la fase di lavoro, mentre nella condizione di braccia supportate si ha un battito cardiaco circa costante, per la condizione di braccia non supportate il parametro continua ad aumentare. Alla fine del recupero si ha un ritorno ai valori pre-attività in entrambi i casi.

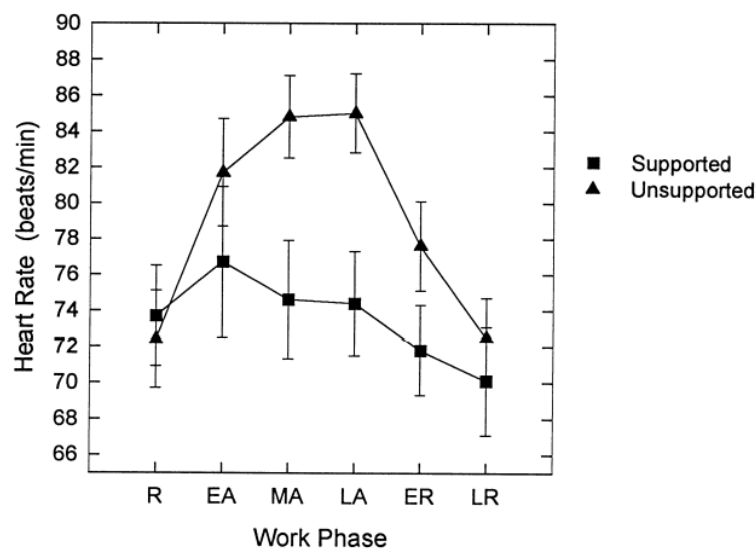


Figura 1.14: Battito cardiaco durante le fasi di riposo, attività e recupero [5]

1.6 Università di Fukui (2015)

Uno studio condotto nel 2015 da Yoshiaki Tani ai e Jun Nishii ebbe come obiettivo quello di determinare come un modello di minimo costo metabolico potesse essere utile per prevedere le caratteristiche delle traiettorie degli arti superiori durante semplici azioni di movimento.

1.6.1 Metodologia

L'esperimento è stato eseguito su 8 soggetti (5 maschi e 3 femmine) seduti su una sedia con il gomito fasciato per prevenire il movimento dello stesso. Un *marker* viene posto all'estremità del dito indice per registrare la traiettoria utilizzando un *3D motion capture system*. Come mostrato in Figura 1.15, il movimento consiste nel muovere il braccio con traiettoria circolare fino ad un punto d'arrivo distante 0.22 m. La durata del movimento è di 0.5 s per le prove veloci e 1.5 s per le prove lente. Ogni movimento viene ripetuto 100 volte.

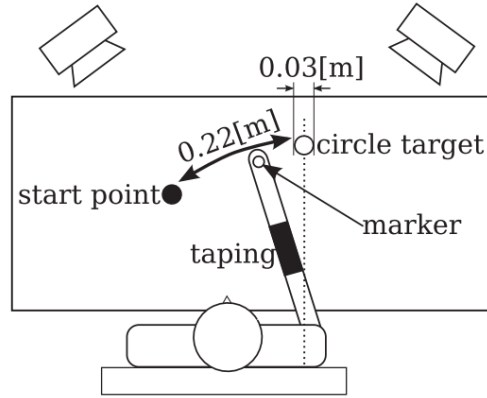


Figura 1.15: Rappresentazione schematica delle prove sperimentali sulla traiettoria degli arti superiori [6]

Per quanto riguarda il calcolo delle traiettorie ottimali che minimizzano il costo metabolico, la dinamica del braccio viene rappresentata utilizzando un modello muscolo-scheletrico lineare del quarto ordine ad un collegamento nel quale sono presenti l'inerzia e la viscosità. Il problema di minimizzare il costo metabolico è formulato come segue:

$$\text{minimize} \int_0^{T+R} E[P(\tau(t), \dot{\theta}(t))] dt \quad (1.4)$$

dove $E[X]$ rappresenta il valore atteso di X , P è la funzione del tasso metabolico, τ è la coppia di giunto, T è la durata di movimento e R è la durata del postmovimento. La funzione P viene ricavata utilizzando l'equazione di Alexander (1997) [7]:

$$P(\tau, \dot{\theta}) = \tau_{iso}(\tau, \dot{\theta}) \dot{\theta}_{max} \Phi(\dot{\theta}) \quad (1.5)$$

dove τ_{iso} è la coppia isometrica, $\dot{\theta}$ la velocità angolare massima e Φ è una funzione data da prove sperimentali. Quando il muscolo compie lavoro positivo si ha:

$$\tau_{iso}(\tau, \dot{\theta}) = \tau(\dot{\theta}_{max} + G\dot{\theta})/(\dot{\theta}_{max} - \dot{\theta}) \quad (1.6)$$

$$\Phi(\dot{\theta}) = 0.23 - 0.16exp(-8\dot{\theta}/\dot{\theta}_{max}) \quad (1.7)$$

Quando il muscolo compie lavoro negativo si ha:

$$\tau_{iso}(\tau, \dot{\theta}) = \tau(\dot{\theta}_{max} - 7.6G\dot{\theta})/(\dot{\theta}_{max} - 13.6G\dot{\theta} - 0.8\dot{\theta}) \quad (1.8)$$

$$\Phi(\dot{\theta}) = 0.01 - 0.11(\dot{\theta}/\dot{\theta}_{max}) + 0.06exp(23\dot{\theta}/\dot{\theta}_{max}) \quad (1.9)$$

Dove per $\dot{\theta}_{max}$ e G sono stati assunti i valori di 15 rad/s e 4.0, rispettivamente.

1.6.2 Risultati

La Figura 1.16 mostra i profili di velocità della mano per movimenti veloci ottenuti con prove sperimentali (da a a d) e il profilo di velocità ottimale ottenuto con il modello di minimo costo energetico (e). Tutti i profili di velocità assumono delle forme a campana con picchi circa a metà del periodo di movimento.

La Figura 1.17 mostra i profili di velocità della mano per movimenti lenti ottenuti con prove sperimentali (da a a d) e il profili di velocità ottimale ottenuto con il modello di minimo costo energetico con viscosità differente (e ed f). Il profilo di velocità dei primi due soggetti è simile ad una forma a campana, mentre per gli ultimi due soggetti il profilo risulta costante o decresce a metà del movimento e assume la forma di campana "collassata". Ugualmente per la traiettoria ottimale si ha un profilo di velocità costante o che decresce leggermente nel mezzo del periodo di movimento, questo causato dalla viscosità.

La Figura 1.18 rappresenta le coppie ottimali ricavate dal modello si minimo costo energetico per diversi periodi di movimento. Per tempi minori di 1.3 s (a) il profilo di coppia assume una forma sinusoidale ed è richiesta una coppia maggiore all'inizio del movimento; per tempi maggiori di 1.3 s la coppia richiesta è minore e il profilo assume un andamento balistico.

In conclusione, i risultati ottenuti mostrano come le caratteristiche qualitative delle traiettorie ottimali concordano bene con le caratteristiche delle traiettorie

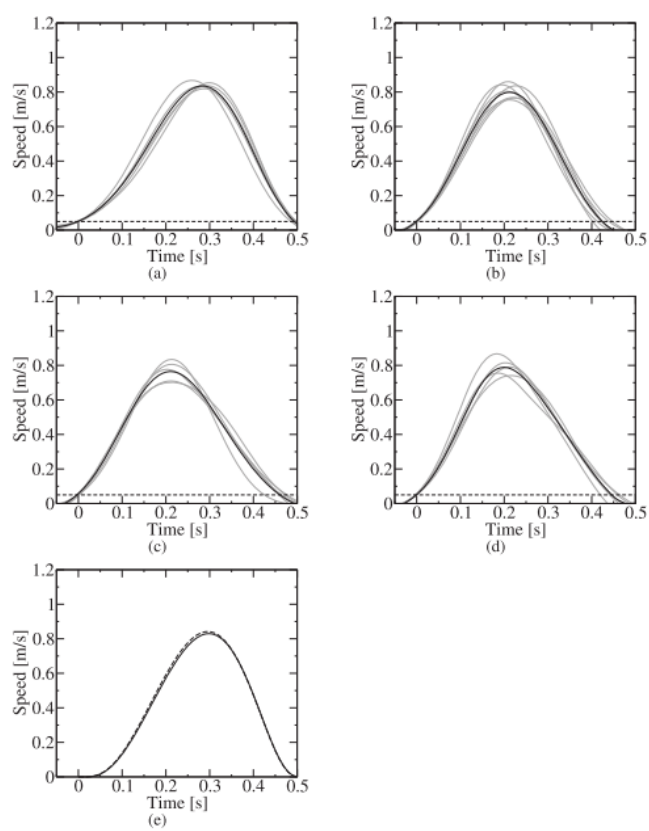


Figura 1.16: Profili di velocità della mano per movimenti veloci [6]

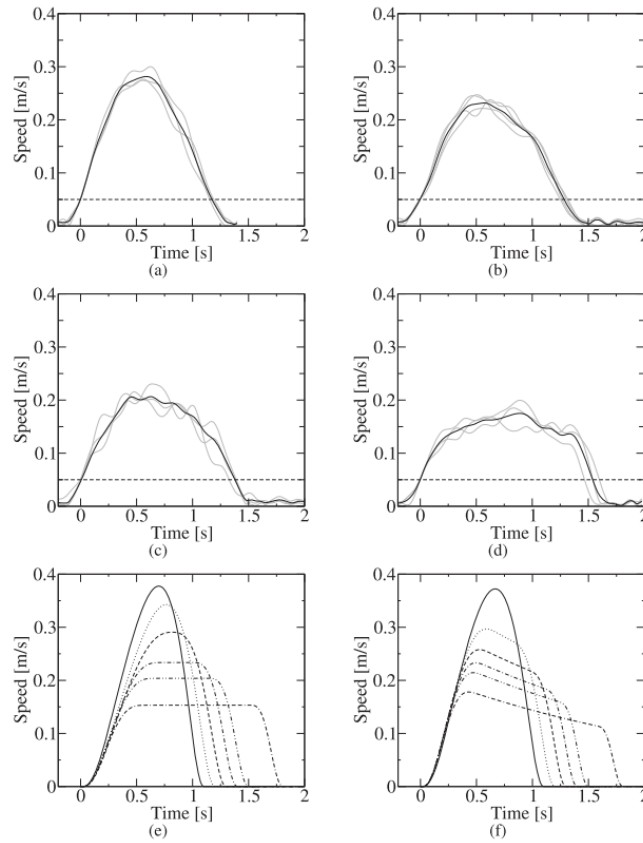


Figura 1.17: Profili di velocità della mano per movimenti lenti [6]

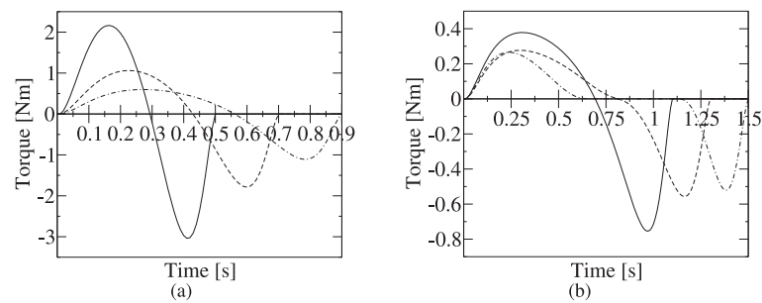


Figura 1.18: Profili ottimali di velocità con periodi di (a) 0.5 s, 0.7 s e 0.9 s e (b) 1.1 s, 1.3 s e 1.5 s [6]

misurate: quando il movimento è breve, il profilo di velocità assume una forma a campana; quando il movimento è lento, il profilo assume una forma di campana "collassata". Ciò dimostra che il costo minimo di energia è una strategia basica non solo per la locomozione ma anche per i movimenti degli arti superiori.

1.7 Università di Calgary (2015)

Nel 2015 Jeremy Wong, Tyler Cluff e Arthur Kuo proposero uno studio sul dispendio energetico degli esseri umani mentre eseguono movimenti ciclici planari. L'obiettivo è quello di determinare empiricamente un costo che riesca a prevedere la fluidità delle traiettoria e la forma a campana dei profili di velocità, in modo da integrare la spesa energetica in un quadro generale per la pianificazione dei movimenti. [8]

1.7.1 Metodologia

Esperimenti

L'esperimento consiste nel determinare la potenza metabolica spesa da 10 soggetti durante l'esecuzione di movimenti ciclici bimanuali. Tali soggetti eseguono le traiettorie sul piano, supportati da un esoscheletro robotico, in modo da misurare le caratteristiche cinematiche del moto. Come mostrato in Figura 1.19, ai soggetti viene chiesto di eseguire la traiettoria tra due punti, con un movimento medio-laterale della spalla e uno spostamento minore del gomito.

Ogni soggetto esegue tale movimento per 6 minuti con cinque frequenze diverse (0.58, 0.78, 0.97, 1.17 e 1.36 Hz) con ampiezze differenti. Il costo metabolico viene calcolato utilizzando un respirometro per determinare la variazione di concentrazione di ossigeno e anidride carbonica, per poi convertirli in potenza metabolica tramite l'equazione di Brockway (1987), dove \dot{V}_{O_2} e \dot{V}_{CO_2} sono espressi in ml/sec:

$$\dot{E} = 16.58\dot{V}_{O_2} + 4.51\dot{V}_{CO_2} \quad (1.10)$$

Il tasso metabolico netto \dot{E} è ricavato come tasso lordo meno il costo speso in posizione seduta immobile (in media 98.6 W).

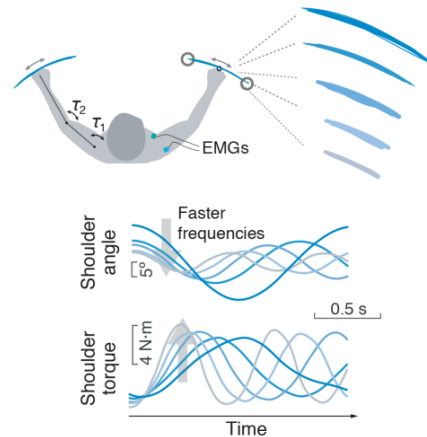


Figura 1.19: Movimento ciclico bimanuale e simmetrico sul piano orizzontale, con andamento nel tempo dell'angolo e della coppia della spalla [8]

Viene inoltre analizzata l'attività elettromiografica di quattro muscoli coinvolti nel movimento (pettorale laterale, deltoide posteriore, bicipite e tricipite).

Modello di costo

L'ipotesi è che il costo energetico sia dato dalla somma di un costo per eseguire il lavoro meccanico e un altro dato dalla produzione della forza:

$$E = c_W W + E_{FR} \quad (1.11)$$

dove W è il lavoro meccanico positivo, c_W il costo metabolico per unità di lavoro e E_{FR} il costo del tasso di forza ipotizzato:

$$E_{FR} = c_f \dot{F} \quad (1.12)$$

dove \dot{F} indica l'ampiezza del tasso di forza per movimento (derivata nel tempo della forza muscolare) e c_f è il costo energetico per il tasso di forza.

Durante l'esperimento il lavoro meccanico viene mantenuto costante, in modo da rendere il costo del tasso di forza ipotizzato dominante nel costo totale. Ciò è reso possibile diminuendo l'ampiezza di movimento all'aumentare della frequenza:

$$A \propto f^{-3/2} \quad (1.13)$$

In questo modo il costo del tasso di forza diventa proporzionale alla frequenza:

$$E_{FR} = c_f f^{3/2} \quad (1.14)$$

e moltiplicando per la frequenza f per ricavarsi la potenza si ha:

$$\dot{E}_{FR} = c_f f^{5/2} \quad (1.15)$$

Ugualmente si prevede che il costo metabolico totale \dot{E} aumenti con la frequenza ma con un termine addizionale dato dal lavoro meccanico costante.

1.7.2 Risultati

Come mostrato in Figura 1.20, da tale esperimento è risultato che il valore della spesa energetica metabolica aumenta sostanzialmente con la frequenza di movimento, anche se il costo meccanico è praticamente costante. Come previsto tale costo aumenta approssimativamente con $f^{5/2}$, mentre l'ampiezza di moto è inversamente proporzionale alla frequenza di $f^{-3/2}$. L'ampiezza della coppia della spalla e la velocità al punto finale cambiano rispettivamente al variare della frequenza di $f^{1/2}$ e $f^{-1/2}$. L'ampiezza del tasso di coppia nel tempo invece è aumentato maggiormente, circa $f^{5/2}$.

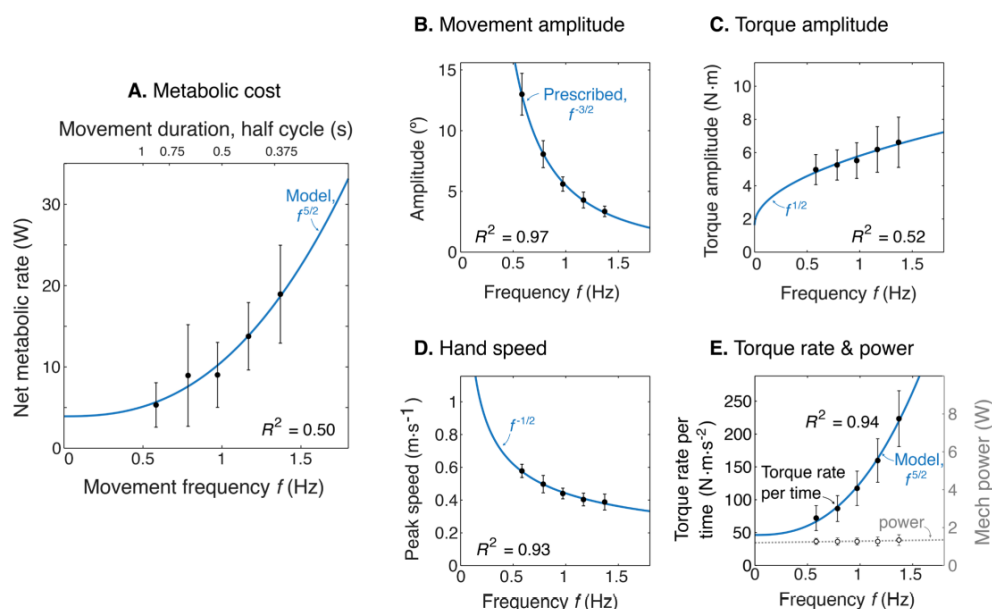


Figura 1.20: Andamenti dei vari parametri di movimento al variare della frequenza [8]

Anche il costo metabolico netto è risultato coerente con l'ipotesi di somma dei termini di lavoro meccanico e tasso di forza. Con un lavoro meccanico positivo

ad un valore fisso di circa 1.2 W, ci si aspettava un costo metabolico di lavoro costante circa a 5 W (Fig. 1.21). La differenza tra il costo metabolico netto e il lavoro costante è dato dal tasso di forza, che cresce approssimativamente di $f^{5/2}$. Tale tasso di forza può essere espresso come funzione lineare del tasso di coppia nel tempo empirico.

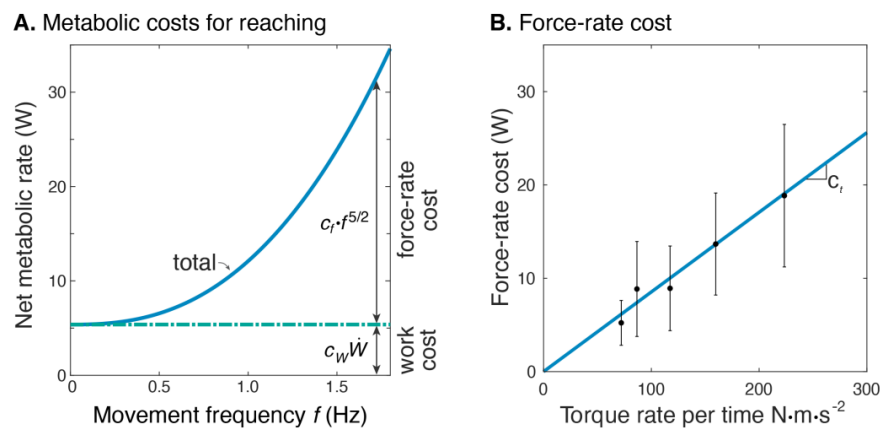


Figura 1.21: (A) Contributo del lavoro meccanico e del tasso di forza sul costo metabolico netto. (B) Andamento lineare del tasso di forza al variare della coppia nel tempo [8]

In Figura 1.22 è rappresentato l'andamento dell'attività elettromiografica dei muscoli coinvolti nel movimento al variare della frequenza. Come si può notare sia per il pettorale sia per il deltoide si ha un aumento di $f^{3/2}$.

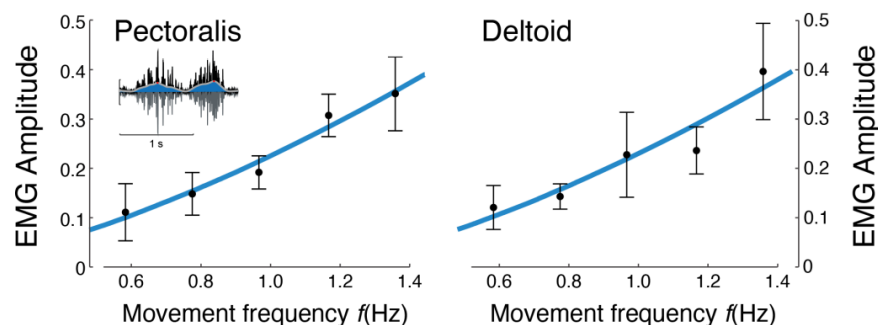


Figura 1.22: Attività elettromiografica dei muscoli pettorali e deltoidei al variare della frequenza [8]

1.8 Università di Stanford (2013)

Amy Silder, Scott L. Delp e Thor Besier nel 2013 proposero per il *Journal of Biomechanics* uno studio per confrontare gli effetti del carico sulla meccanica di andatura, sull'attivazione dei muscoli e sul costo metabolico nella camminata tra uomini e donne. [9]

1.8.1 Metodologia

Per le prove sono stati studiati 39 soggetti, 17 maschi (età media sui 31 anni) e 12 femmine (età media sui 36 anni). Ad ogni persona è stato chiesto di eseguire 4 test su un tapis roulant dalla durata di 5 minuti, con assenza di carico o con un carico addizionale pari al 10%, al 20% o al 30% del proprio peso corporeo.

Il costo metabolico è stato ricavato prima della prova analizzando i valori di consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica (in ml/sec) per 5 minuti, fino a quando i valori dell'ossigeno hanno raggiunto un plateau di almeno 2 minuti. Durante la prova, tali valori sono stati ricavati nell'ultimo minuto e il costo metabolico è stato calcolato tramite la formula di Brockway già vista in precedenza.

Il movimento dell'intero corpo e le varie forze sono state analizzate tramite un sistema ottico di acquisizione di movimento a 8 telecamere utilizzando 40 marcatori retroriflettenti applicati in vari punti anatomici del corpo. È stata inoltre adoperata una cinematica inversa ottimizzata per calcolare la posizione e l'orientamento del bacino e gli angoli articolari degli arti inferiori in ogni intervallo di tempo nelle prove.

Gli elettrodi per elettromiografia di superficie (EMG) invece sono stati posizionati sul soleo sinistro, sul gastrocnemio mediale, sul tibiale anteriore, sui muscoli posteriori della coscia mediali, sui muscoli posteriori della coscia laterale, sul vasto mediale, sul vasto laterale e sul retto femorale.

1.8.2 Risultati

Non ci sono state rilevanti differenze di sesso per qualsiasi misurazione spazio-temporale o cinematica. È stato rilevato che il picco di flessione dell'anca, la flessione del ginocchio in fase di appoggio e gli angoli di dorsiflessione della caviglia sono aumentati con il carico mentre la lunghezza del passo, la larghezza del passo e la cadenza non sono cambiati all'aumentare del peso.

Con l'eccezione del picco del momento di flessione dell'anca, l'entità di tutti i picchi dei momenti dei vari giunti aumentava con il carico; le forze di reazione al suolo verticali durante il trasporto e la spinta sono aumentate in media rispettivamente del 6% e del 5%, con ogni incremento del 10% del peso, come mostrato in Figura 1.23.

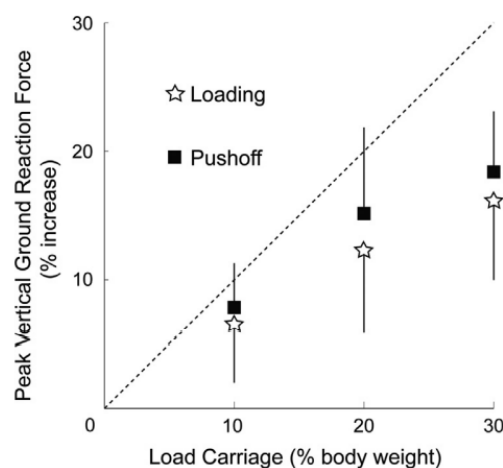


Figura 1.23: Incremento dei picchi delle forze verticali al suolo all'aumentare del carico [9]

Il costo metabolico netto normalizzato medio durante la deambulazione senza carico era 3.21 ± 0.58 W/kg per gli uomini e 2.80 ± 0.60 W/kg per le donne. Il costo metabolico in media tra uomini e donne è aumentato dell'8% circa con ogni aumento del 10% del carico.

Quando normalizzato alla massa corporea, il costo metabolico netto della camminata era maggiore per gli uomini in tutte le condizioni di carico, rispetto alle donne. Quando il costo metabolico netto è stato normalizzato alla massa magra,

non c'era alcuna differenza significativa tra uomini e donne, come rappresentato in Figura 1.24.

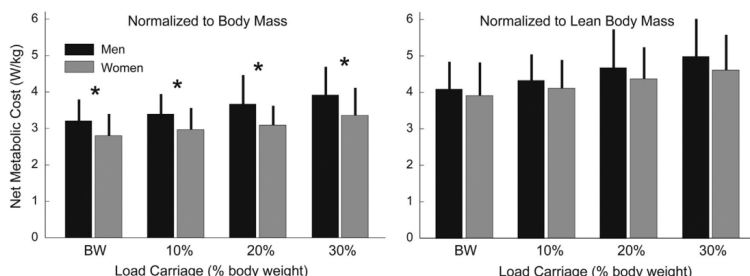


Figura 1.24: Aumento del costo metabolico normalizzato alla massa corporea e alla massa magra [9]

1.9 Considerazioni finali

Osservando gli studi riguardanti il consumo energetico dell'uomo, si nota che questo argomento è diventato un tema sempre più approfondito nel corso degli ultimi anni.

La maggior parte degli esperimenti consiste nel ricavare tramite modelli matematici un valore previsionale del consumo energetico speso dall'essere umano nel movimento sul piano di uno o due braccia; tali risultati vengono quindi confrontati con un valore esatto dell'energia consumata, ottenuta con *motion capture systems* oppure con formule che trasformano i valori respiratori in spesa energetica.

In particolare nello studio dell'Università di Fukui del 2015 viene utilizzato il modello di Alexander, modello previsionale su cui si basa anche quello utilizzato negli esperimenti in questa tesi e che vedremo in seguito. Inoltre in vari articoli viene citata la formula di Brockway per ricavare la potenza energetica spesa nel tempo considerando il consumo di ossigeno e la produzione di anidride carbonica, anche questa formula verrà utilizzata in seguito per il calcolo dell'energia reale.

Per quanto riguarda il pool statistico, si osserva che in media sono stati studiati una decina di soggetti, con alternanza tra maschi e femmine (tranne nello studio dell'Università di Nagoya dove gli esperimenti sono stati condotti solo su soggetti femminili), con un'età media compresa tra i 20 e i 30 anni.

1.10 Obiettivi della tesi

Tutti i lavori presentati fin'ora hanno come obiettivo quello di predire e/o validare modelli di tipo planare dell'energia spesa dall'essere umano per movimenti articolari.

In questo contesto, il presente lavoro vuole proporre un modello e conseguente verificarne la bontá di un modello che introduca l'ulteriore complessitá di un generico movimento spaziale.

Da un analisi dei dati, in un precedente lavoro [10], si é visto come il miglior modello planare sia quello di Alexander [7]. Alla luce di ciò si é scelto di estendere il medesimo al caso spaziale aggiungendo due ulteriori gradi di libertá .

Lo studio della letteratura ha permesso di mettere in luce le criticitá e gli aspetti critici e/o sfidanti di questo ambito di ricerca.

Per le validazioni verranno quindi effettuate delle prove per ricavare la reale spesa energetica dell'uomo in semplici movimenti articolari, in particolare verrà utilizzato un metabolometro per la rilevazione dei parametri respiratori e quindi del consumo energetico tramite formula di Brockway.

Una volta eseguite tali prove e corretto il modello sulla base dei risultati ottenuti, questo sarà disponibile per un successivo confronto tra il dispendio dell'uomo e il consumo di un robot per determinare quale dei due sia più efficiente dal punto di vista energetico in varie applicazioni lavorative.

Capitolo 2

Guida all'uso del metabolimetro

Nel presente capitolo verrà presentata una guida per l'utilizzo dello strumento di misura usato per la rilevazione dell'energia metabolica spesa durante le prove. Tale strumento consiste in un metabolimetro, modello *Oxycon Mobile* della casa *Jaeger*, fornito dal Dipartimento di Neuroscienze dell'Università degli Studi di Padova.

2.1 Introduzione all'*Oxycon Mobile*

Il metabolimetro è uno strumento che consente di valutare il dispendio energetico durante un'attività analizzando la variazione di concentrazione di ossigeno e anidride carbonica nei gas dell'aria espirata. Il consumo di ossigeno e la produzione di anidride carbonica (entrambe espresse in ml/sec) possono essere correlate alla quota di energia metabolica consumata utilizzando la formula di Brockway, ovvero:

$$\dot{E} = 16.58\dot{V}_{O_2} + 4.51\dot{V}_{CO_2} \quad (2.1)$$

dove \dot{V}_{O_2} è il consumo di ossigeno e \dot{V}_{CO_2} è la produzione di anidride carbonica.

L'*Oxycon Mobile* è un sistema mobile per test di funzionalità polmonare, utilizzato sia in laboratorio che all'esterno, che permette il monitoraggio telemetrico dei parametri metabolici quali ventilazione, \dot{V}_{O_2} , \dot{V}_{CO_2} , AT (la soglia anaerobica), RER (il rapporto tra anidride carbonica espirata e ossigeno inspirato), HR (il battito cardiaco), EQ_{O_2} (equivalente ventilatorio dell'ossigeno) e EQ_{CO_2} (equiva-

lente ventilatorio dell'anidride carbonica). L'unità viene fissata ad un giubbotto confortevole che viene indossato come uno zainetto e permette di effettuare le misurazioni attraverso una maschera e senza alcun impedimento dovuto ai cavi. In seguito i dati vengono trasferiti in telemetria al PC e possono essere analizzati attraverso un software.

I componenti principali che costituiscono l'*Oxycon Mobile* sono:

- Unità di calibrazione Pca con la relativa antenna, per la ricezione dei dati
- Unità DEx con la relativa antenna, per la trasmissione dei dati alla Pca
- Unità SBx, per la rilevazione dei parametri respiratori
- TripleV, una ventola da collegare alla maschera durante le misurazioni

In Figura 2.1 vengono rappresentati le varie parti dello strumento di misurazione e la configurazione per la trasmissione telemetrica dei dati.

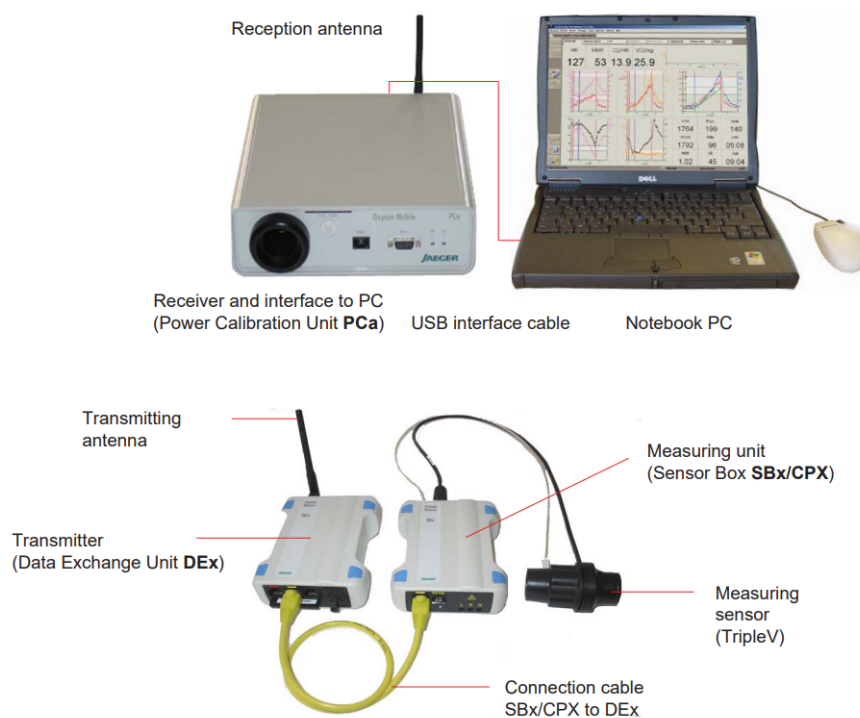


Figura 2.1: Configurazione per il trasferimento telemetrico dei dati [11]

2.2 Utilizzo dell'*Oxycon Mobile*

Avvio sistema

Per utilizzare lo strumento, bisogna collegare inizialmente la PCa al PC, tramite apposito cavo USB, e alla rete di alimentazione, tramite apposito cavo. Per procedere con le calibrazioni è necessaria l'accensione del LED verde FF (*Full Function*), il quale indica che l'unità è alimentata con il voltaggio della porta USB e dall'alimentatore.

Per l'accensione della SBx e della DEx, collegare il TripleV alla SBx, collegare le due unità utilizzando il cavo di connessione giallo e premere il tasto multifunzionale della DEx per 3 secondi (Fig. 2.2). Si accende per prima un LED giallo e dopo pochi secondi un LED verde lampeggiante per indicare la fase di "Standby". Durante tale fase la SBx e la DEx possono anche essere spente premendo il tasto multifunzionale per 3 secondi. All'avvio il software verifica automaticamente che tutte le parti del sistema siano presenti.



Figura 2.2: Tasto multifunzionale dell'unità DEx da premere per l'accensione [11]

Condizioni ambientali

L'*Oxycon Mobile* possiede un "Modulo Ambiente", integrato alla SBx, per determinare le condizioni ambientali automaticamente, le quali vengono trasferite in telemetria al PC. Temperatura, umidità e pressione barometrica sono basilari per la determinazione di fattori di correzione importanti per il calcolo dei valori. Per

eseguire la determinazione di tali parametri cliccare sul Gruppo "Calibrazioni" e "Condizioni Ambientali" e aspettare che il sistema rilevi automaticamente i valori. In alternativa si può modificare manualmente i dati ambientali premendo "F1" e inserendo i nuovi valori negli appositi spazi, come rappresentato in Figura 2.3. Per salvare la rilevazione e uscire premere "F12".

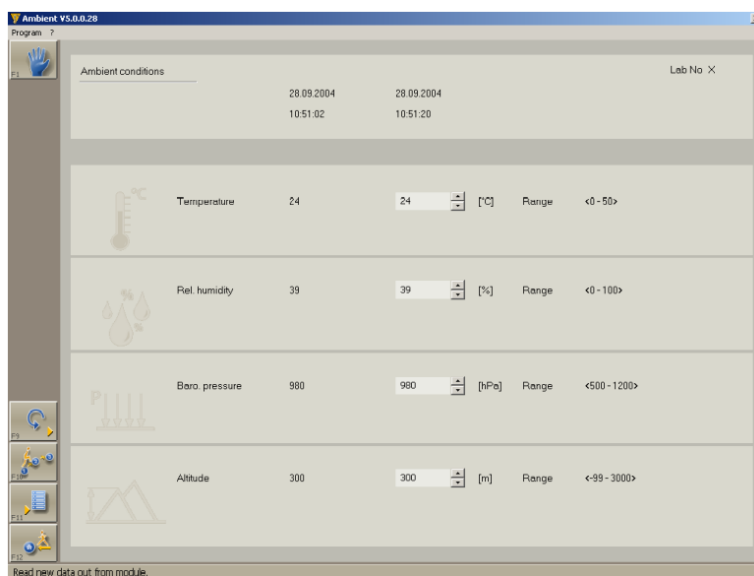


Figura 2.3: Interfaccia per calibrazione delle condizioni ambientali [11]

Calibrazione Volume

Per una corretta esecuzione dell'analisi dei valori polmonari, il sistema di misura deve essere calibrato. Per eseguire la calibrazione, collegare il Triple V alla SBx e alla PCa in modo che il foro per la connessione della linea di campionamento non sia visibile. Collegare inoltre la SBx e la PCa tramite cavo di connessione giallo e la linea di campionamento, come in Figura 2.4.

In seguito aprire il Gruppo "Calibrazioni" e cliccare l'icona "Calibrazione Volume Automatica". Eseguire la calibrazione flussi-volumi tramite "F1": se la misurazione avviene correttamente non sono presenti segnali di errore. Salvare i dati e uscire tramite "F12" (Fig. 2.5).

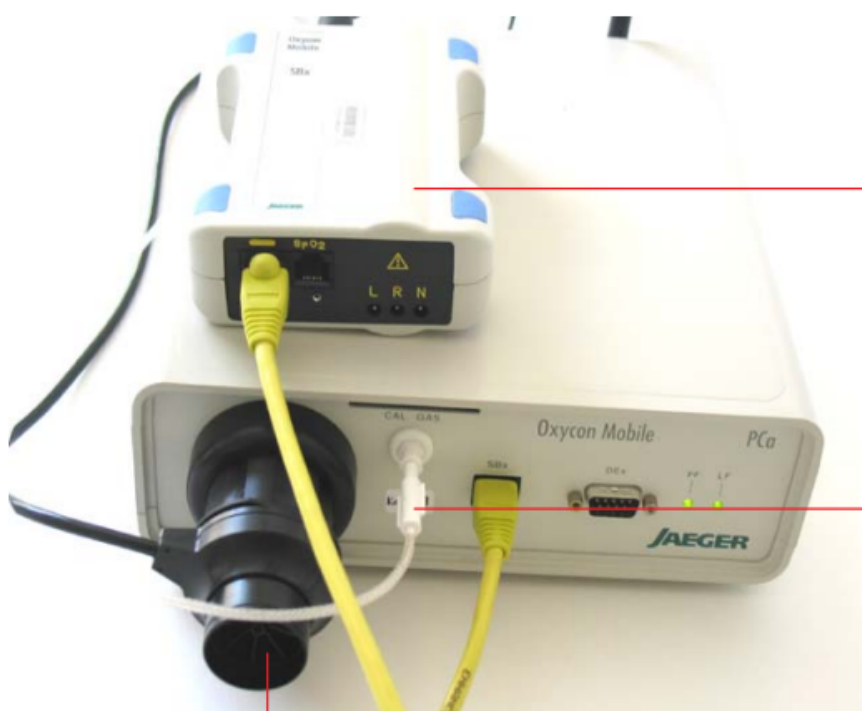


Figura 2.4: Configurazione per la Calibrazione Volume [11]

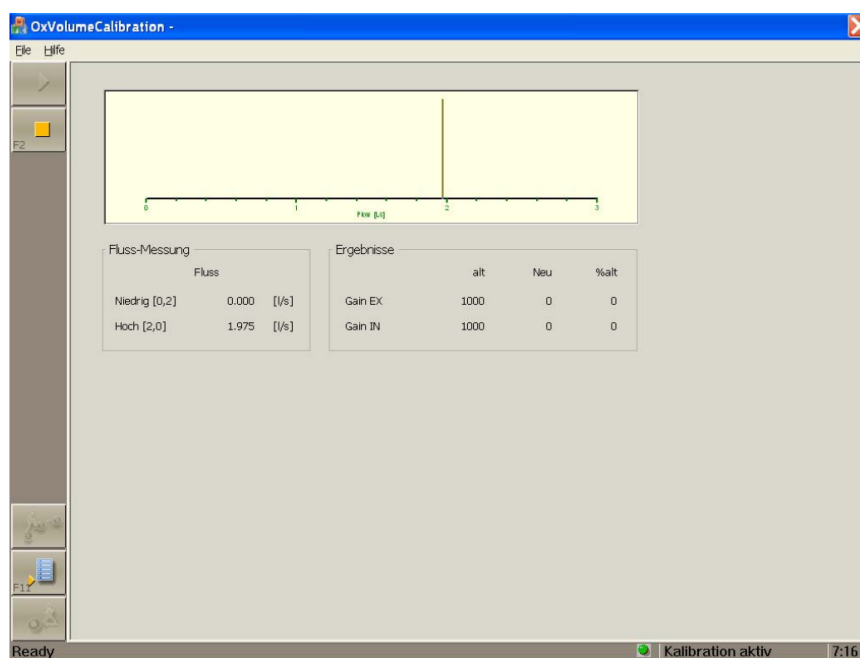


Figura 2.5: Interfaccia del software per la Calibrazione Volume [11]

Calibrazione Analizzatori Gas

Gli analizzatori dei gas (O_2/CO_2) integrati nella SBx devono essere calibrati per una corretta esecuzione dell'analisi. Come rappresentato in Figura 2.6, utilizzare la stessa configurazione vista per la "Calibrazione Volume", collegare la bombola di calibrazione tramite apposito tubo e aprire la valvola.



Figura 2.6: Configurazione per la Calibrazione Analizzatori Gas [11]

Aprire quindi il Gruppo "Calibrazioni" e l'icona "Calibrazione Analizzatori Gas" e impostare i corretti valori ($O_2 = 15.98$, $CO_2 = 5.03$), come mostrato in Figura 2.7. Premere "Calibrate" ed aspettare l'esecuzione della calibrazione, uscire con "F12" e chiudere la valvola della bombola.

Misurazioni

Dopo avere inserito i dati personali (nome, cognome, età, altezza e peso) per ogni soggetto, è possibile collegare quest'ultimo all'*Oxycon Mobile*. Come mostrato in Figura 2.8, il paziente deve indossare il giubbotto con fissate le unità DEx e SBx al di sopra di un indumento appropriato (per esempio una t-shirt) per evitare il contatto con la pelle.

Cliccare quindi sull'icona "Breath by breath", utilizzare la funzione "Bicycle" e impostare i setup dei vari step. Le fasi da rispettare sono:

- Inizio test

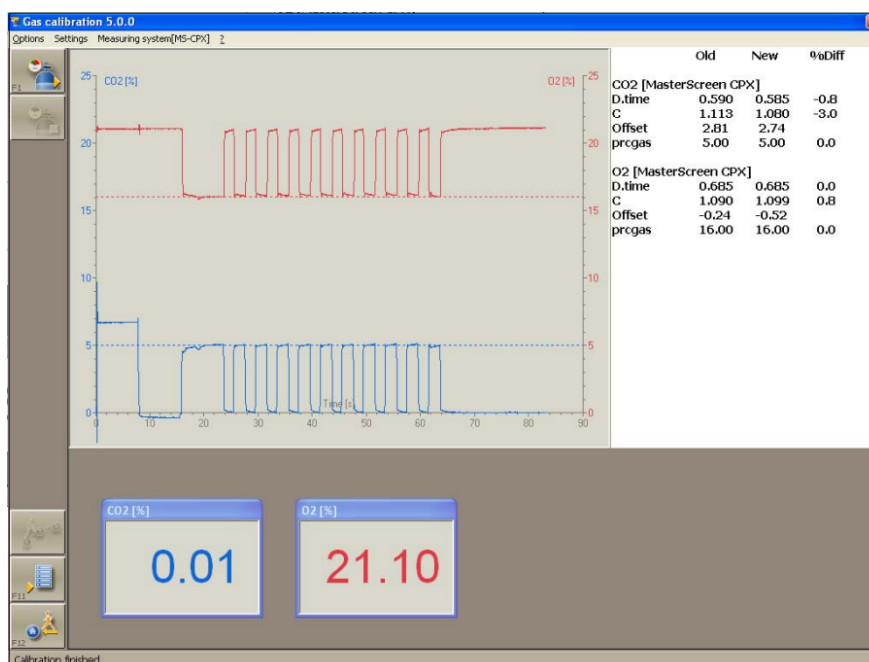


Figura 2.7: Interfaccia del software per la calibrazione degli analizzatori dei gas [11]

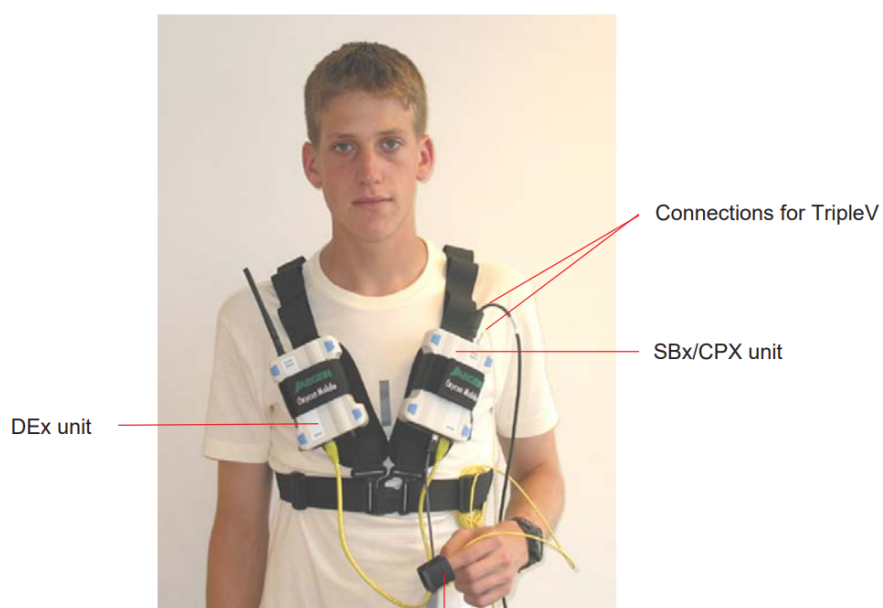


Figura 2.8: Giubbotto con dispositivo installato [11]

- Riscaldamento
- Esercizio
- Recupero
- Stop finale

Dopo aver scollegato il TripleV alla PCa e collegato alla maschera indossata dal paziente, bisogna premere il tasto "F1" e aspettare che il valore VE sia uguale a 0. Come rappresentato in Figura 2.9, è importante che i collegamenti della valvola siano sempre rivolti verso l'alto, per evitare che l'umidità crei un'occlusione e quindi una rilevazione di dati errata.



Figura 2.9: Maschera per la rilevazione dei flussi di ossigeno e anidride carbonica [11]

Iniziare quindi le misurazioni, premendo in sequenza "F1" per passare alle fasi successive, come rappresentato in Figura 2.10. É importante che durante i test i pazienti non parlino, tossiscano o muovino la maschera per evitare di alterare i valori finali. Salvare i dati e infine uscire con "F12".

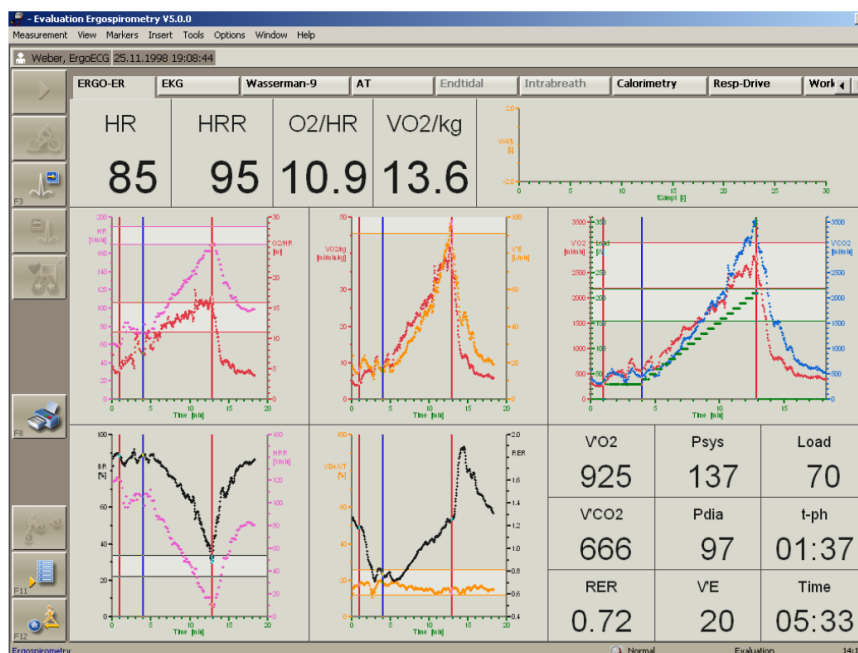


Figura 2.10: Interfaccia del software durante le misurazioni [11]

Una volta terminata l'esecuzione della prova è possibile osservare i risultati delle misurazioni tramite il comando "Screen Report", selezionando la voce "Cpet File Export". I dati di consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica vengono presentati in una tabella con un intervallo di misurazione pari a 30 secondi.

Capitolo 3

Modello matematico

Come visto nel capitolo 1, in letteratura un ambito in cui è studiata la spesa energetica dell'arto superiore umano è quello di predizione delle traiettorie che esso adotta per compiere un generico movimento; infatti il braccio umano è ridondante, avendo sette gradi di libertà, ciò significa che esistono infiniti modi in cui il braccio può essere mosso a parità di traiettoria impiegata.

In questo capitolo viene presentato il modello matematico sviluppato in Matlab per il calcolo dell'energia consumata durante il movimento del braccio umano.

3.1 Modello planare del braccio umano

Nel seguente sottocapitolo viene presentato il modello per la spesa energetica del braccio umano nel piano. Tale modello può essere utilizzato sia nel piano sagittale sia nel piano trasversale (Fig. 3.1).

3.1.1 Modello metabolico

Per il calcolo della spesa metabolica del braccio umano è stato necessario trovare una relazione che legghi le coppie richieste al giunto (spalla e gomito) e la potenza metabolica richiesta dai muscoli per il movimento [10]. I modelli di questo tipo più importanti in letteratura sono espressi in seguito:

- **Modello di Alexander** [7]: questo modello, già visto in precedenza nell'esperimento dell'Università di Fukui, ipotizza che i muscoli siano uniarti-

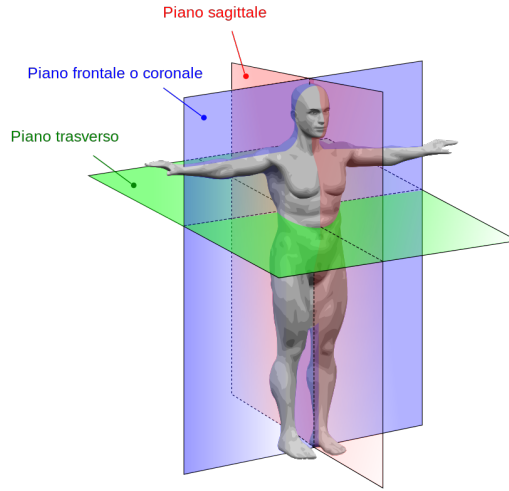


Figura 3.1: La nomenclatura dei piani di riferimento in ambito biomeccanico [10]

colari. La potenza meccanica richiesta, istante per istante, è data da:

$$P = M_{iso}\dot{\theta}_{max}\Phi(\dot{\theta}/\dot{\theta}_{max}) \quad (3.1)$$

dove M_{iso} è il momento isometrico, θ_{max} la massima velocità angolare dell'articolazione senza carico e Φ una funzione che, se il muscolo compie lavoro positivo (velocità e coppia hanno lo stesso verso), è data da:

$$\Phi(\dot{\theta}/\dot{\theta}_{max}) = 0.23 - 0.16\exp(-8\dot{\theta}/\dot{\theta}_{max}) \quad (3.2)$$

quando il muscolo compie lavoro negativo (velocità e coppia hanno versi opposti) si ha:

$$\Phi(\dot{\theta}/\dot{\theta}_{max}) = 0.01 - 0.11(\dot{\theta}/\dot{\theta}_{max}) + 0.06\exp(23\dot{\theta}/\dot{\theta}_{max}) \quad (3.3)$$

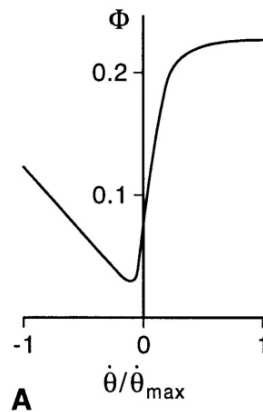
L'andamento della funzione $\Phi(\dot{\theta}/\dot{\theta}_{max})$ è riportata in Figura 3.2.

Per quanto riguarda il momento isometrico, se il muscolo compie lavoro positivo, esso è dato dalla seguente formula:

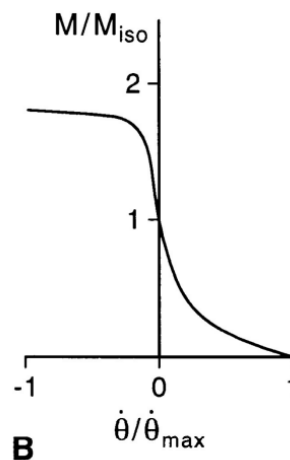
$$M_{iso} = M(\dot{\theta}_{max} + G\dot{\theta})/(\dot{\theta}_{max} - \dot{\theta}) \quad (3.4)$$

viceversa se il lavoro è negativo:

$$M_{iso} = M(\dot{\theta}_{max} - 7.6G\dot{\theta})/(\dot{\theta}_{max} - 13.6G\dot{\theta} - 0.8\dot{\theta}) \quad (3.5)$$

Figura 3.2: Andamento della funzione Φ [10]

dove G , che dipende dalla velocità dei muscoli, è una costante tipicamente pari a 4; $\dot{\theta}_{max}$ viene preso pari a 22 rad/s in flessione e 28 rad/s in estensione. L'andamento del momento isostatico è rappresentato in Figura 3.3.

Figura 3.3: Andamento di M/M_{iso} [10]

Infine è possibile determinare l'energia spesa integrando la potenza metabolica spesa istante per istante nel tempo:

$$E = \int_0^{t^*} P(t) dt \quad (3.6)$$

- **Modello di Zhou** [12]: tale modello considera i muscoli come una coppia di attuatori responsabili uno della flessione e l'altro dell'estensione. La potenza

metabolica spesa può essere ricavata con la seguente espressione:

$$P = -M_{iso}\omega + G_s(\rho/\sigma)M_{max}L_{opt}\omega \quad (3.7)$$

dove:

- σ è una tensione specifica pari a 0.25 MPa;
- ρ è la densità dei muscoli pari a 1059.7 kg/m³;
- G_s è un coefficiente che misura -6.72 N/kg in accorciamento e 33.3 N/kg in allungamento;
- Per M_{iso} si utilizzano le formule 3.5 e 3.6.

Per il confronto del modello matematico con i risultati ottenuti dalle prove sperimentali è stata presa in considerazione solo l'energia ottenuta con il modello di Alexander, in quanto i valori risultano più coerenti.

3.1.2 Modello antropometrico

Come parametri delle dimensioni del braccio umano viene utilizzata l'antropometria quantitativa, disciplina che si occupa di quantificare le proprietà geometriche ed inerziali dei segmenti del corpo. La materia innanzitutto individua come dividere il corpo in base a:

- Funzionalità del segmento
- Presenza di punti che permettono una misurazione standard ed accurata delle parti

Una volta definiti i segmenti si procede alla misurazione e successiva formulazione di equazioni delle seguenti quantità:

- Dimensioni del segmento
- Massa del segmento
- Posizione del centro di massa
- Inerzia del segmento

le quali sono espresse in funzione dell'altezza e della massa del soggetto. In particolare viene utilizzato il modello di Dempster [13], i quali parametri sono riassunti nella Tabella 3.1 e sono riferiti ad un soggetto alto 175 cm e dal peso di 75 kg:

Parametro	Valore
a_1	301 mm
a_2	266 mm
l_1	131 mm
l_2	114 mm
m_{l_1}	2.03 kg
m_{l_2}	1.2 kg
I_{l_1}	$1.9 \cdot 10^{-2} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
I_{l_2}	$7.8 \cdot 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

Tabella 3.1: Parametri del braccio umano utilizzati nel modello planare

dove la simbologia viene espressa nella seguente Figura 3.4. Nel caso il soggetto tenesse una massa in mano, i nuovi parametri diventerebbero:

$$m_{l_2}^* = m_{l_2} + m_{adj} \quad (3.8)$$

$$I_{l_2}^* = I_{l_2} + m_{adj} \cdot a_2^2 \quad (3.9)$$

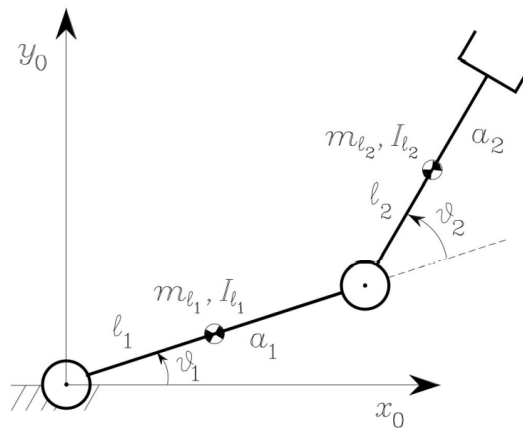


Figura 3.4: Simbologia dei parametri del braccio umano [10]

3.2 Modello spaziale del braccio umano

Per la realizzazione del modello per la valutazione della spesa energetica del braccio nello spazio è stata utilizzata un'estensione del modello planare visto in precedenza.

3.2.1 Modello metabolico

Anche per il modello spaziale possono essere presi in considerazione i modelli sviluppati da Alexander e da Zhou. Entrambi necessitano di avere come input, oltre le coppie di giunto, alcuni parametri dei muscoli, quali ad esempio la velocità massima di giunto $\dot{\theta}_{max}$, mentre per il modello di Zhou sono necessari anche il momento M_{max} e la lunghezza ottima di fibra L_{opt} .

Si è supposto per semplicità di utilizzare gli stessi valori di $\dot{\theta}_{max}$ per i muscoli in contrazione e per quelli in estensione, mentre per quanto riguarda i parametri del secondo modello citato, si è supposto che i primi due giunti della spalla fossero uguali, mentre il terzo fosse uguale a quello del gomito.

3.2.2 Modello antropometrico

Poichè il modello di Dempster fornisce solo i dati antropometrici nel piano sagittale, è necessario conoscere anche i parametri inerziali negli altri piani. Per semplicità si è supposto che l'inerzia del braccio rispetto all'asse z (della terna solidale) e all'asse y siano uguali e pari a:

$$I_z = I_y = \frac{1}{3}m\ell^2 \quad (3.10)$$

Mentre l'inerzia lungo l'asse x si calcola come;

$$I_x = \frac{3}{2}K^2I_z \quad (3.11)$$

Ipotizzato che $K \approx 8$ si ottiene che l'inerzia rispetto all'asse x è un quarantesimo di quella rispetto alle altre due direzioni.

I valori numerici dei dati utilizzati per la definizione del modello dinamico sono riassunti nella tabella 3.2 di seguito riportata.

Parametro	Valore
a_1	301 mm
a_2	266 mm
l_{1y}	131 mm
l_{1x}, l_{1z}	0 mm
l_{2y}	114 mm
l_{2x}, l_{2z}	0 mm
m_{l_1}	2.03 kg
m_{l_2}	1.2 kg
I_{x_1}	$4.8 \cdot 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
I_{y_1}	$1.9 \cdot 10^{-2} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
I_{z_1}	$1.9 \cdot 10^{-2} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
I_{x_2}	$2.0 \cdot 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
I_{y_2}	$7.8 \cdot 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
I_{z_2}	$7.8 \cdot 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

Tabella 3.2: Parametri del braccio umano utilizzati nel modello spaziale

Il modello del braccio in Matlab si presenta, utilizzando questi dati antropometrici, come in Figura 3.5. Durante le prove sperimentali questi dati verranno modificati in base alle dimensioni antropometriche dei soggetti studiati.

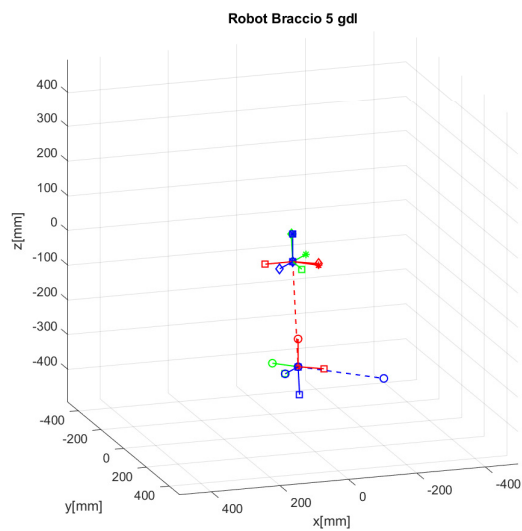


Figura 3.5: Modello Matlab del braccio umano [10]

Capitolo 4

Prove preliminari

Scopo del capitolo è quello di presentare le prove sperimentali eseguite per valutare l'efficienza e la precisione del metabolimetro nelle misurazioni, al fine di confrontare i dati con i risultati ottenuti utilizzando il modello matematico sviluppato in Matlab per il calcolo dell'energia consumata dal movimento del braccio umano.

4.1 Misure da fermo

La prima prova eseguita consiste nel misurare il consumo di ossigeno e la produzione di anidride carbonica del corpo umano in posizione seduta ed immobile. Sono stati effettuati cinque test dalla durata di 4 minuti e 30 secondi ciascuno, con un periodo di 2 minuti di recupero tra un'esecuzione e quella successiva.

4.1.1 Risultati

Dai vari test eseguiti sono stati ricavati i seguenti risultati per il consumo di ossigeno (Fig. 4.1), la produzione di anidride carbonica (Fig. 4.2) e la media di tali valori (Fig. 4.3).

In questo modo è stato possibile calcolare la potenza generata dal corpo umano utilizzando la formula di Brockway, dove il consumo di ossigeno e la produzione di anidride carbonica sono espressi in ml/sec:

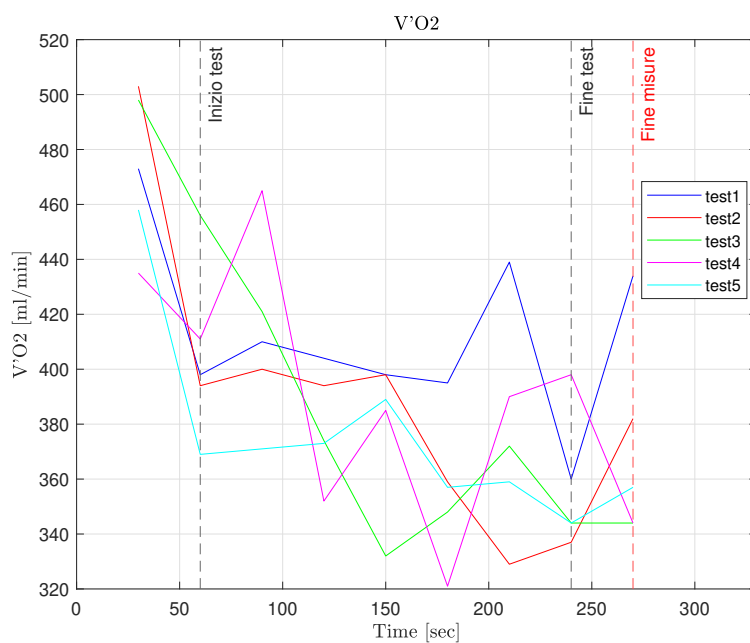


Figura 4.1: Consumo di ossigeno del corpo umano in posizione seduta e immobile

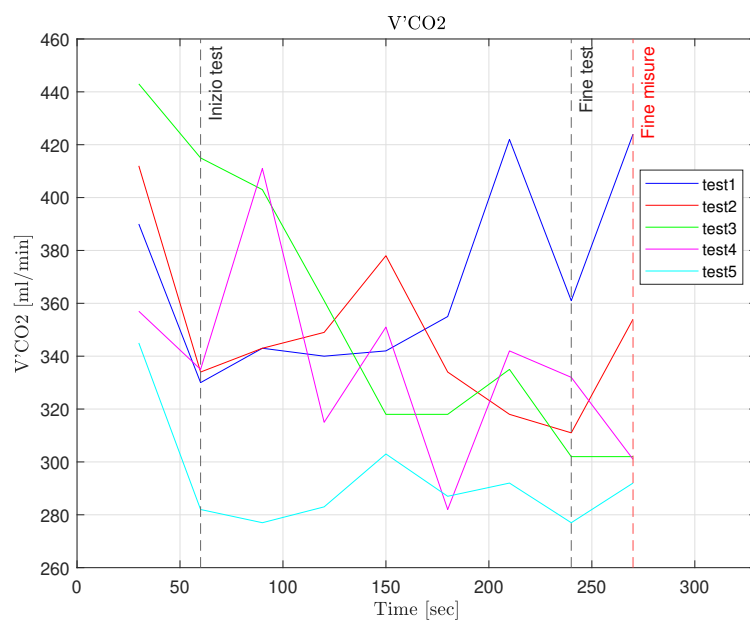


Figura 4.2: Produzione di anidride carbonica del corpo umano in posizione seduta e immobile

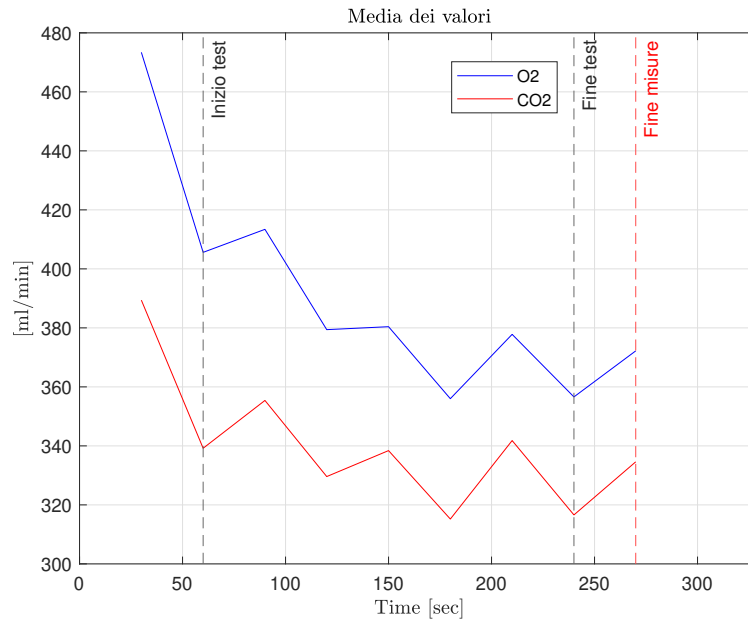


Figura 4.3: Valori medi di consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica del corpo umano in posizione seduta e immobile

$$\dot{E} = 16.58\dot{V}_{O_2} + 4.51\dot{V}_{CO_2} \quad (4.1)$$

Utilizzando tale equazione è stato ricavato l'andamento della potenza nel tempo rappresentato in Figura 4.4.

Come si può notare dai risultati, i valori ottenuti per il consumo di ossigeno sono tutto sommato coerenti in tutti i test effettuati mentre per la produzione di anidride carbonica si ha maggiore discordanza, soprattutto per il test 1 e il test 5.

I due grafici hanno un andamento decrescente nel tempo, di conseguenza anche l'andamento della potenza decresce durante l'intera esecuzione della prova. Questo è dovuto al rilassamento del corpo e quindi ad un minore utilizzo dei parametri respiratori man mano che si procede con la rilevazione dei dati.

Calcolando l'area sottesa dal grafico (trascurando i primi 30 secondi che equivalgono ad un periodo di riscaldamento) è stato possibile ricavare che il corpo umano ha consumato un'energia metabolica durante l'intera esecuzione della prova pari a 27232 J. Considerando che un essere umano di 80 Kg e 195 cm (pa-

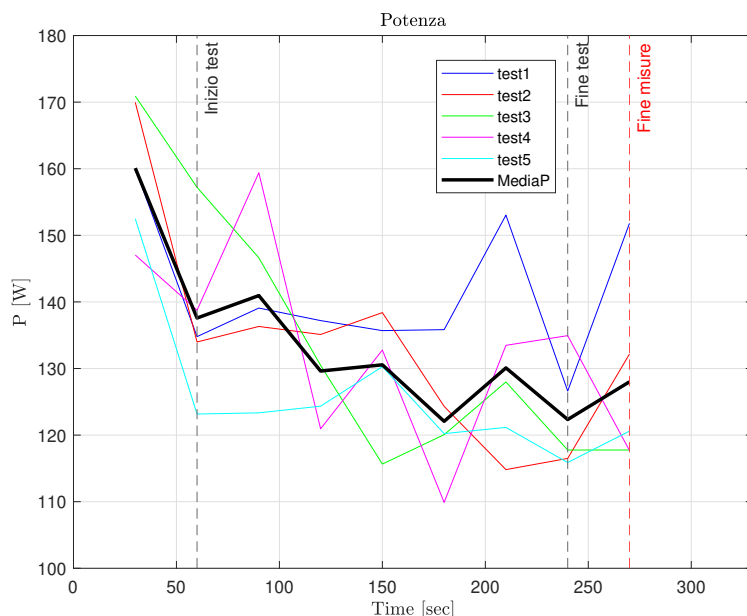


Figura 4.4: Andamento della potenza nel tempo ricavato con la formula di Broc-kway

rametri corporei del soggetto testato) a riposo consuma circa 1.4 Kcal/min [14], il che corrisponde a 5857 J/min, e quindi circa 23428 J per la durata di 4 minuti, il risultato ottenuto può essere considerato buono.

4.2 Misure di movimento di curl continuo

La seconda prova effettuata per il calcolo dei parametri respiratori utilizzando il metabolometro è stata strutturata nel seguente modo:

- 1 minuto di riscaldamento in cui il soggetto è seduto e immobile;
- 4 minuti di esecuzione della prova in cui il soggetto esegue dei sollevamenti delle braccia (curl), senza pesi, sfruttando l'uso dei bicipiti;
- 1 minuto di recupero con il soggetto in posizione seduta e immobile.

Per questa prova sono stati eseguiti quattro test, con un intervallo di 2 minuti tra un test e il successivo.

4.2.1 Risultati

La Figura 4.5, la Figura 4.6 e la Figura 4.7 mostrano rispettivamente il consumo di ossigeno, la produzione di anidride carbonica e la media dei valori nel tempo ottenuti per i vari test effettuati.

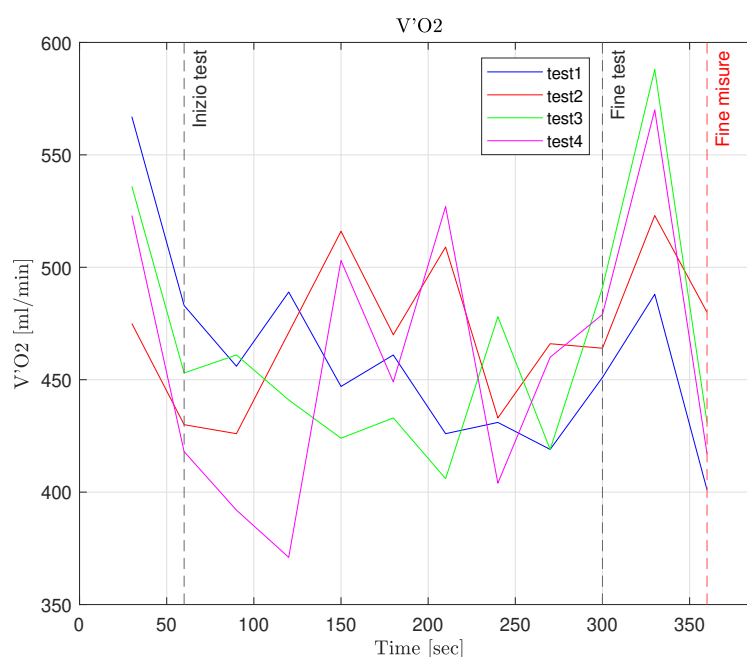


Figura 4.5: Consumo di ossigeno del corpo umano nella prova di sollevamento delle braccia senza l'uso di pesi

Utilizzando la formula di Brockway vista in precedenza, l'andamento della potenza nel tempo ottenuto è rappresentato in Figura 4.8.

I valori ricavati nelle varie misurazioni sono tutto sommato coerenti e non presentano una notevole deviazione. Si ha un decremento dei parametri respiratori nella fase di riscaldamento, dovuto probabilmente al rilassamento del corpo. Durante la fase di esecuzione, a differenza della prima prova, si hanno valori circa costanti fino alla fase di recupero, dove si ha un notevole aumento di potenza spesa. Considerando l'area sottesa dal grafico senza considerare il primo minuto di riscaldamento, risulta che il corpo umano ha consumato un'energia pari a 47202 J. Sottraendo tale valore al risultato ottenuto nella prima prova (rapportato a 5

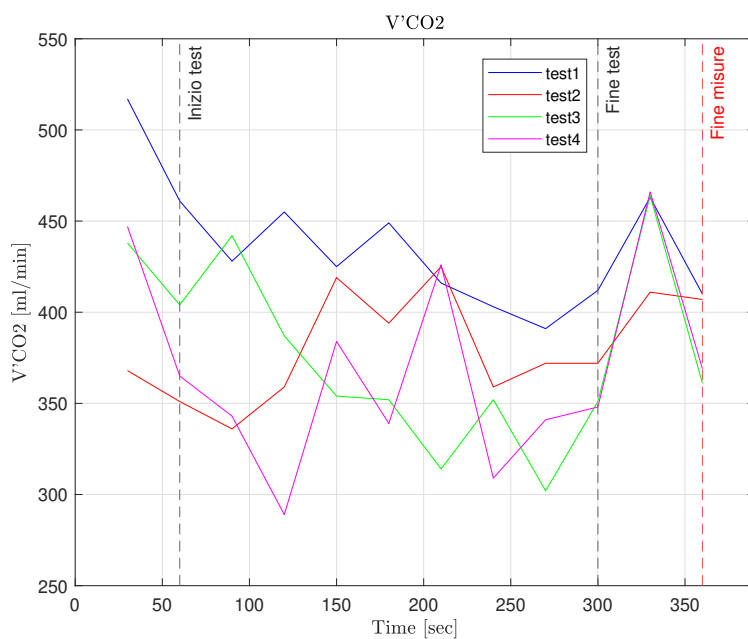


Figura 4.6: Produzione di anidride carbonica del corpo umano nella prova di sollevamento delle braccia senza l'uso di pesi

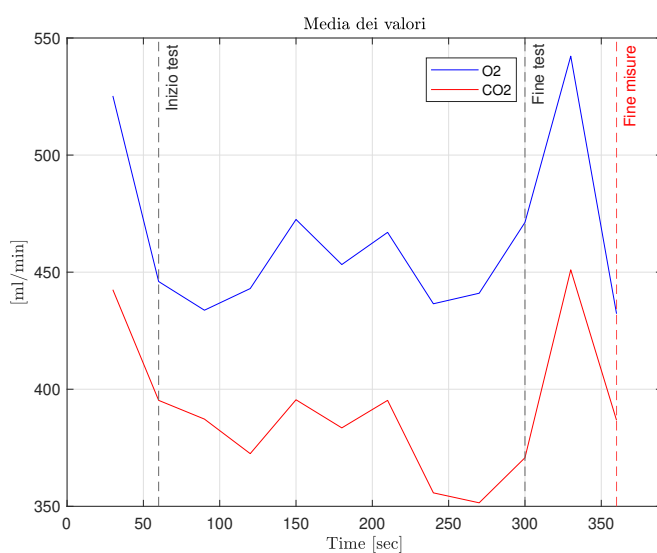


Figura 4.7: Valori medi di consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica del corpo umano nella prova di sollevamento delle braccia senza l'uso di pesi

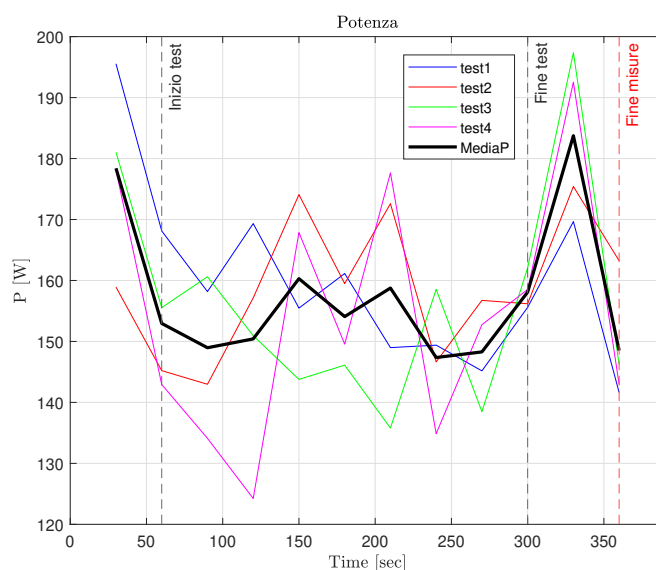


Figura 4.8: Andamento della potenza nel tempo ricavato con la formula di Broc-kway nella prova senza pesi

minuti di esecuzione della seconda prova), si ottiene un'energia netta pari a 8667 J.

4.3 Misure di movimento di curl intervallato

La terza prova eseguita consiste nel sollevamento delle braccia (curl con manubri), sfruttando l'uso dei bicipiti, utilizzando due pesi da 2 kg ciascuno. Ogni prova inizia con 30 secondi di riscaldamento in cui il soggetto è in posizione seduta immobile, in seguito inizia l'esecuzione della prova per una durata di 30 secondi, infine si hanno 30 secondi di recupero con il soggetto immobile; le fasi di esecuzione e recupero vengono ripetute 4 volte, per un totale di 4 minuti e 30 secondi per ogni prova. Sono stati effettuati tre test, adoperando un tempo di esecuzione di movimento (salita e discesa) rispettivamente di 6 secondi, 3 secondi e 2 secondi.

4.3.1 Risultati

Nei grafici seguenti sono rappresentati gli andamenti nel tempo del consumo di ossigeno (Fig. 4.9), della produzione di anidride carbonica (Fig. 4.10) e della

potenza calcolata con la formula di Brockway (Fig. 4.11).

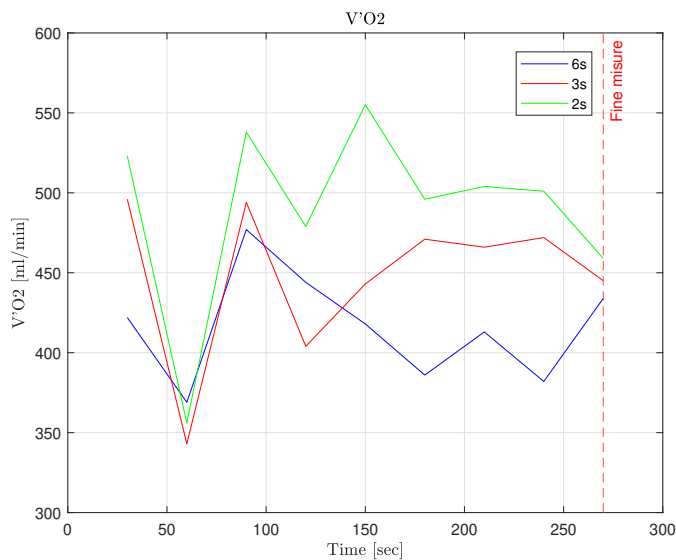


Figura 4.9: Consumo di ossigeno del corpo umano nella prova di sollevamento delle braccia con l'uso di pesi

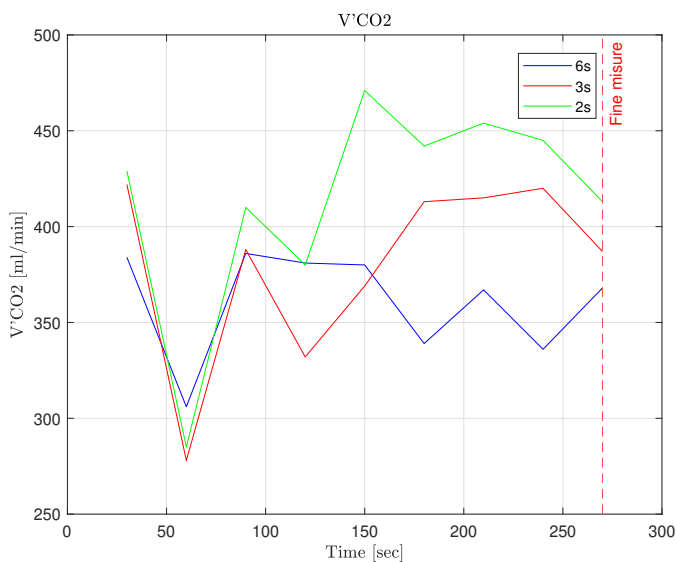


Figura 4.10: Produzione di anidride carbonica del corpo umano nella prova di sollevamento delle braccia senza l'uso di pesi

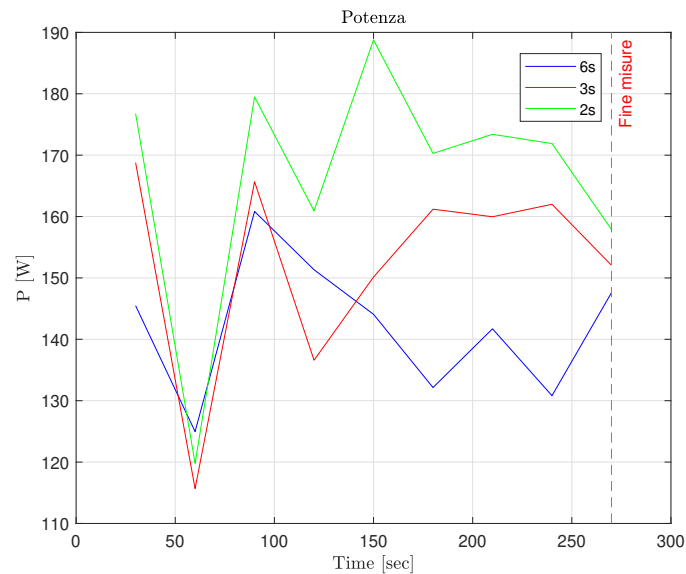


Figura 4.11: Andamento della potenza nel tempo ricavato con la formula di Broc-kway nella prova con i pesi

Come si può notare dai grafici, la potenza spesa per l'esecuzione dei movimenti cresce con la frequenza di movimento; calcolando l'area sottesa infatti si ricava un'energia totale rispettivamente pari a 33972 J, 36350 J e 39956 J.

In questa prova l'energia per movimento è stata ottenuta andando a calcolare inizialmente le energie ottenute nelle quattro fasi di ogni singola prova (30 secondi di esecuzione più 30 secondi di recupero) ed eseguendo quindi la media tra di esse. Sottraendo a tale valore l'energia basale pari a 7041 J (ottenuta dalla prima prova rapportata ad un minuto) si ottiene l'energia spesa dal corpo umano per il movimento delle braccia nell'esecuzione della prova. Infine, dividendo per la frequenza di movimento (5, 10 e 15 rispettivamente) e dimezzando il valore per ottenere l'energia di un solo braccio, si ricava il consumo energetico per singolo movimento.

L'energia per movimento del singolo braccio calcolata per le prove con frequenza di 6 secondi, 3 secondi e 2 secondi sono rispettivamente di 169.3 J, 110.84 J e 103.67 J, quindi tale energia diminuisce all'aumentare della frequenza di movimento. Da tali risultati si può ricavare un aumento percentuale dell'34% tra il primo e il secondo test, e un incremento percentuale del 7% tra il secondo e il

terzo test.

Per confrontare la veridicità di tali valori ottenuti, si è utilizzato il modello matematico sviluppato in Matlab che simula il movimento del braccio umano, calcolando l'energia utilizzata per eseguire tale attività.

Utilizzando tale modello, i valori calcolati per singolo movimento per le tre durate di movimento sono rispettivamente di 31.98 J, 17.24 J e 12.68 J. Essi sono valori inferiori rispetto a quelli ottenuti con le prove sperimentali, calcolando l'incremento percentuale si ha un aumento dell'46% passando da 6 a 3 secondi di movimento e un aumento del 26% passando da 3 a 2 secondi di movimento.

Ciò significa che è necessario l'utilizzo di fattori correttivi per validare il modello matematico sulla base di prove sperimentali.

4.4 Considerazioni finali

A seguito delle prove eseguite per la verifica della precisione dello strumento, si evince che l'uso del metabolimetro è un metodo che offre una buona approssimazione per il calcolo dell'energia metabolica di una persona durante l'esecuzione di movimenti: le varie imprecisioni possono essere date dalla lettura dei dati con cadenza di 30 secondi oppure dalle approssimazioni adoperate con la formula di Brockway.

Si è deciso quindi di eseguire le prove da seduto, in modo da eliminare la componente energetica delle gambe, e di studiare solamente un giunto per volta per ogni test, in modo da avere risultati più precisi. Inoltre le prove sono state strutturate come il test presente nell'ultimo sottocapitolo, con 30 secondi di esecuzione seguiti da 30 secondi di recupero, questo per eliminare il notevole aumento dell'energia che si avrebbe nella fase di recupero in una prova continua, come si è visto nella seconda prova.

Le prove sperimentali eseguite sui soggetti verranno trattate nei successivi capitoli.

Capitolo 5

Prove sperimentali

Scopo del seguente capitolo è quello di descrivere le prove sperimentali eseguite per determinare il costo energetico speso in semplici movimenti articolari e analizzare i dati raccolti, tali risultati serviranno in seguito per validare il modello dinamico proposto in Matlab.

5.1 Metodologia

5.1.1 Soggetti

Sette soggetti maschili sani e in ottima condizione, volontari per l'esecuzione delle prove, sono stati analizzati in questo studio. L'età media dei selezionati è di 25.6 anni, l'altezza media è di 184.6 cm e il peso medio è di 80.6 kg. Per il confronto con il modello dinamico sono state misurate anche la lunghezza del braccio e dell'avambraccio per ogni singolo soggetto. Le prove sono state eseguite presso i laboratori di Robotica Industriale dell'Università di Padova. Per ogni soggetto è stato acquisito il consenso informativo per l'esecuzione delle prove e il trattamento dei dati.

5.1.2 Procedura

Prima prova

La prima prova consiste nell'eseguire dei movimenti di curl per bicipiti (Fig. 5.1) già descritti nel capitolo 4 per la verifica della validità del metabolimetro.

Tale prova è stata strutturata nel seguente modo: 30 secondi iniziali di riposo in cui il soggetto si trova in posizione seduta e immobile, 30 secondi di esecuzione della prova e 30 secondi di recupero con il soggetto fermo; esecuzione e recupero vengono ripetute altre tre volte, per una durata totale della prova di 4 minuti e 30 secondi. Per tale esecuzione sono stati eseguiti tre test: nel primo il tempo di movimento del curl (salita e discesa) è di 6 secondi, nel secondo il tempo di movimento viene ridotto a 3 secondi mentre nel terzo vengono utilizzati due manubri da 2 kg ciascuno, con un tempo di movimento sempre di 3 secondi. Per il primo test quindi si hanno 5 ripetizioni eseguite in 30 secondi mentre per il secondo e terzo test la frequenza diventa di 10 ripetizioni ogni 30 secondi.

Obiettivo della prova descritta è quello di determinare l'energia consumata dal giunto 4 del braccio, responsabile del movimento del gomito.

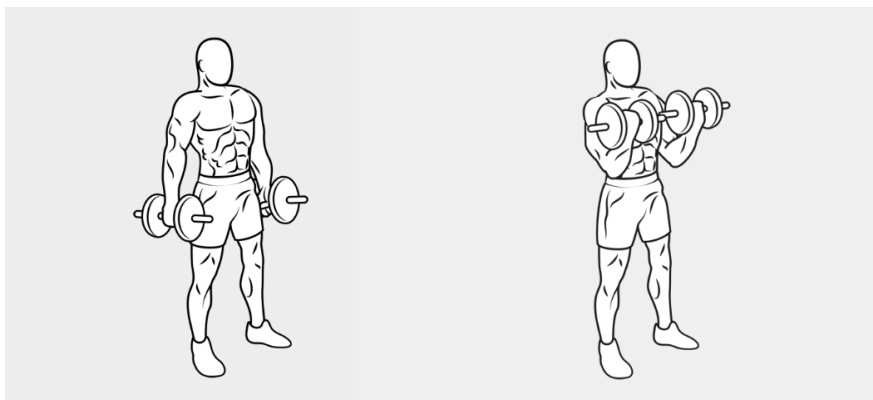


Figura 5.1: Movimento articolare eseguito nella prima prova. Durante i test il soggetto è seduto per eliminare la componente energetica delle gambe [15]

Seconda prova

La seconda prova effettuata consiste in un movimento di alzate frontali con entrambe le braccia (Fig. 5.2), con il soggetto in posizione seduta.

La prova viene strutturata come la precedente, con 30 secondi di riposo e 4 esecuzioni del movimento, intervallati da 30 secondi di recupero. Due test sono stati eseguiti per questa prova: nel primo è stato utilizzato un tempo di movimento di 6 secondi (per un totale di 5 ripetizioni ogni 30 secondi) e nel secondo un tempo di movimento di 3 secondi (per un totale di 10 ripetizioni ogni 30 secondi). Entrambi test sono stati eseguiti senza l'uso dei manubri e l'obiettivo finale è quello di determinare l'energia consumata dal giunto 2, responsabile del movimento della spalla.



Figura 5.2: Movimento articolare eseguito nella seconda prova. Durante i test il soggetto è seduto per eliminare la componente energetica delle gambe. Entrambi i test sono stati effettuati senza l'uso dei manubri [15]

Terza prova

Nella terza prova ad ogni soggetto è stato chiesto di effettuare dei movimenti laterali con entrambe le braccia dritte in avanti (Fig. 5.3).

Tale prova è stata strutturata come le due prove viste in precedenza, utilizzando due diversi tempi di movimento di 6 secondi e 3 secondi. All'inizio dei due test è stata eseguita un'ulteriore prova nella quale il soggetto tiene per 30 secondi le braccia dritte ferme in avanti. In questo modo, andando a sottrarre tale consumo energetico all'energia totale ricavata nei due test, è stato possibile ricavare l'energia consumata dal giunto 1, responsabile del movimento rotazionale della spalla, e trascurare la componente energetica del giunto 2.

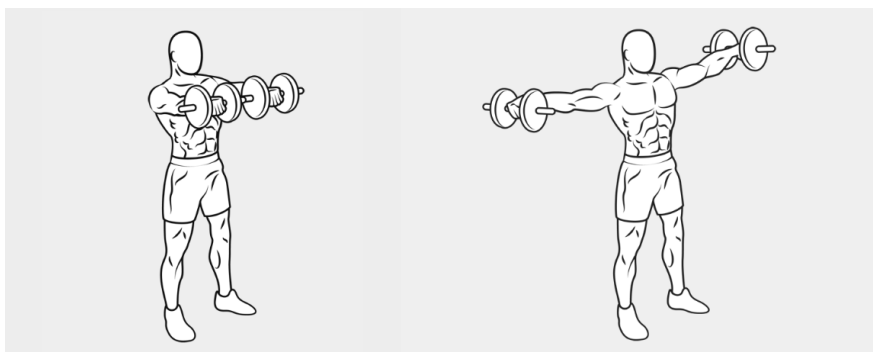


Figura 5.3: Movimento articolare eseguito nella terza prova. Durante i test il soggetto è seduto per eliminare la componente energetica delle gambe. Entrambi i test sono stati effettuati senza l'uso dei manubri [15]

5.2 Risultati

In questo sottocapitolo verranno presentati e analizzati i dati raccolti per ogni prova sperimentale effettuata.

5.2.1 Prima prova

In Figura 5.4 sono rappresentati gli andamenti medi del consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica per la prova di curl per bicipiti con un tempo di movimento di 6 secondi; in Figura 5.5 invece sono rappresentati gli andamenti della potenza spesa per ogni soggetto e quella media (curva nera), ricavati con la formula di Brockway già vista in precedenza. Come si può notare sia i parametri respiratori sia il consumo energetico decrescono leggermente nel tempo, questo probabilmente indica che la prova effettuata non è stata particolarmente faticosa dal punto di vista energetico per ogni soggetto.

Per ogni soggetto è stata ricavata l'energia consumata eseguendo una media sui valori di consumo energetico calcolati sulle quattro diverse fasi di esecuzione e recupero della prova dalla durata di un minuto ciascuna. A tale energia viene sottratto il consumo metabolico diverso per ogni soggetto ed infine, dividendo per 5 (numero di ripetizioni del movimento) e per 2 (per considerare il singolo arto), è stato ottenuto il consumo per singolo movimento per un solo braccio. I risultati ottenuti sono in Tabella 5.1.

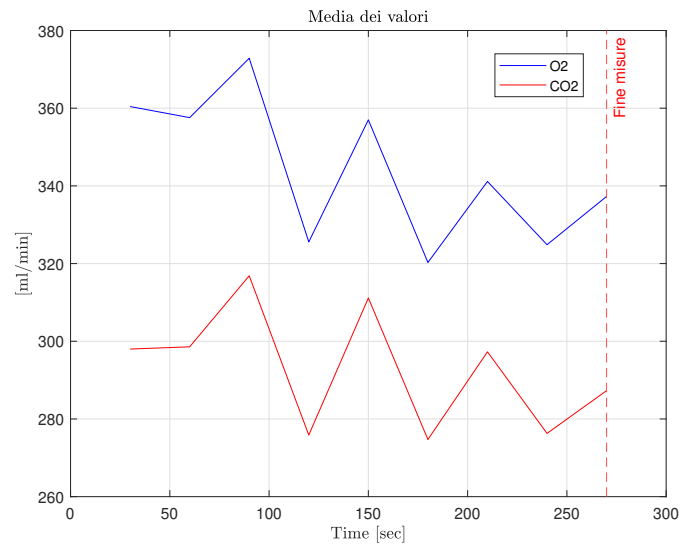


Figura 5.4: Andamento del consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica registrato dal metabolimetro per la prova di curl per bicipiti con tempo di movimento di 6 secondi

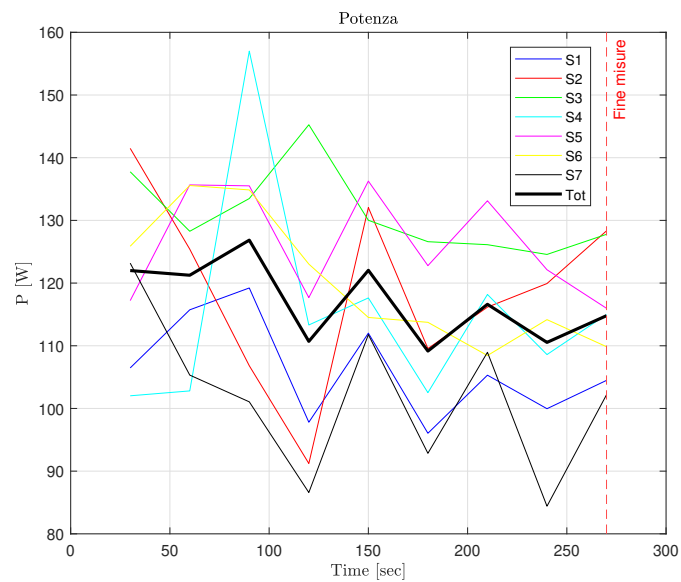


Figura 5.5: Andamento della potenza spesa calcolata con la formula di Brockway per la prova di curl per bicipiti con tempo di movimento di 6 secondi

Soggetto	Energia	Energia metabolica	Energia per movimento
1	6379.2 J	4866 J	151.32 J
2	6971.1 J	5971 J	100 J
3	7815.8 J	5841 J	197.47 J
4	7012.7 J	5373 J	164 J
5	7643.5 J	4826 J	281.7 J
6	7156.3 J	5125 J	203.1 J
7	5948.6 J	4268 J	168.11 J

Tabella 5.1: Valori energetici per ogni soggetto calcolati nella prova di curl per bicipiti con tempo di movimento di 6 secondi

L'andamento del consumo di ossigeno e della produzione di anidride carbonica nella prova di curl per bicipiti con un movimento di 3 secondi senza manubri è rappresentato in Figura 5.6, come si può vedere tali due parametri aumentano nel tempo, di conseguenza anche la potenza spesa ha un andamento crescente nel tempo (Fig. 5.7).

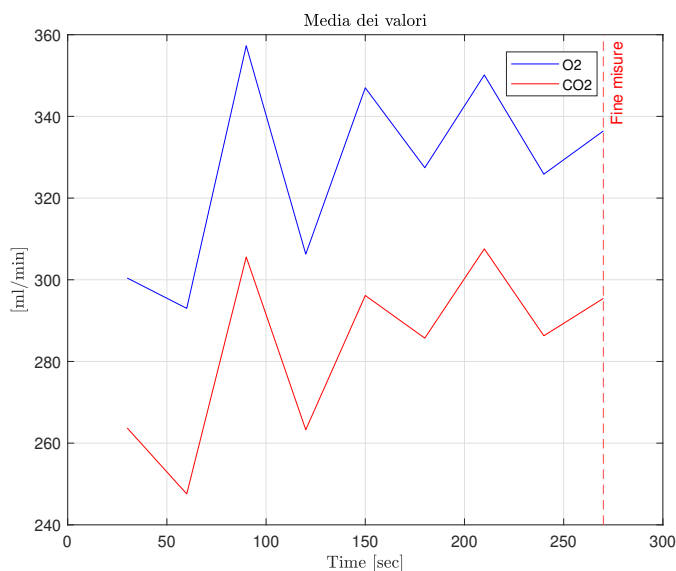


Figura 5.6: Andamento del consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica registrato dal metabolimetro per la prova di curl per bicipiti con tempo di movimento di 3 secondi senza manubri

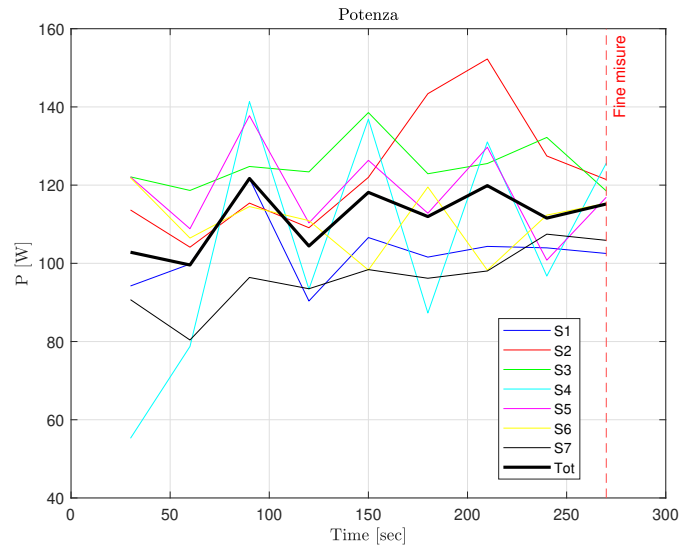


Figura 5.7: Andamento della potenza spesa calcolata con la formula di Brockway per la prova di curl per bicipiti con tempo di movimento di 3 secondi senza manubri

In Tabella 5.2 sono presenti i valori ricavati in questo test; allo stesso modo visto per le prove del capitolo 4, l'energia per movimento risulta minore per ogni soggetto rispetto al test con 6 secondi di movimento, in quanto nello stesso intervallo di tempo si eseguono il doppio delle ripetizioni.

Soggetto	Energia	Energia metabolica	Energia per movimento
1	6231.6 J	4866 J	68.28 J
2	7463.6 J	5971 J	74.63 J
3	7533.6 J	5841 J	84.63 J
4	6683 J	5373 J	65.5 J
5	7076 J	4826 J	112.5 J
6	6567.4 J	5125 J	72.12 J
7	5821.7 J	4268 J	77.71 J

Tabella 5.2: Valori energetici per ogni soggetto calcolati nella prova di curl per bicipiti con tempo di movimento di 3 secondi senza manubri

Infine sono stati studiati i risultati ottenuti per il test del curl per bicipiti con movimento di 3 secondi utilizzando due manubri da 2 kg ciascuno; l'andamento

dei parametri respiratori e della potenza sono raffigurati rispettivamente in Figura 5.8 e in Figura 5.9; anche in questo caso, come nel test precedente, essi risultano crescere all'aumentare del tempo.

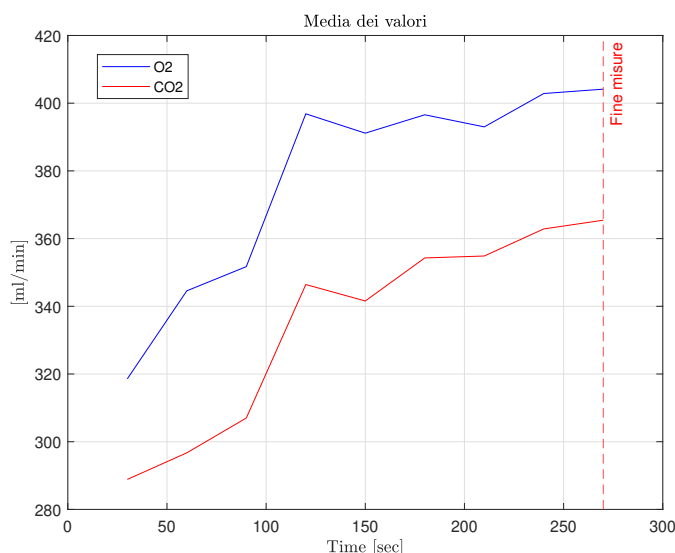


Figura 5.8: Andamento del consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica registrato dal metabolimetro per la prova di curl per bicipiti con tempo di movimento di 3 secondi con manubri

Dalla Tabella 5.3 dei risultati ottenuti si evince come l'energia totale spesa sia maggiore dei casi precedenti, mentre l'energia per movimento risulta comunque minore del test con tempo di movimento di 6 secondi (tranne per il soggetto 2).

5.2.2 Seconda prova

In Figura 5.10 è rappresentato l'andamento del consumo di ossigeno e di produzione di anidride carbonica nel corso della prova di alzate frontali con un tempo di movimento di 6 secondi (3 secondi per la salita e 3 secondi per la discesa); allo stesso modo visto in precedenza, tramite formula di Brockway, si ricava l'andamento nel tempo della potenza spesa nell'esercizio, come si può notare in Figura 5.11.

Le energie totali e per movimento spese in questo esercizio per ogni soggetto sono presenti in Tabella 5.4; si può evincere come tali valori siano maggiori dei

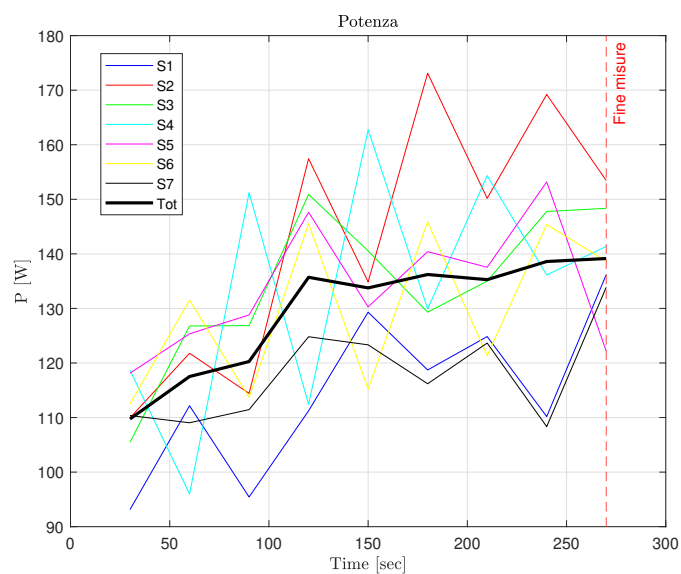


Figura 5.9: Andamento della potenza spesa calcolata con la formula di Brockway per la prova di curl per bicipiti con tempo di movimento di 3 secondi con manubri

Soggetto	Energia	Energia metabolica	Energia per movimento
1	7035.6 J	4866 J	108.48 J
2	8808.2 J	5971 J	141.86 J
3	8291.2 J	5841 J	122.51 J
4	8131 J	5373 J	137.9 J
5	8140 J	4826 J	165.7 J
6	7929 J	5125 J	140.2 J
7	7130.1 J	4268 J	143.13 J

Tabella 5.3: Valori energetici per ogni soggetto calcolati nella prova di curl per bicipiti con tempo di movimento di 3 secondi con manubri

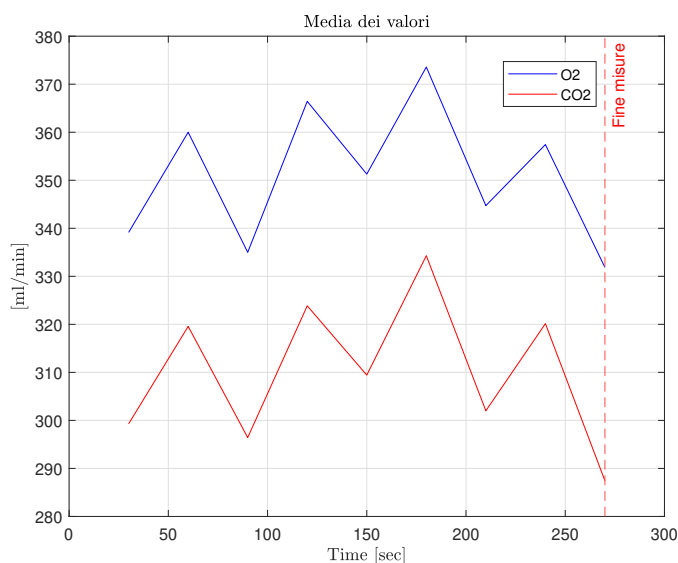


Figura 5.10: Andamento del consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica registrato dal metabolimetro per la prova di alzate frontali con tempo di movimento di 6 secondi

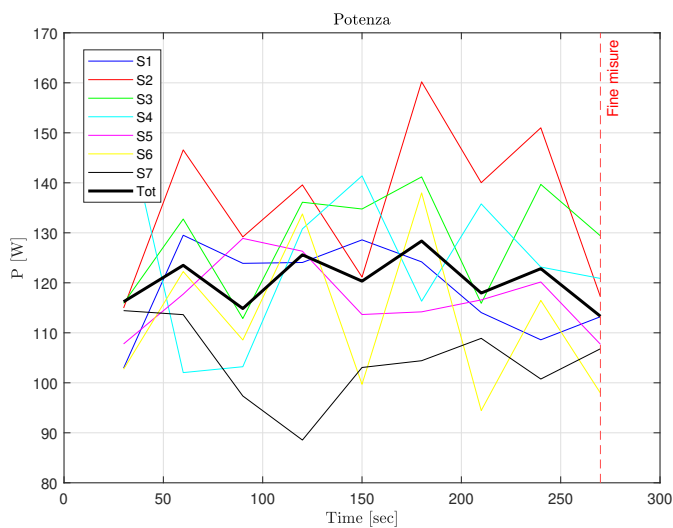


Figura 5.11: Andamento della potenza spesa calcolata con la formula di Brockway per la prova di alzate frontali con tempo di movimento di 6 secondi

risultati ottenuti per la prova di curl con lo stesso tempo di movimento (ad eccezione per i soggetti 5 e 6), questo può significare che tale prova sia risultata più faticosa dal punto di vista energetico rispetto alla precedente.

Soggetto	Energia	Energia metabolica	Energia per movimento
1	7246 J	4866 J	238 J
2	8287 J	5971 J	231.6 J
3	7820 J	5841 J	197.9 J
4	7301.8 J	5373 J	192.88 J
5	7089.3 J	4826 J	226.33 J
6	6833.6 J	5125 J	170.86 J
7	6176.1 J	4268 J	190.86 J

Tabella 5.4: Valori energetici per ogni soggetto calcolati nella prova di alzate frontali con tempo di movimento di 6 secondi

Dallo studio dei risultati per il test delle alzate frontali con tempo di movimento di 3 secondi si ricava che l'andamento del consumo di ossigeno e della produzione di anidride carbonica aumenta leggermente durante l'esecuzione della prova (Fig. 5.12), di conseguenza anche l'andamento della potenza cresce nel tempo, come si può notare dalla Figura 5.13.

Dai valori presenti in Tabella si nota come questa prova sia risultata più dispendiosa dal punto di vista energetico sia in confronto con il test precedente sia con la prova di curl per bicipiti senza manubri; per quanto riguarda l'energia per movimento risulta comunque minore rispetto allo stesso movimento più lento.

5.2.3 Terza prova

All'inizio della terza prova è stato eseguito un ulteriore test per calcolare l'energia spesa per tenere entrambe le braccia dritte in avanti, in modo da poter trascurare in seguito la componente energetica del giunto 2 e considerare solamente quella del giunto 1. L'andamento della potenza nel tempo di tale prova è rappresentato in Figura 5.14.

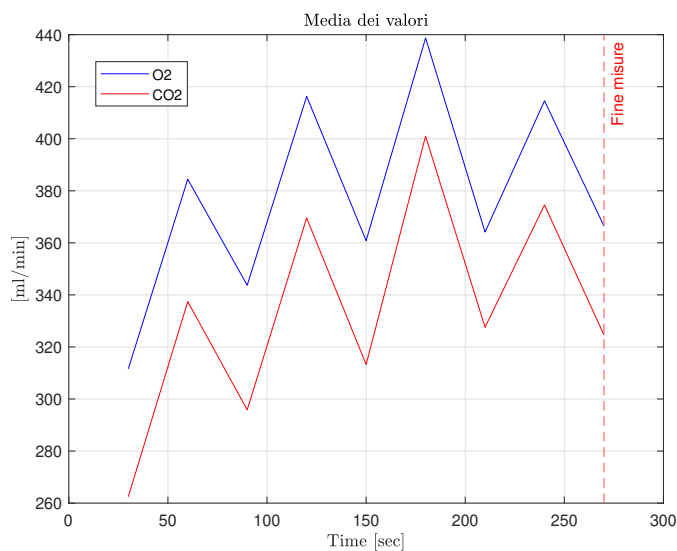


Figura 5.12: Andamento del consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica registrato dal metabolimetro per la prova di alzate frontali con tempo di movimento di 3 secondi

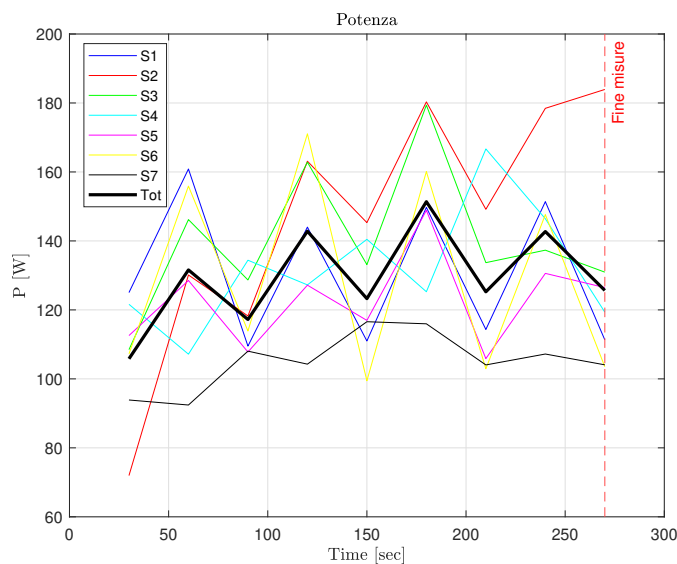


Figura 5.13: Andamento della potenza spesa calcolata con la formula di Brockway per la prova di alzate frontali con tempo di movimento di 3 secondi

Soggetto	Energia	Energia metabolica	Energia per movimento
1	7890 J	4866 J	151.2 J
2	9365 J	5971 J	169.7 J
3	8641 J	5841 J	140 J
4	8002.4 J	5373 J	131.47 J
5	7442 J	4826 J	130.8 J
6	7909 J	5125 J	139.2 J
7	6394.3 J	4268 J	106.34 J

Tabella 5.5: Valori energetici per ogni soggetto calcolati nella prova di alzate frontali con tempo di movimento di 3 secondi

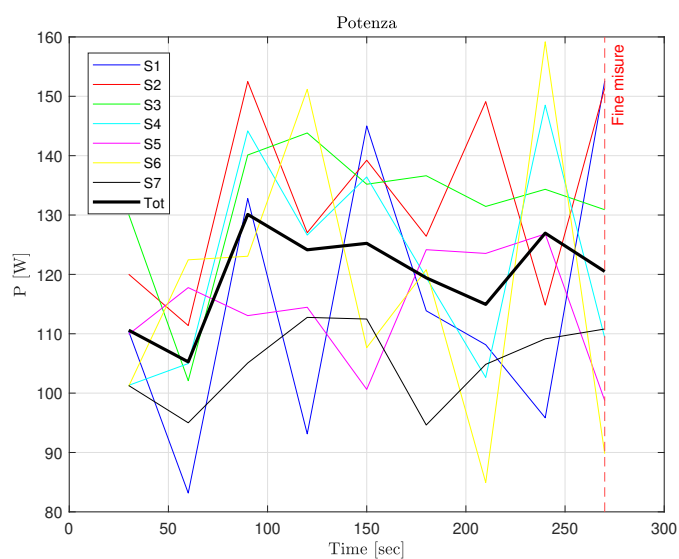


Figura 5.14: Andamento della potenza spesa calcolata con la formula di Brockway per la prova di mantenimento delle braccia dritte in avanti

In Figura 5.15 e in Figura 5.16 invece sono rappresentati i grafici dei parametri respiratori e della potenza per la prova di movimenti laterali con braccia dritte con tempo di esercizio di 6 secondi (3 secondi di apertura e 3 secondi di chiusura); si nota un andamento costante nel tempo tra tutti i soggetti.

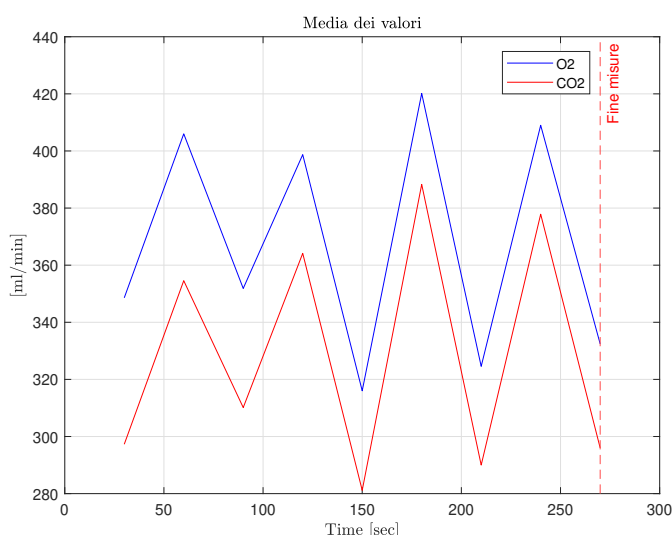


Figura 5.15: Andamento del consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica registrato dal metabolimetro per la prova di movimenti laterali con braccia dritte con tempo di esercizio di 6 secondi

I valori ottenuti sono presenti in Tabella 5.6, com'era prevedibile l'energia per movimento è minore rispetto alle prove precedenti in quanto al consumo energetico totale è stato sottratta l'energia per il mantenimento delle braccia dritte.

Riducendo invece il tempo di esercizio a 3 secondi (1.5 secondi per l'apertura e 1.5 secondi per la chiusura) si ottengono gli andamenti di consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica e della potenza nel tempo presenti in Figura 5.17 e in Figura 5.18. Anche in questo caso si osserva una coerenza tra i dati ottenuti per i vari soggetti.

Com'era prevedibile, i valori di energia totale ottenuti sono maggiori rispetto a quelli ottenuti nel test precedente, in Tabella 5.7 sono presenti i risultati ricavati.

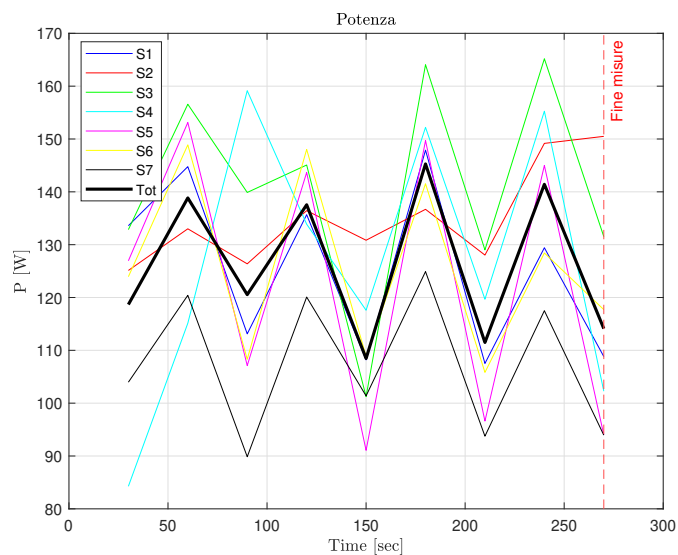


Figura 5.16: Andamento della potenza spesa calcolata con la formula di Brockway per la prova di movimenti laterali con braccia dritte con tempo di esercizio di 6 secondi

Soggetto	Energia	Energia giunto 2	Energia per movimento
1	7465.5 J	6933.9 J	53.16 J
2	8182.8 J	8038.8 J	14.4 J
3	8494.3 J	7908.8 J	58.55 J
4	7913.5 J	7441 J	47.25 J
5	7351.1 J	6893.9 J	45.81 J
6	7557 J	7192.8 J	36.42 J
7	6463.8 J	6335.5 J	12.83 J

Tabella 5.6: Valori energetici per ogni soggetto calcolati nella prova di movimenti laterali con braccia dritte con tempo di esercizio di 6 secondi

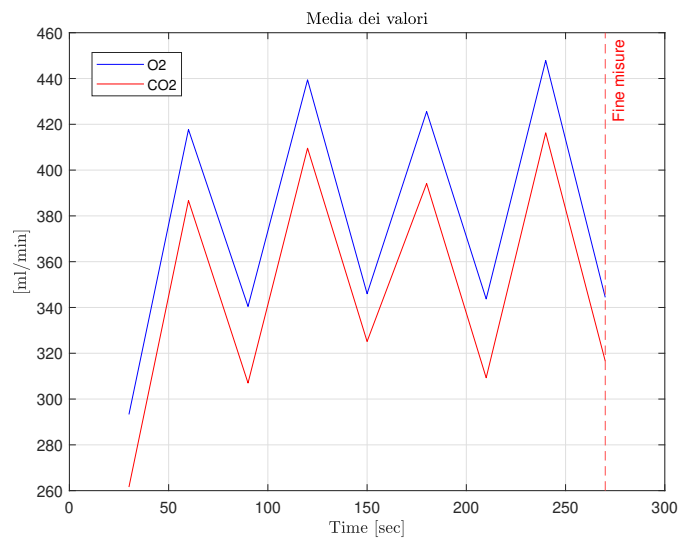


Figura 5.17: Andamento del consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica registrato dal metabolimetro per la prova di movimenti laterali con braccia dritte con tempo di esercizio di 3 secondi

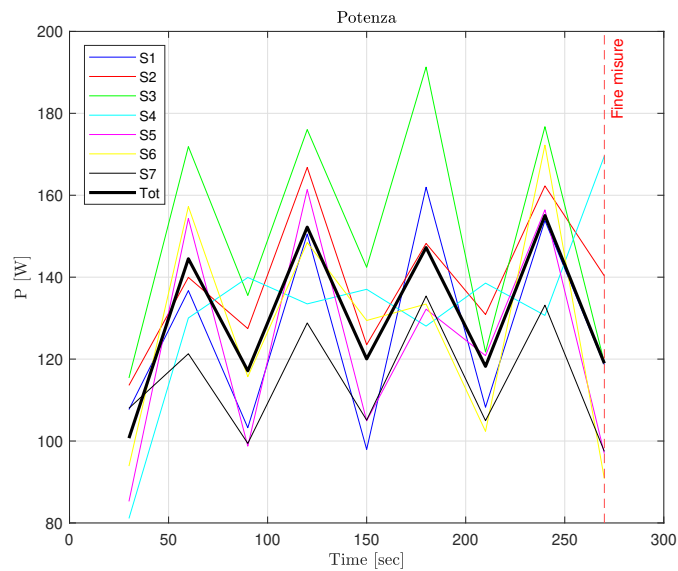


Figura 5.18: Andamento della potenza spesa calcolata con la formula di Brockway per la prova di movimenti laterali con braccia dritte con tempo di esercizio di 3 secondi

Soggetto	Energia	Energia giunto 2	Energia per movimento
1	7733.1 J	6933.9 J	39.96 J
2	8545.6 J	8038.8 J	25.34 J
3	9260.6 J	7908.8 J	67.59 J
4	8305 J	7441 J	43.2 J
5	7693.3 J	6893.9 J	39.97 J
6	7872.6 J	7192.8 J	33.99 J
7	6942.3 J	6335.5 J	30.34 J

Tabella 5.7: Valori energetici per ogni soggetto calcolati nella prova di movimenti laterali con braccia dritte con tempo di esercizio di 3 secondi

Capitolo 6

Calibrazione del modello

Obiettivo di tale capitolo è quello di ricavare, sulla base dei risultati ottenuti dalle prove sperimentali, le correzioni che serviranno a validare il modello matematico proposto su Matlab; in seguito, per testare la veridicità di tali correzioni, viene eseguito un confronto tra i dati ricavati dal modello modificato e i risultati misurati in un'ulteriore prova sperimentale.

6.1 Correzione del modello

6.1.1 Energia del giunto 4

I valori energetici ricavati nella prova di curl per bicipiti con tempo di movimento di 6 secondi sono stati graficati in funzione della massa e dell'altezza di ogni singolo soggetto e interpolati utilizzando un polinomio di secondo grado del tipo:

$$k_{joint} = \alpha_1 + \alpha_2 w + \alpha_3 h + \alpha_4 wh \quad (6.1)$$

dove w è il peso in kg del soggetto, h l'altezza in cm del soggetto e k l'energia in Joule spesa dal giunto utilizzato durante il movimento.

Il grafico ottenuto è rappresentato in Figura 6.1 ed ha un coefficiente di correlazione R^2 di 0.69, risultato quindi accettabile. Si nota inoltre che all'aumentare del peso l'energia spesa per il movimento aumenta, viceversa il consumo energetico diminuisce all'aumentare dell'altezza.

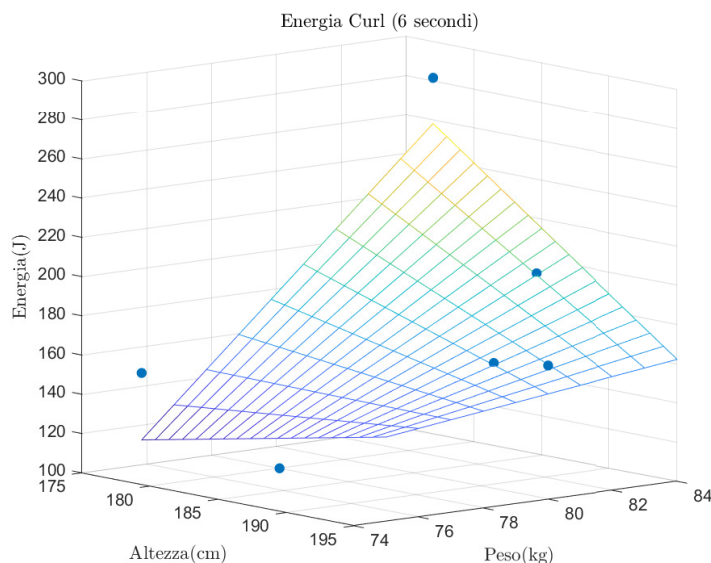


Figura 6.1: Energia per movimento in funzione del peso e dell'altezza di ogni soggetto nella prova di curl per bicipiti con tempo di movimento di 6 secondi

Per quanto riguarda la stessa esecuzione con un tempo di movimento di 3 secondi, graficando i dati in funzione di massa e altezza come nel caso precedente, si ottiene l'andamento rappresentato in Figura 6.2, il quale ha un fattore di correlazione R^2 di 0.76, risultato anch'esso accettabile.

Dal grafico dei dati raccolti nella prova con i manubri da 2 kg ciascuno in funzione della massa e dell'altezza rappresentato in Figura 6.3 si nota un andamento simile a quello visto in precedenza per il test con 3 secondi di movimento senza manubri; inoltre tale grafico ha un coefficiente di correlazione R^2 pari a 0.92, risultato quindi più che accettabile.

Infine un ulteriore confronto è stato eseguito ponendo tutti i dati energetici raccolti dalla prova di curl per bicipiti, normalizzati rispetto al valore massimo del rispettivo test, in funzione di massa e altezza dei soggetti. Il grafico ottenuto è rappresentato in Figura 6.4 ed ha un andamento a parabola simile a quelli visti per i movimenti realizzati con un tempo di esercizio di 3 secondi con e senza pesi; il fattore di correlazione è pari a 0.5.

Il polinomio che si ottiene risulta pari a:

$$k_4 = -68.6 + 0.37w + 0.88h - 0.0047wh \quad (6.2)$$

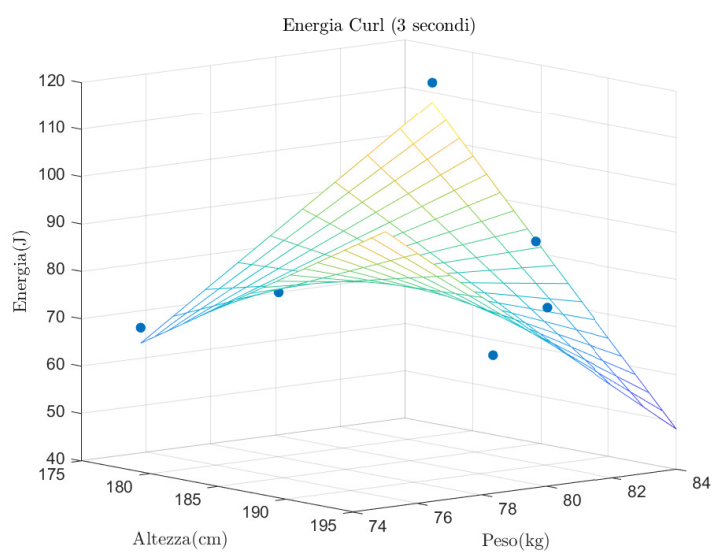


Figura 6.2: Energia per movimento in funzione del peso e dell'altezza di ogni soggetto nella prova di curl per bicipiti con tempo di movimento di 3 secondi senza manubri

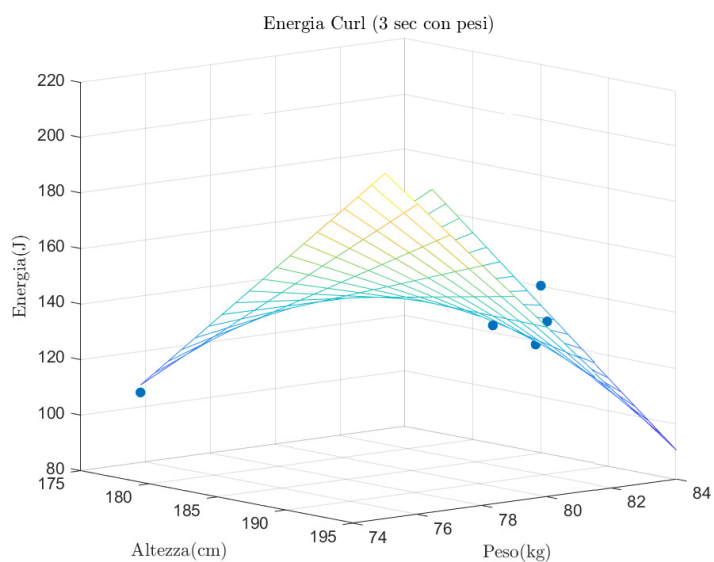


Figura 6.3: Energia per movimento in funzione del peso e dell'altezza di ogni soggetto nella prova di curl per bicipiti con tempo di movimento di 3 secondi con manubri

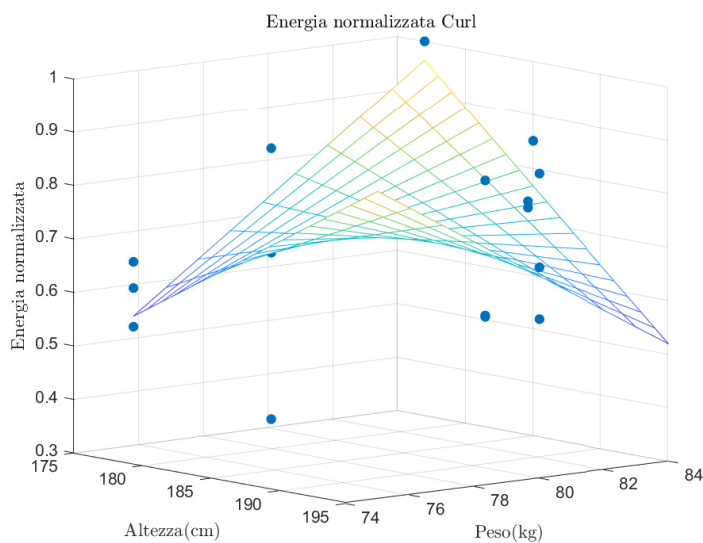


Figura 6.4: Energia per movimento normalizzata in funzione del peso e dell'altezza di ogni soggetto nelle tre prove di curl per bicipiti

L'esecuzione del curl per bicipiti viene quindi riproposta nel modello matematico in Matlab (rappresentata in Figura 6.5), dove l'avambraccio si muove da un $\theta_i = 85^\circ$ ad un $\theta_f = 135^\circ$ lungo il piano yz .

Le dimensioni del braccio nel modello sono prese in base alle dimensioni antropometriche di ogni singolo soggetto, in modo da avere risultati più accurati.

Andando ad eseguire un rapporto tra i valori energetici ricavati dalle prove con i consumi energetici previsti dal modello per ogni soggetto ed eseguendo una

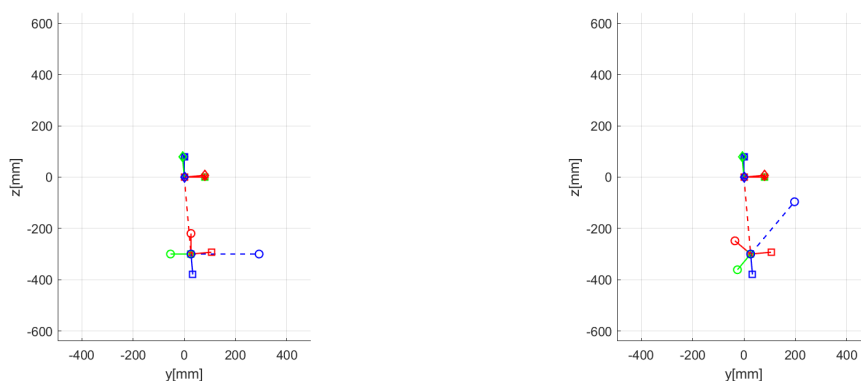


Figura 6.5: Movimento di curl per bicipiti riprodotto nel modello matematico in Matlab

media dei risultati, si ottiene un fattore correttivo di 11.16.

Il calcolo dell'energia per il giunto 4 nel modello corretto viene quindi così proposto:

$$k_{4,corretto} = k_{4,modello}(-68.6 + 0.37w + 0.88h - 0.0047wh) \cdot 11.16 \quad (6.3)$$

6.1.2 Energia del giunto 2

In Figura 6.6 è rappresentata la relazione tra le energie per movimento ottenute nella prova di alzate frontali eseguite in 6 secondi e la massa e l'altezza di ogni soggetto utilizzando, come visto in precedenza, il polinomio interpolante di secondo grado trascurando i termini quadratici. Tale andamento, il quale possiede un coefficiente di correlazione di 0.88, dimostra come l'energia per movimento diminuisce all'aumentare della massa e dell'altezza.

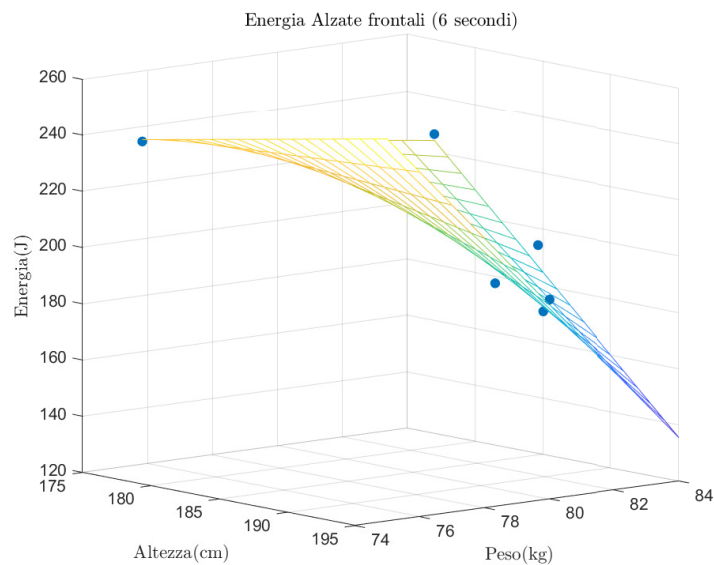


Figura 6.6: Energia per movimento in funzione del peso e dell'altezza di ogni soggetto nella prova di alzate frontali con tempo di movimento di 6 secondi

Analizzando invece il test con un tempo di movimento di 3 secondi, dalla relazione tra energia per movimento e massa e altezza si ottiene un grafico leggermente diverso rispetto a quello precedente, nonostante la spesa energetica

diminuisca comunque all'aumentare del peso (Fig. 6.7). Il fattore di correlazione R^2 di tale grafico risulta pari a 0.61.

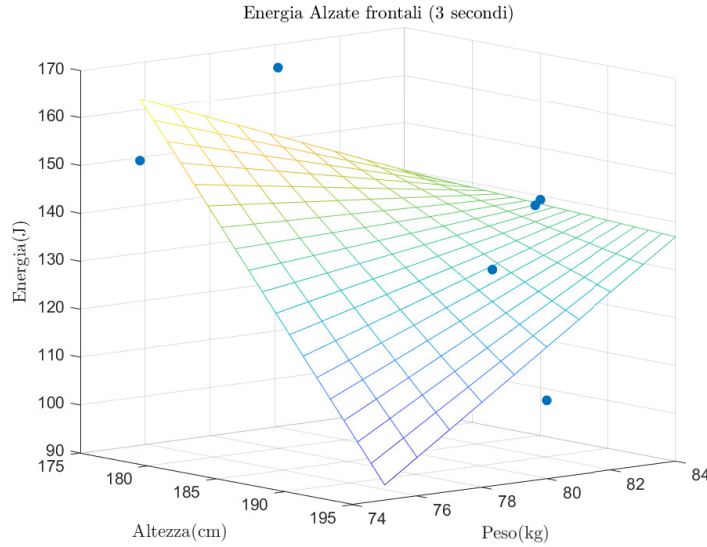


Figura 6.7: Energia per movimento in funzione del peso e dell'altezza di ogni soggetto nella prova di alzate frontali con tempo di movimento di 3 secondi

Unendo i valori energetici normalizzati ottenuti nei due test in un unico grafico in funzione dell'altezza e del peso dei soggetti si ottiene il risultato presente in Figura 6.8, nel quale si nota l'andamento rettilineo che esprime una diminuzione lineare dell'energia all'aumentare dei due parametri corporei; il coefficiente di correlazione è 0.6. Il polinomio risultante è:

$$k_2 = 1.785 + (3.36 \cdot 10^{-4})w + 0.01h - (1.32 \cdot 10^{-4})wh \quad (6.4)$$

Come visto per la prova precedente, l'attività di alzata frontale viene analizzata nel modello in Matlab; in Figura 6.9 si nota un movimento del braccio da un $\theta_i = -85^\circ$ ad un $\theta_f = 5^\circ$ sempre nel piano yz .

Il fattore correttivo che si ottiene eseguendo il rapporto tra i valori sperimentali e le previsioni energetiche del modello risulta pari a 3.84

La correzione per il calcolo dell'energia del giunto 2 nel modello diventa quindi:

$$k_{2,corretto} = k_{2,modello}[1.785 + (3.36 \cdot 10^{-4})w + 0.01h - (1.32 \cdot 10^{-4})wh] \cdot 3.84 \quad (6.5)$$

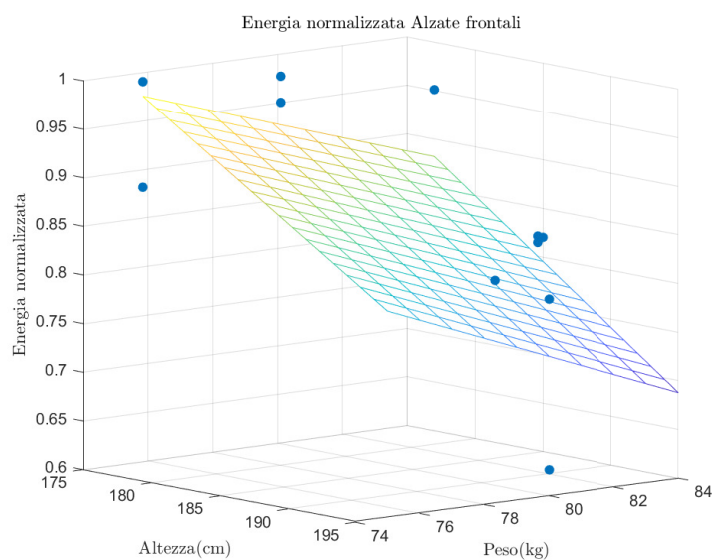


Figura 6.8: Energia per movimento normalizzata in funzione del peso e dell'altezza di ogni soggetto nelle due prove di alzate frontali

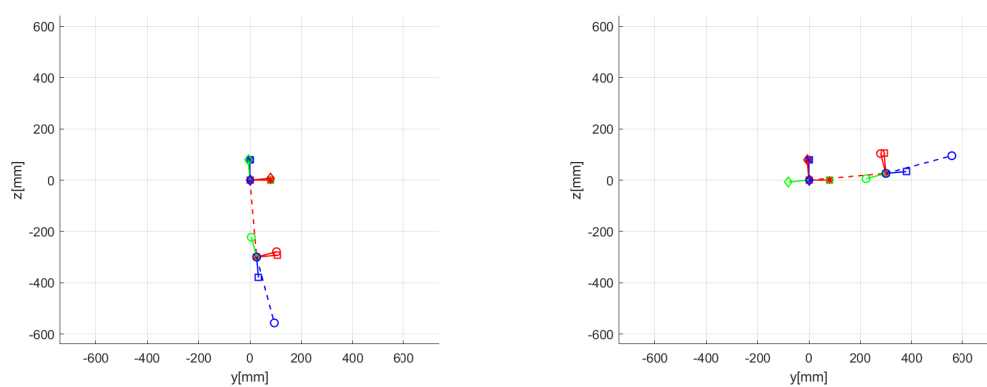


Figura 6.9: Movimento di alzata frontale riprodotto nel modello matematico in Matlab

6.1.3 Energia del giunto 1

Nella prova di movimento laterale con braccio dritto, la relazione che lega l'energia per esecuzione con l'altezza e il peso di ogni soggetto è rappresentata in Figura 6.10; il fattore di correlazione di tale grafico risulta pari a 0.30, valore minore rispetto a quelli ottenuti nei casi precedenti. Nonostante l' R^2 basso si nota un aumento del consumo energetico all'aumentare della massa.

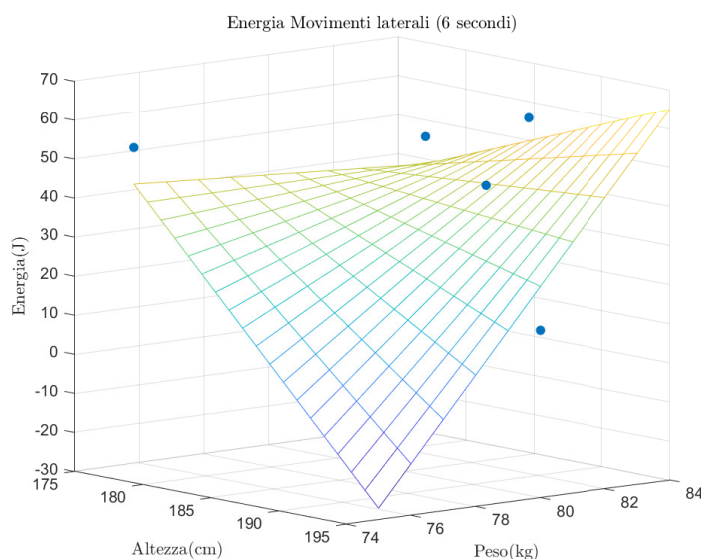


Figura 6.10: Energia per movimento in funzione del peso e dell'altezza di ogni soggetto nella prova di movimenti laterali con braccia dritte con tempo di esercizio di 6 secondi

Per il test con tempo di esecuzione di 3 secondi invece si ottiene un andamento simile a quello visto in precedenza, con l'energia per movimento che aumenta al crescere della massa (Fig. 6.11); tuttavia anche in questo caso il coefficiente di correlazione risulta basso, circa 0.31.

Il grafico in Figura 6.12 rappresenta i valori energetici normalizzati ricavati dai due test in funzione della massa e dell'altezza. L'andamento, simile a quello visto per tempi di movimenti di 3 secondi, ha un fattore di correlazione di 0.25 e il polinomio interpolante risulta:

$$k_1 = 126.99 - 0.71w - 1.56h + 0.0088wh \quad (6.6)$$

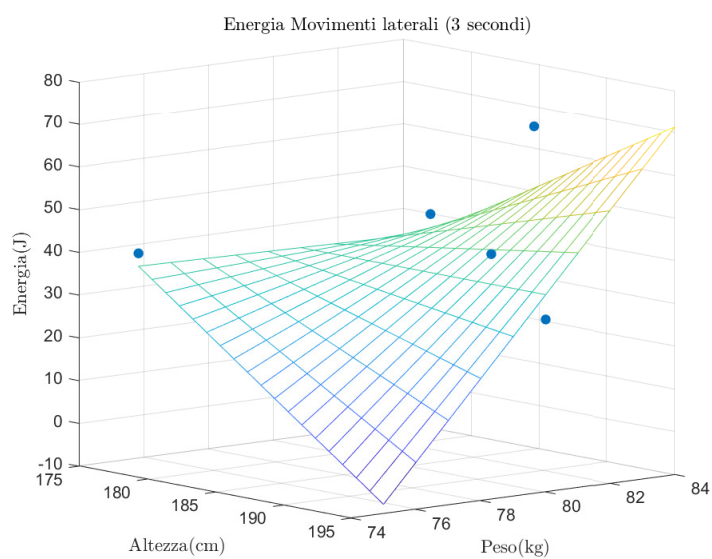


Figura 6.11: Energia per movimento in funzione del peso e dell'altezza di ogni soggetto nella prova di movimenti laterali con braccia dritte con tempo di esercizio di 3 secondi

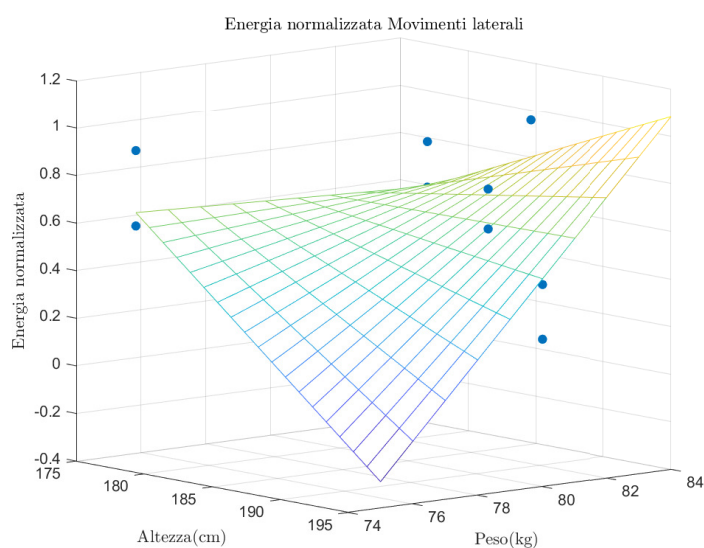


Figura 6.12: Energia per movimento normalizzata in funzione del peso e dell'altezza di ogni soggetto nella prova di movimenti laterali con braccia dritte

La riproduzione dell'esecuzione nel modello matematico in Matlab viene presentata in Figura 6.13, dove il braccio esegue un movimento da un $\theta_i = 90^\circ$ ad un $\theta_f = 10^\circ$ nel piano xy .

Analizzando i dati sperimentali e le previsioni del modello si ottiene un fattore correttivo medio di 23.42 e la correzione finale per l'energia del giunto 1 è:

$$k_{1,corretto} = k_{1,modello}(126.99 - 0.71w - 1.56h + 0.0088wh) \cdot 23.42 \quad (6.7)$$

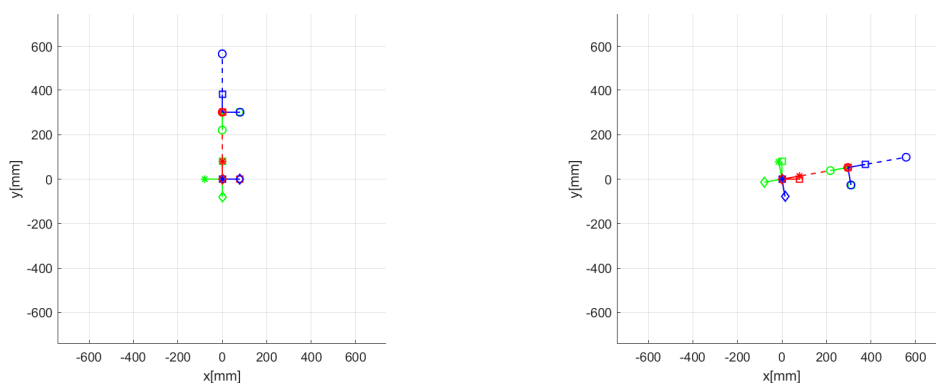


Figura 6.13: Movimento laterale con braccio dritto riprodotto nel modello matematico in Matlab

6.2 Verifica delle correzioni

Per testare la validità delle correzioni effettuate al modello matematico, ai 7 soggetti delle prove sperimentali è stato chiesto di eseguire un'ulteriore test utilizzando il metabolimetro. Tale prova consiste nel raccogliere con entrambe le mani una scatola dal peso trascurabile posto alla sinistra del soggetto e portarlo in posizione centrale, in seguito spostare l'oggetto dalla posizione centrale alla destra del soggetto ed infine ritornare dalla posizione destra alla posizione sinistra sempre con il corpo tra le mani (Fig. 6.14). Il test viene strutturato come le prove sperimentali viste nel capitolo 5, con 30 secondi di esecuzione intervallati da 30 secondi di recupero, e ogni movimento completo dura 6 secondi (2 secondi per ogni spostamento del corpo) in modo da eseguire 5 movimenti nell'arco temporale di 30 secondi.

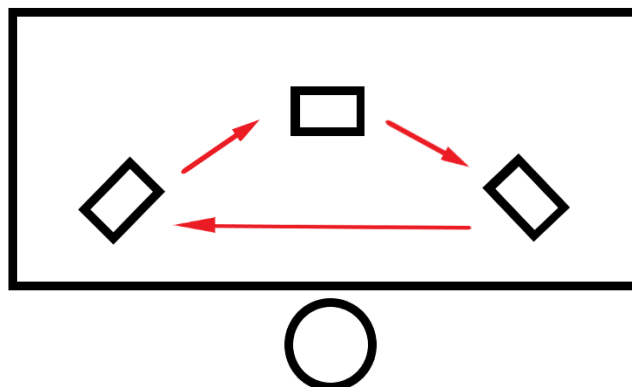


Figura 6.14: Movimento della prova per la verifica delle correzioni applicate al modello matematico

In Figura 6.15 è presente l'andamento medio di consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica durante la prova. Dalla Figura 6.15 si nota che l'andamento della potenza, ottenuto utilizzando la formula di Brockway, risulta quasi costante.

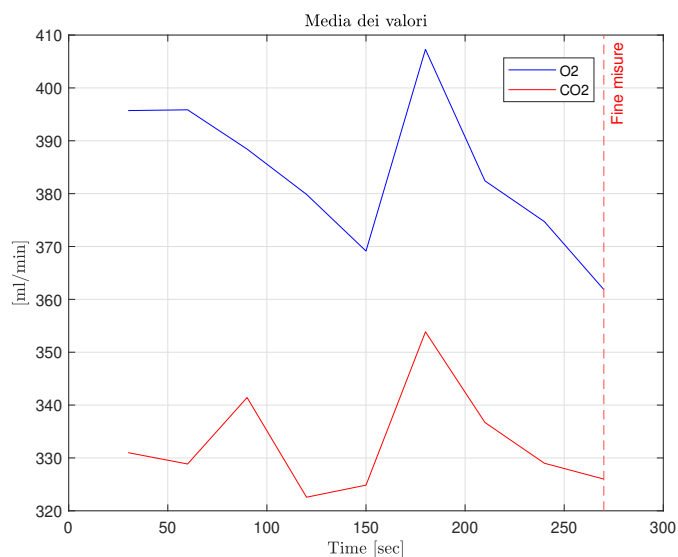


Figura 6.15: Andamento del consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica registrato dal metabolimetro nella prova per la verifica delle correzioni al modello matematico

In Tabella 6.1 invece sono riportati l'energia totale spesa per l'esecuzione della prova e l'energia per movimento per ogni singolo soggetto.

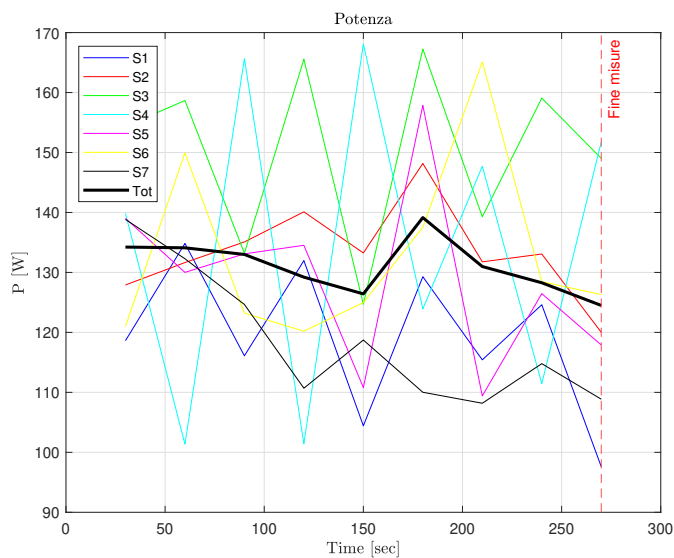


Figura 6.16: Andamento della potenza spesa calcolata con la formula di Brockway nella prova per la verifica delle correzioni al modello matematico

Soggetto	Energia	Energia metabolica	Energia per movimento
1	7156.8 J	4866 J	229.08 J
2	8048.3 J	5971 J	207.73 J
3	8975.6 J	5841 J	313.46 J
4	8035.6 J	5373 J	266.26 J
5	7650.6 J	4826 J	282.46 J
6	8068 J	5125 J	294.3 J
7	8515.8 J	4268 J	269.41 J

Tabella 6.1: Valori energetici per ogni soggetto calcolati nella prova per la verifica delle correzioni al modello matematico

Il movimento eseguito nella prova viene quindi riprodotto utilizzando il modello matematico in Matlab. In Figura 6.17 il braccio passa da un $\theta_{sx} = 135^\circ$ ad un $\theta_{dx} = 50^\circ$; inoltre è stato considerato un sollevamento del giunto 4 che raggiunge un $\theta_{soll} = 20^\circ$ a metà di ogni singolo movimento.

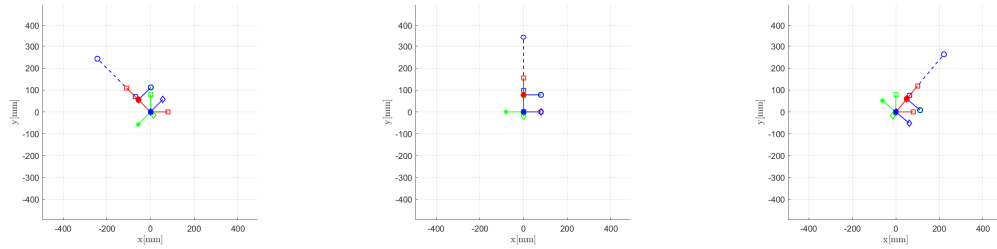


Figura 6.17: Movimento per la verifica delle correzioni riprodotto nel modello matematico in Matlab

In questo modo è stato possibile ricavare i valori energetico previsti dal modello corretto, tali risultati sono presenti in Tabella 6.2.

Soggetto	Energia per movimento prevista
1	185.21 J
2	203.57 J
3	205.09 J
4	201.84 J
5	237.5 J
6	212.8 J
7	191.4 J

Tabella 6.2: Valori energetici per ogni soggetto previsti dal modello matematico corretto

Dalla Figura 6.18, dove è presente il confronto tra i valori energetici reali e quelli previsti dal modello matematico, si evince come il modello corretto per ogni soggetto sottostimi l'energia spesa per l'esecuzione del movimento; tale risultato era prevedibile in quanto sono presenti molti altri fattori fisici e psicologici non presi in considerazione che possono influenzare il consumo energetico nei movimenti degli esseri umani.

Il modello infatti sottostima la spesa energetica reale di un valore medio pari a 21.7%, per cui i risultati ottenuti possono comunque essere ritenuti accettabili.

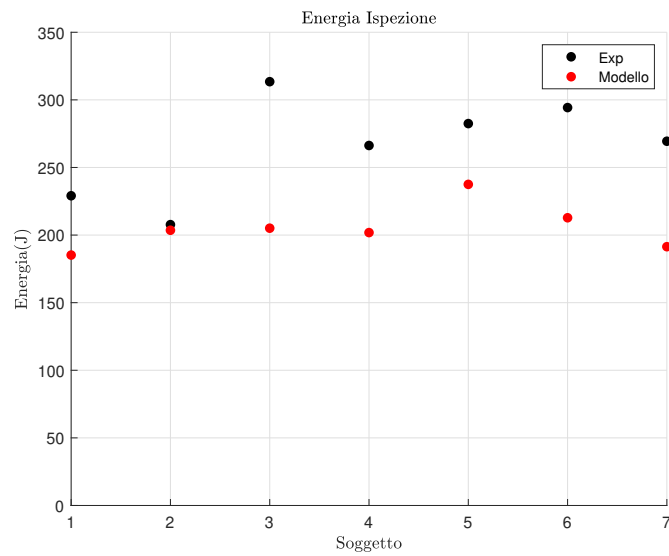


Figura 6.18: Confronto tra valori energetici sperimentali e il consumo energetico previsto dal modello per ogni soggetto

Conclusioni

Gli obiettivi di tale tesi di laurea magistrale prefissati all'inizio del lavoro erano quelli di analizzare l'eventuale presenza di studi in letteratura riguardo l'argomento, eseguire la schedulazione delle prove sperimentali e quindi, sulla base dei dati raccolti, tarare il modello matematico per prevedere il consumo energetico dell'operatore.

Dalla letteratura si evince come questo argomento sia presente all'interno di articoli pubblicati da varie Università mondiali e che tali studi siano aumentati negli ultimi anni, a causa soprattutto del maggiore uso della robotica collaborativa all'interno delle industrie. Tuttavia è da notare come nessun articolo si sia preposto di realizzare un modello matematico che permetta la semplice previsione del costo energetico dell'essere umano.

Per quanto riguarda la schedulazione, sono state effettuate prove che non fossero particolarmente faticose per i soggetti e soprattutto che permettessero di isolare il più possibile i gruppi muscolari del braccio umano, in modo da considerare le energie dei singoli giunti. Tali prove sono state eseguite correttamente, seppur con qualche difficoltà con l'utilizzo del macchinario e con un numero limitato di soggetti. Ulteriori misurazioni potrebbero essere condotte per aumentare la precisione dei dati raccolti e quindi dei fattori correttivi ricavati e per studiare il consumo energetico del giunto 3, contributo ritenuto trascurabile in questo studio.

Lo studio dei risultati delle prove ha testimoniato la necessità di effettuare delle modifiche al modello matematico, introducendo fattori correttivi e parametri antropometrici, quali massa e altezza.

Dal confronto del modello matematico corretto con i consumi energetici misu-

rati nella prova che simula un'attività industriale si nota come il primo sottostima la spesa energetica reale (errore medio di sottostima di circa 21%), questo probabilmente dovuto alla presenza di ulteriori parametri fisici (come la composizione corporea o il livello di preparazione atletica) e psicologici (come l'influenza delle emozioni, livello di stress ecc.) non presi in considerazione che possono alterare il consumo energetico degli esseri umani nelle attività lavorative.

Bibliografia

- [1] L. Zhou, S. Bai, and Y. Li, “Energy optimal trajectories in human arm motion aiming for assistive robots,” *Modeling, Identification and Control*, vol. 38, pp. 11–19, 2017.
- [2] C. H. Chiu, J. C. Wang, and C. Chin-Fa, “Minimum energy expenditure of arm and leg motions,” *International Journal of Sport and Exercise Science*, vol. 1, pp. 33–40, 2009.
- [3] H. Strasser and J. Ernst, “Physiological cost of horizontal materials handling while seated,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 9, pp. 303–313, 1992.
- [4] K. Tsurumi and T. Itani, “Estimation of energy expenditure during sedentary work with upper limb movement,” *Journal of Occupational Health*, vol. 44, pp. 408–413, 2002.
- [5] M. Mackey, E. Ellis, and M. Nicholls, “Breathing patterns and heart rate during simulated occupational upper limb tasks in normal subjects,” *Physiotherapy Research International*, vol. 3, pp. 83–99, 1998.
- [6] Y. Taniyai and J. Nishii, “Optimality of upper-arm reaching trajectories based on the expected value of the metabolic energy cost,” *Neural Computation*, vol. 27, pp. 1721–1737, 2015.
- [7] R. M. Alexander, “A minimum energy cost hypothesis for human arm trajectories,” *Biological cybernetics*, vol. 76, pp. 97–105, 1997.
- [8] J. Wong, T. Cluff, and A. Kuo, “The energetic basis for smooth human arm movements,” *eLife*, vol. 10, pp. 1–17, 2015.

-
- [9] A. Silder, S. L. Delp, and T. Besier, “Men and women adopt similar walking mechanics and muscle activation patterns during load carriage,” *Journal of Biomechanics*, vol. 46, pp. 2522–2528, 2013.
- [10] D. Donà, “Quantificazione del consumo energetico di task robotici collaborativi,” Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Padova, 2020-2021.
- [11] Jaeger, *Manuale di istruzioni Oxycon Mobile*, Ottobre 2004.
- [12] L. Zhou and S. Bai, “Modeling of human arm energy expenditure for predicting energy optimal trajectories,” *Modeling, Identification and Control*, vol. 32, pp. 91–101, 2011.
- [13] W. T. Dempster, *The anthropometry of body action*. Blackwell Publishing Ltd, 1955.
- [14] <https://blog.nutrium.com/it/calcolatore-dellequazione-di-harris-benedict-per-professionisti-della-nutrizione/>.
- [15] <http://www.http://www.adamsport.it>.