



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

**Scuola di
Ingegneria**

Corso di Laurea Triennale in
Ingegneria Meccanica

Human body thermodynamics model

Candidato

Lorenzo Romagnoli

Relatore

Daniele Fiaschi

A Veronica, la mia famiglia e i miei amici.

1 - INTRODUZIONE.....	7
1.1 - NOMENCLATURA.....	7
1.2 - PEDICI.....	8
2 - MODELLO	9
2.1 - MODELLO SINGOLO CILINDRO	11
2.1.1 - Scambio per conduzione	11
2.1.2 - Scambio per convezione e irraggiamento	12
2.1.3 - Scambio per sudorazione	12
2.1.4 - Scambio per respirazione	14
2.2 - MODELLO DEL FLUSSO DI SANGUE	14
2.3 - CONDIZIONI AL CONTORNO	15
3 - RISULTATI	16
3.1 - Analisi effetto T_{amb}	16
3.2 - Analisi dell'effetto metabolismo	22
4 - CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	25
5 - BIBLIOGRAFIA	26

1 - INTRODUZIONE

La presente tesi si inserisce all'interno del più ampio lavoro di ricerca "Attività sportiva in soggetti diabetici: analisi funzionale e parametri termodinamici e biomedici". L'obiettivo dello studio è stato una modellazione termodinamica del corpo umano, confrontando i risultati con i dati presenti in letteratura. Il presente modello si basa principalmente sul lavoro di ricerca svolto da Wissler (1) e integrato con quello più recente svolto da Mady et al. (2). Per svolgere la simulazione è stato utilizzato il software EES (Engineering Equation Solver).

1.1 - NOMENCLATURA

Simbolo	Descrizione	Unità
T	Temperatura	[K]
P	Pressione	[kPa]
C_p	Calore specifico a pressione costante	[J/kg K]
M	Metabolismo	[W]
A	Area	[m ²]
V	Volume	[m ³]
U	Energia interna	[J]
H	Flusso entalpico	[W]
W	Lavoro	[W]
Q	Potenza termico	[M]
h_c	Coefficiente di scambio termico convettivo	[W/m ² K]
h_{ev}	Coefficiente di scambio termico evaporativo	[W/m ² Pa]
w_{sk}	Skin wettedness	
f_{cl}	Rapporto tra la superficie coperta dai vestiti e superficie nuda	
$R_{e.cl}$	Resistenza termica all'evaporazione imposta dai vestiti	[m ² pa/W]
$r[i]$	Raggio dell'i-esimo cilindro	[m]

$h[i]$	Altezza dell' i -esimo cilindro	[m]
$K[i]$	Coefficiente di conduzione	[W/m K]
ϕ	Umidità relativa	
η	Efficienza di scambio termico	

1.2 - PEDICI

Simbolo	Descrizione
c	Convezione
r	Irraggiamento
e	Evaporazione
bl	Sangue
ve	Venoso
ar	Arterioso
ex	Espirazione
as	Aspirazione
amb	Ambiente
cl	Vestiti
a	Aria
w	Acqua
int	Interna
sk	Pelle
tot	Corpo intero

2 - MODELLO

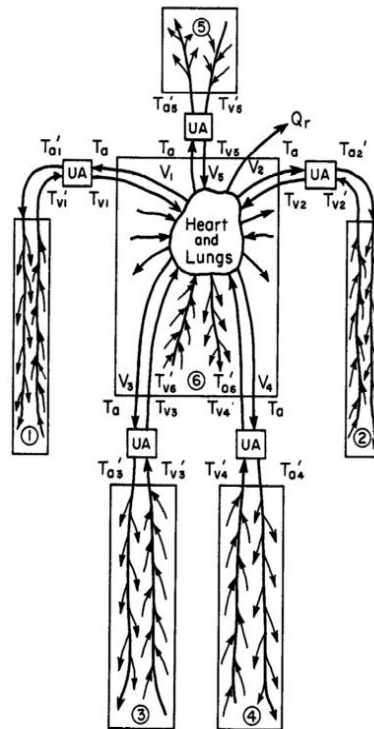


Figura 1. Components used in thermal system of the six-element man tratta da E. Wissler, *Steady-state temperature distribution*, 1961, p.2

Il modello termodinamico del corpo umano trattato include la conduzione interna, gli scambi energetici con l'ambiente e il sistema termoregolatore del trasporto sanguigno. Il soggetto in esame si trova a riposo ($W=0$), nudo alle condizioni ambientali variabili. All'interno del codice EES è stato utilizzato il Kelvin come unità di misura della temperatura, ma in questa sede verranno utilizzati i gradi Celsius per comodità espositiva. Il corpo è stato schematizzato come composto da sei cilindri (testa, busto, 2 braccia e 2 gambe) dello stesso volume dell'ellissoide utilizzato da Wissler [1] e ripreso poi come base negli studi successivi. La simulazione è partita dal modello realizzato da due studenti Rocca e Badaoui, che, nonostante la correttezza, presentava due limiti principali:

- Era riferito solo al tronco, mentre invece c'è bisogno di studiare l'intero corpo
- Alcuni parametri come il metabolismo non erano più attendibili a causa delle differenti condizioni al contorno che si vengono a generare.

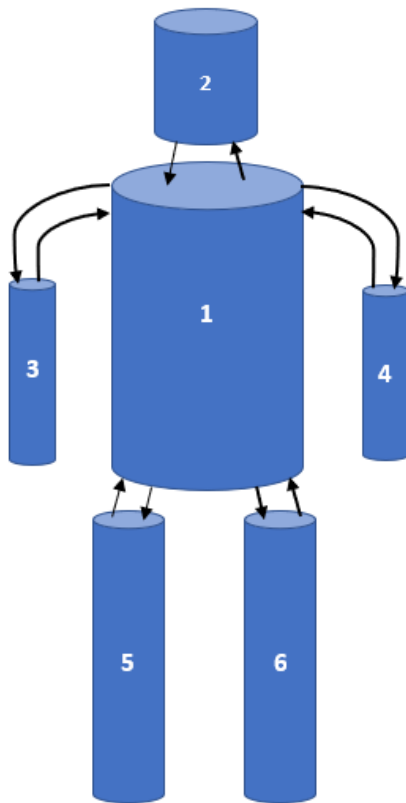


Figura 2. Schema del presente modello del corpo umano

TABELLA 1. DIMENSIONI CILINDRI ART. (1)

	H altezza	R raggio
Tronco [1]	H = 80 cm	R = 13 cm
Testa [2]	H = 35 cm	R = 8,9 cm
Braccia [3] [4]	H = 65 cm	R = 4,5 cm
Gambe [5] [6]	H = 83 cm	R = 7 cm

Il modello proposto come detto in precedenza è composto da sei cilindri, per (1) è stato inteso il tronco, mentre (2) è la testa, con (3) e (4) si sono indicate le braccia e (5) e (6) schematizzano le gambe.

2.1 - MODELLO SINGOLO CILINDRO

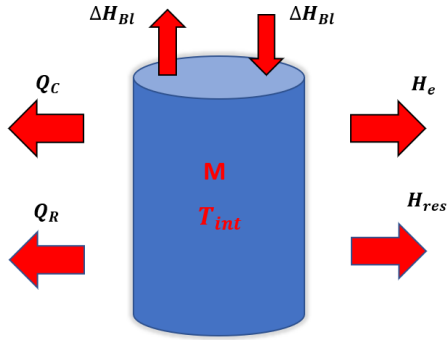


Figura 3. Schema calori scambiati dal cilindro

Il modello è basato sul primo principio della termodinamica [2], per ogni pezzo del sistema mette in relazione gli scambi termici, quelli relativi ai flussi (sangue, respirazione e sudorazione), il metabolismo interno e l'attività fisica:

$$\dot{U} = M - (Q_C + Q_R + H_e + H_{res}) - W + \Delta H_{bl} \quad (1)$$

Si è partiti imponendo la variazione di energia interna \dot{U} uguale a zero, (cioè studiando le condizioni stazionarie). Questo bilancio è stato trattato per ogni singolo cilindro.

2.1.1 - Scambio per conduzione

Per simulare gli scambi termici all'interno del cilindro e la termoregolazione è stata utilizzata l'approssimazione di un cilindro pieno con generazione interna di calore, che in questo caso è dovuta al metabolismo M e alla circolazione sanguigna.

$$T_{sk}[i] = T_{int}[i] - \frac{M_{vol}[i] * r[i]^2}{4 * K[i]} \quad (2)$$

Dove $M_{vol}[i]$ nel nostro caso rappresenta la generazione di calore interna per unità di volume ed è un'incognita del problema, $K[i]$ è un coefficiente di conduzione empirico che al momento abbiamo preso come valore fisso per ogni pezzo del corpo, dallo studio di Rocca e Badaoui sul tronco. Il K trovato era estrapolato imponendo T_{sk} uguale ai dati sperimentali [2].

$T_{int}[1]$ (tronco) è stata presa costante al valore di 37°C, uguale alla temperatura dell'ipotalamo $T_{int}[2]$ (testa), in quanto all'interno del range di temperature ambiente che vanno dalla temperatura critica inferiore (temperatura ambiente alla quale inizia il processo di ipotermia) alla temperatura critica superiore (temperatura ambiente alla quale inizia il processo di ipertermia) questa si mantiene pressoché costante in condizioni normali di salute [3]. $T_{int}[i]$ per gli altri cilindri che rappresentano gli arti, è un'incognita che viene determinata. Quindi, una volta individuate le temperature interne e la temperatura della pelle del tronco si passa ai bilanci tra il corpo e l'ambiente esterno.

2.1.2 - Scambio per convezione e irraggiamento

Per quanto riguarda gli scambi convettivi e radiativi con l'esterno si sono utilizzate le seguenti relazioni:

$$Q_c = A * f_{cl} * h_c * (T_{sk} - T_{amb}) \quad (3)$$

Lo scambio convettivo preso in considerazione è una convezione naturale, inoltre si vede come dipenda dalle dimensioni del cilindro e dalla differenza di temperatura tra la pelle e l'ambiente. Infine, il coefficiente di scambio termico convettivo è stato calcolato con l'ausilio di EES, conoscendo le dimensioni del cilindro.

$$Q_r = A * f_{cl} * \eta_{sk} * \sigma * (T_{sk}^4 - T_{amb}^4) \quad (4)$$

Il calore disperso per via radiativa dipende, oltre che dalla geometria del cilindro anche dal prodotto di due costanti che sono η_{sk} e σ , rispettivamente l'efficienza di scambio termico della pelle e la costante di Boltzmann che vale $5,67 * 10^{-8} [\frac{W}{m^2 * K^4}]$, ma il parametro più importante da cui dipende lo scambio radiativo è la differenza delle temperature alla quarta tra la pelle e l'ambiente.

2.1.3 - Scambio per sudorazione

Per calcolare lo scambio termico dovuto alla sudorazione del corpo si è ricorsi alla formula:

$$H_e = A * w_{sk} * \left[\frac{P_{w.sk} - \Phi_a * P_{w.a}}{R_{e.cl} + \frac{1}{f_{cl} * h_{ev}}} \right] \quad (5)$$

Dove $P_{w.sk}$ e $P_{w.a}$ sono le pressioni di saturazione dell'acqua rispettivamente a T_{sk} e T_{amb} , h_{ev} è un coefficiente di scambio termico evaporativo (4) e ϕ_a è l'umidità relativa dell'aria ambiente. Il coefficiente $R_{e.cl}$ indica invece una resistenza termica all'evaporazione data dai vestiti.

Il parametro più caratteristico da cui dipende H_e è w_{sk} , descritto come skin wettedness, ovvero un fattore che esprime la frazione superficiale della pelle bagnata dal sudore, che può idealmente variare tra 0 e 1 [2]. Per questo è stata introdotta prendendo spunto dal lavoro non pubblicato di Rocca e Badaoui, la seguente funzione all'interno del programma:

$$w_{sk} = \begin{cases} 0.009 * T_{amb} - 2.577 & T_{amb} < 304 K \\ 0.122 * T_{amb} - 36.816 & T_{amb} \geq 304 K \end{cases}$$

La funzione è stata realizzata partendo dai dati sperimentali in [9] supponendo due andamenti lineari con coefficienti angolari diversi, il primo tratto da 20°C a 30°C in cui sono fissati $w_{sk}=0,06$ per $T_{amb}=20^\circ\text{C}$ e $w_{sk}=0,15$ per $T_{amb}=30^\circ\text{C}$, il secondo tratto parte da quest'ultimo punto e termina a $w_{sk}=0,76$ per $T_{amb}=35^\circ\text{C}$.

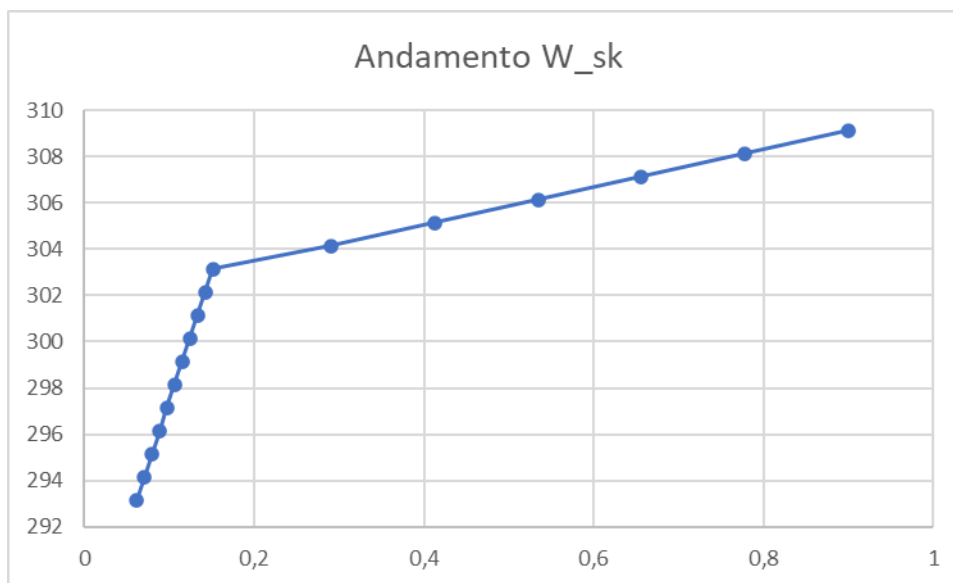


Grafico 1. Andamento w_{sk} al variare di T_{amb}

2.1.4 - Scambio per respirazione

Per quanto riguarda lo scambio termico dovuto alla respirazione, la perdita è legata al fatto che si inspira aria fredda e secca e si espira aria calda e umida. A differenza degli altri è stato considerato solo per i cilindri del tronco e della testa con una ripartizione rispettivamente di 42,5% e 57,5%, come da letteratura [8]. La formula usata è la seguente:

$$H_{res} = \dot{m}_{res} * C_{p.a} * (T_{ex} - T_{amb}) + \dot{m}_{res} * (w_{ex} * h_{w.ex} - w_a * h_{w.a}) \quad (6)$$

In cui \dot{m}_{res} è dato dalla formula empirica [2]:

$$\dot{m}_{res} = 1,433 * 10^{-6} * A_{tot} * M_{tot} \quad (7)$$

Questa è direttamente correlata al metabolismo dell'interno corpo M_{tot} e con $C_{p.a}$ calore specifico dell'aria a pressione costante, $h_{w.ex}$ e $h_{w.a}$ entalpie specifiche del vapore a T_{ex} e T_{amb} rispettivamente, mentre w_{ex} e w_a umidità assoluta dell'aria uscente e dell'aria aspirata. Per calcolare queste ultime proprietà termodinamiche si è assunto un'umidità relativa dell'aria uscente pari a 0,9.

2.2 - MODELLO DEL FLUSSO DI SANGUE

Si passa adesso ad analizzare gli scambi energetici relativi alla generazione interna di calore, cioè il metabolismo (M) e il flusso sanguigno (ΔH_{bl}). Con metabolismo basale si

intende il minimo dispendio energetico necessario a mantenere le funzioni vitali e lo stato di veglia (5), cioè mantenere la temperatura interna del tronco a 37°C. Il metabolismo basale è un valore fisso preso dalla letteratura (5), mentre per quanto concerne il flusso sanguigno il suo effetto è stato schematizzato come segue: per prima cosa sono state definite due temperature del sangue di riferimento una per le arterie e una per le vene. La $T_{ar.out}$ è stata assunta uguale alla temperatura interna del tronco, infatti l'ipotesi è quella

che la temperatura di uscita dal cuore è uguale a 37°C, quindi per il momento in questo modello è fissa; mentre la temperatura delle vene dipende sempre dalla temperatura interna, però di ogni singolo cilindro, in sintesi si ha:

$$T_{ar.out} = T_{int}[1] \quad (8)$$

$$T_{ve.in}[i] = T_{int}[i] \quad (9)$$

Dopo aver definito questi due parametri possiamo adesso spiegare come abbiamo modellato lo scambio di calore del flusso sanguigno. La formula usata è:

$$\Delta H_{bl} = - \left(0,001 * \frac{\dot{v}_{bl}[i]}{60} \right) * \rho_{bl} * c_{p.ve} * (T_{ve,in} - T_{ar,out}) * \varepsilon \quad (10)$$

Con $\dot{v}_{bl}[i]$ si è indicato la portata volumetrica del sangue per ogni singolo arto presa dalla

letteratura: in questo studio è stata assunta costante, ma realisticamente questo parametro dovrebbe essere legato alla temperatura ambiente, perché a seconda della temperatura possiamo avere vasodilatazione e vasocostrizione che fanno variare la portata. Si è cercato di simulare questo effetto attraverso il parametro ε , che viene

approfondito dopo. ρ_{bl} e $c_{p.ve}$ sono rispettivamente la densità del sangue e il calore

specifico a pressione costante del sangue venoso, il quale varia di poco rispetto a quello arterioso e quindi ragionevolmente sono stati supposti uguali, presi dall'art (2). Si nota come la differenza di temperatura è sempre negativa in quanto la temperatura del sangue arterioso è sempre maggiore di quella del sangue venoso.

La prima parte dell'equazione rappresenta lo scambio di calore medio, per completezza è stato aggiunto il fattore ε ; che permette di modellare due aspetti:

- $T_{ve,in}$ non sarà esattamente uguale a $T_{int}[i]$
- Permette di simulare i fenomeni di vasocostrizione e vasodilatazione, causa dei quali varia la portata di sangue.

Si è ipotizzato che l' ε delle gambe è uguale a quello delle braccia.

2.3 - CONDIZIONI AL CONTORNO

Le variabili di input, oltre a quelle ambientali, sono principalmente le temperature, in particolare quella interna del tronco e della testa e le temperature della pelle delle altre componenti. Questa scelta è attendibile in quanto la temperatura interna del tronco si mantiene sempre intorno ai 37°C, come possiamo facilmente trovare da letteratura [5]; infatti, il corpo umano è una macchina che ha come scopo quella di variare le temperature per mantenere la temperatura interna del tronco costante. Anche per la testa, si è ipotizzato di mantenere una temperatura interna fissa a 37°C perché, come da letteratura, il cervello per svolgere la sua attività correttamente deve lavorare intorno a questo valore, che è la temperatura dell'ippocampo [5]. Il vantaggio di prendere come input le temperature della pelle ($T_{sk}[i]$) è legato alla semplicità di misura attraverso l'utilizzo di una

termocamera. Questo modello ha come *variabili di output le temperature interne degli arti e anche tutti i calori in gioco* per ogni singolo componente.

Questo permette di *calcolare il metabolismo che deve essere presente per mantenere una certa distribuzione di temperatura*, per esempio a partire dai dati sperimentali ottenuti con una termocamera. Naturalmente è possibile fare anche il processo inverso: avendo una correlazione sul metabolismo si può stimare la distribuzione di temperatura interna.

3 - RISULTATI

3.1 - Analisi effetto T_{amb}

Sono state svolte alcune simulazioni per vedere come il modello si adattava ad alcuni cambiamenti delle condizioni al contorno e per valutare quali legami tra alcuni fattori che sono stati usati.

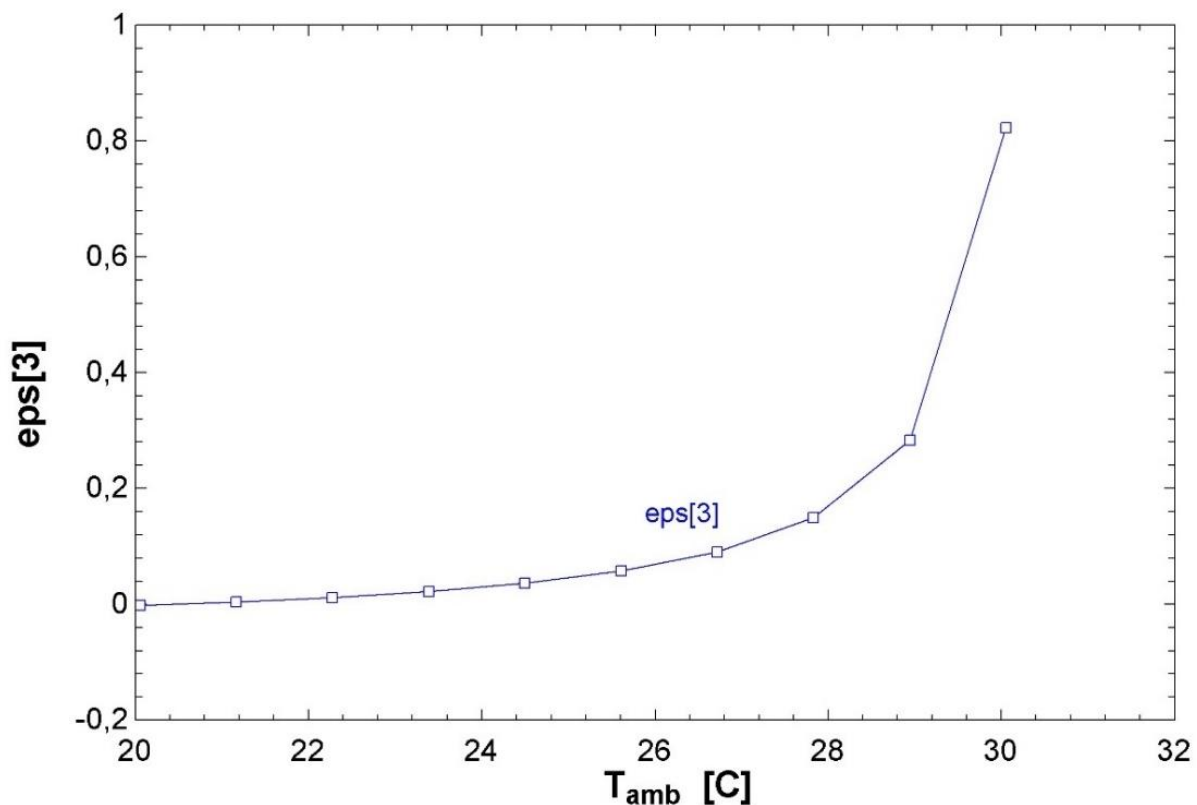
Per l'impossibilità di utilizzare una termocamera per il calcolo delle temperature superficiali, si è scelto di partire da un valore noto e costante del metabolismo preso da letteratura [6] e suddividerlo tra i vari cilindri tramite i valori sperimentali ricavati da Wissler [1].

Umidità relativa aria	$\Phi_a = 0,6$
Efficienza di scambio termico della pelle	$\eta_{sk} = 0,97$
Temperatura interna tronco	$T_{int}[1] = 37^\circ C$
Temperatura interna testa	$T_{int}[2] = 37^\circ C$
Rapporto tra la superficie coperta dai vestiti e superficie nuda	$f_{cl} = 1$
Coefficiente di conduzione	$K[i] = 2,21 \text{ W/m K}$
Coefficiente di scambio termico convettivo tronco	$h_c = 3,2 \text{ W/m}^2 K$
Coefficiente di scambio termico convettivo Testa	$h_c = 3,2 \text{ W/m}^2 K$
Coefficiente di scambio termico convettivo braccia	$h_c = 2,72 \text{ W/m}^2 K$
Coefficiente di scambio termico convettivo gambe	$h_c = 2,7 \text{ W/m}^2 K$
Coefficiente di scambio termico evaporativo	$h_{ev} = 55 \text{ W/m}^2 Pa$
Temperatura aria espirata	$T_{ex} = 35^\circ C$
Umidità aria espirata	$\Phi_{ex} = 0,9$
Portata sanguigna testa	$\dot{v}_{bl}[2] = 0,75 \text{ L/min}$
Portata sanguigna braccia	$\dot{v}_{bl}[3] = 0,21 \text{ L/min}$
Portata sanguigna gambe	$\dot{v}_{bl}[5] = 0,28 \text{ L/min}$

Calore specifico a pressione costante del sangue arterioso/venoso	$c_{p.bl} = 3850 \frac{J}{kg * K}$
Densità del sangue	$\rho_{bl} = 1059 kg/m^3$
Metabolismo totale	$M_{tot} = 122 W$

TABELLA 2. Valori fissi all'interno del modello

Il primo valore che siamo andati a veder è ε , in particolare è stato studiato quello delle braccia, si può facilmente vedere come al crescere della temperatura ambiente il nostro ε cresce sempre di più, questo fenomeno è legato al fatto che crescendo T_{amb} il tronco necessita degli arti per scambiare il calore e quindi si ha un flusso maggiore dal tronco verso le braccia e le gambe. In fisiologia questo fenomeno è chiamato vasodilatazione e ha le stesse caratteristiche che simula il nostro fattore.

Figura 3. Diagramma $\varepsilon - T_{amb}$

Si è visto come possono variare le temperature della pelle delle braccia e delle gambe al variare della temperatura ambiente:

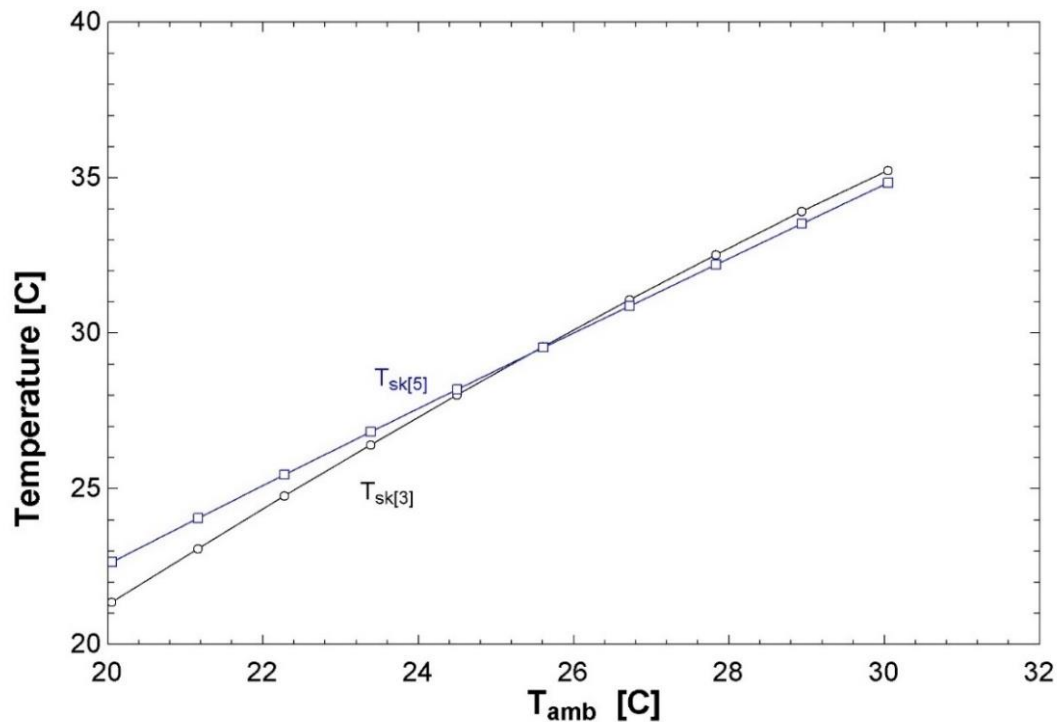


Figura 4. Diagramma $T_{sk[5][3]} - T_{amb}$

Vediamo da questo grafico (figura 4) come al crescere della temperatura ambiente, presa in un range che va da 20 a 30 °C, le temperature della pelle degli arti, come ci si poteva aspettare, crescono con un andamento praticamente lineare, ma con due pendenze diverse. Notiamo che in questo modello, tra i 25 e 26°C della temperatura ambiente, le due temperature coincidono. L'aumento maggiore della temperatura delle braccia rispetto a quella delle gambe potrebbe essere legato al fatto che quest'ultime hanno un'area maggiore rispetto alle prime.

Successivamente, si è analizzato come la trasmissione del calore in questo modello si adatta alla variazione della temperatura ambiente, in un range da 10 a 30 °C.

Per prima cosa è stato trattato il flusso termico convettivo di ogni cilindro:

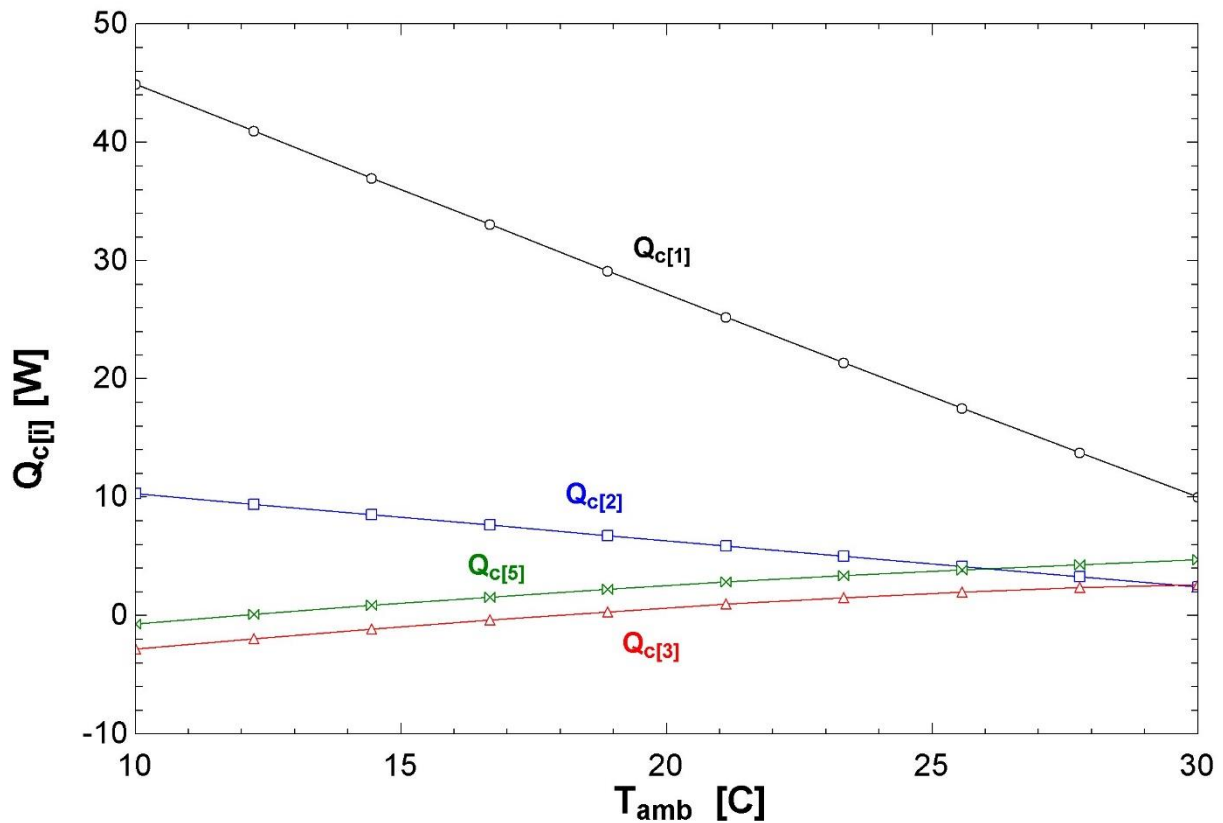


Figura 5. Diagramma $Q_c[i]-T_{amb}$

Il valore che colpisce di più a primo sguardo è il crollo dello scambio convettivo del tronco al crescere della temperatura, ma non dovrebbe stupire perché dipendendo dalla differenza di temperatura tra la pelle e l'ambiente al crescere della T_{amb} come abbiamo

visto prima cresce anche la T_{sk} e la differenza si assottiglia sempre di più. Questo crollo ha

anche un riscontro fisico in quanto con l'aumentare della temperatura ambientale diminuisce anche la richiesta di calore del tronco. In blu si vede lo scambio convettivo legato alla testa e anche questo scende all'aumentare della temperatura. È molto interessante notare i $Q_c[3]$ e $Q_c[5]$ rispettivamente riferiti alle braccia e alle gambe, che per

valori di $T_{amb} < 15^\circ\text{C}$ sono negativi. Ciò è legato a due aspetti. Il primo è che le

temperature, per un corpo nudo fermo, da questi valori iniziano ad entrare nel campo dello stress termico, con fenomeni complessi di reazione all'ipotermia che non sono stati modellati. Gli arti si comportano come alette, quindi al diminuire della temperatura esterna, la quantità di sangue che fluisce verso di esse diminuisce per cercare di mantenere costante la temperatura del tronco.

Per quanto riguarda lo scambio radiativo si vede dal grafico seguente (figura 6) come abbia un andamento molto simile a quello dello scambio convettivo: infatti anche il Q_r dipende dalla differenza delle stesse temperature ma elevate alla quarta.

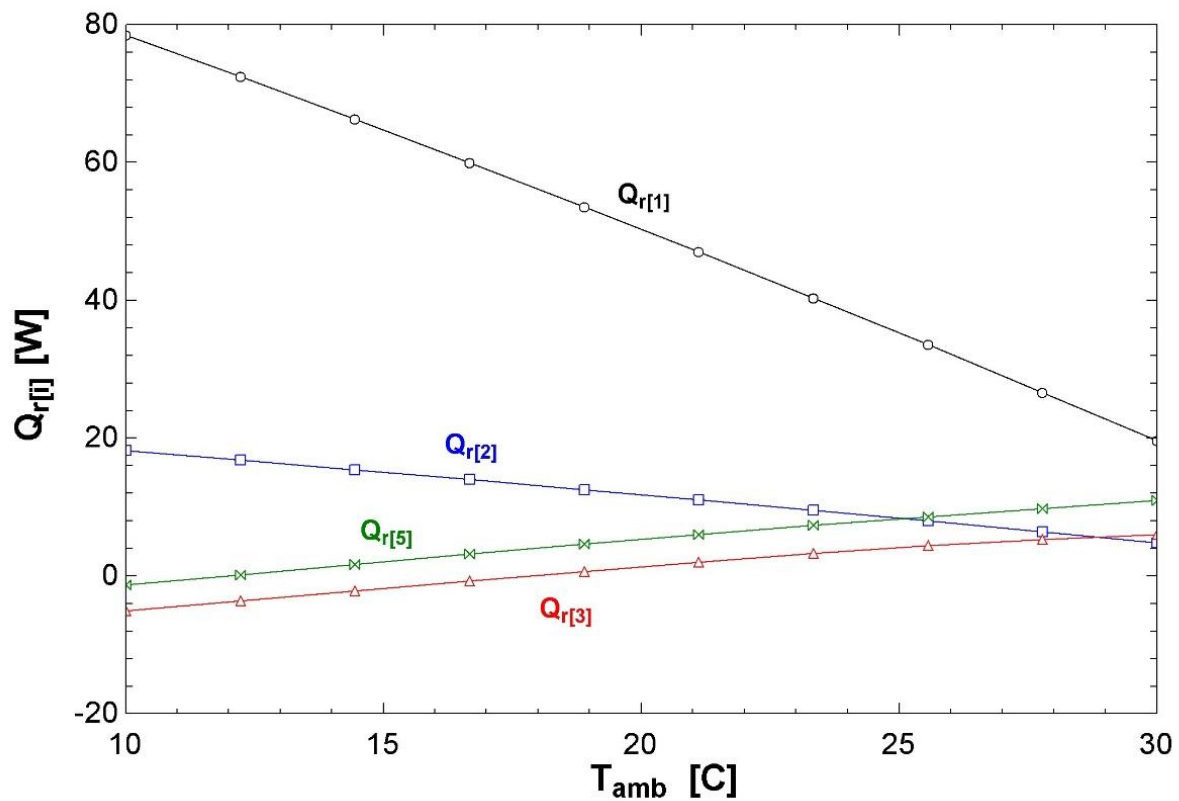


Figura 6. Diagramma $Q_r[i]-T_{amb}$

Lo scambio termico dovuto all' evaporazione del sudore sulla pelle segue l'andamento del grafico seguente (figura 7):

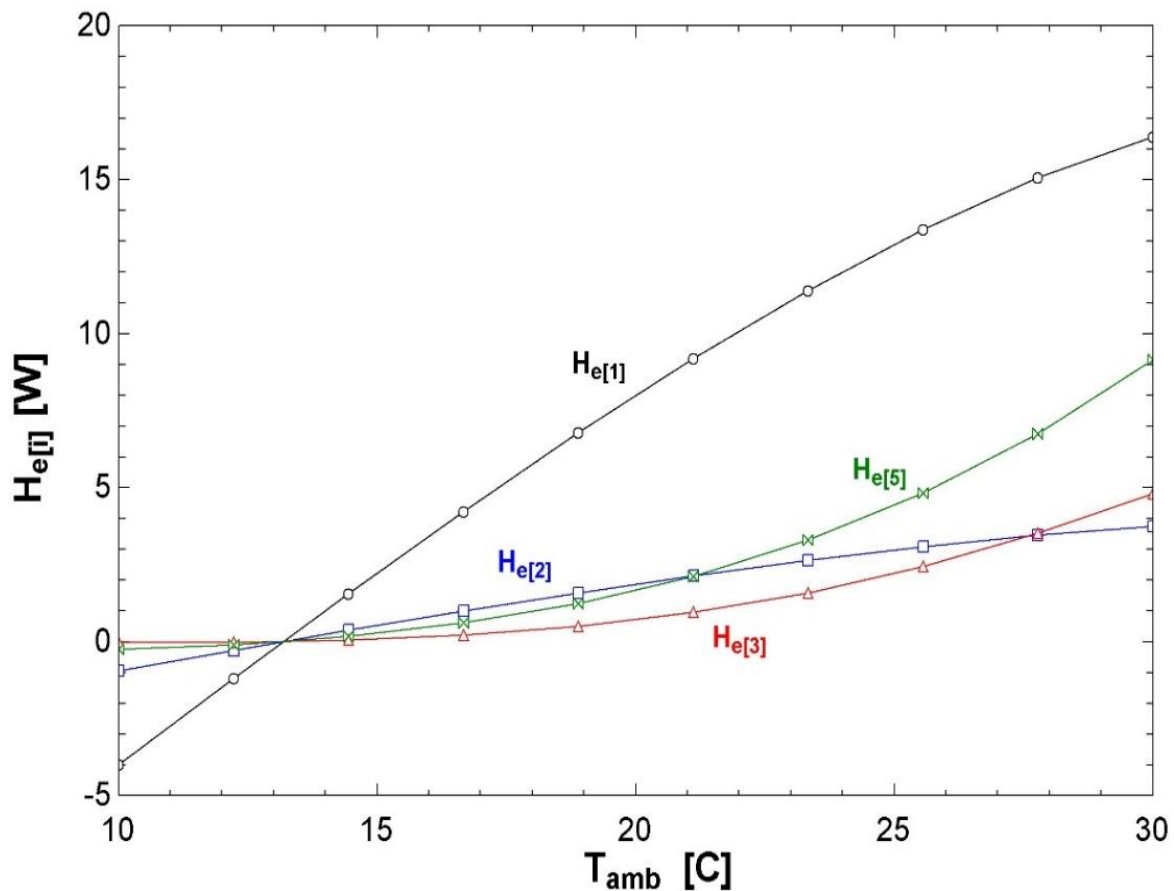


Figura 7. Diagramma $H_e[i]$ - T_{amb}

Si può notare come tutti i calori in gioco diventano significativi dopo i 15°C e questo potrebbe essere realistico in quanto il corpo non ha necessità di ricorrere alla sudorazione prima di questa temperatura. L'andamento a differenza degli altri calori è parabolico e inoltre si nota che il calore scambiato dal tronco è molto maggiore rispetto agli altri cilindri. Anche qui è evidente come le braccia e le gambe svolgano la loro funzione di alette termiche: sono ininfluenti per temperature basse, mentre diventano sempre più importanti al crescere della temperatura ambientale.

Infine è stato analizzato l'effetto di T_{amb} sullo scambio dovuto alla respirazione:

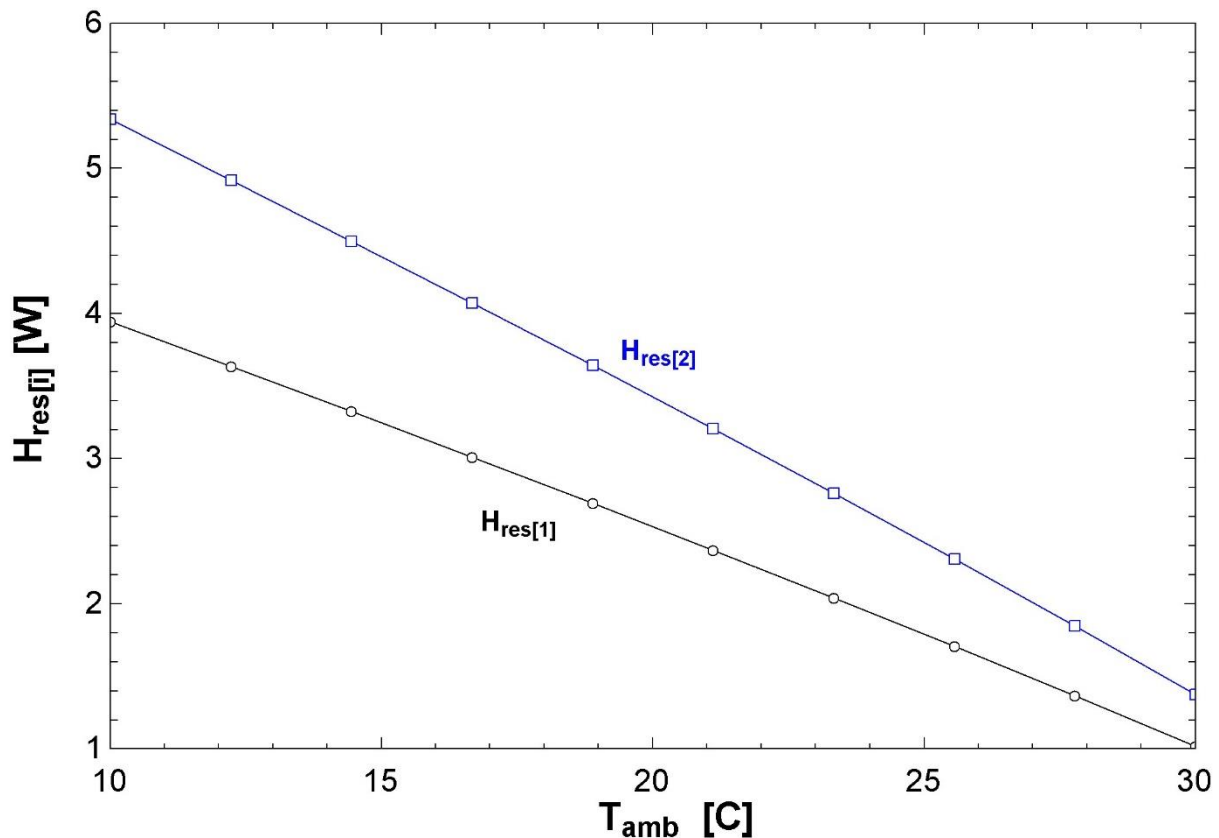


Figura 8. Diagramma $H_{res}[i]-T_{amb}$

Da questo grafico possiamo notare come entrambi i calori scambiati, sia quello riferito alla testa che quello riferito al tronco crollino a zero una volta raggiunti i 30°C; questo accade perché per semplicità si è presa la temperatura di uscita dell'aria fissa a 30°C, annullando così sia la differenza di temperature che la differenza di pressione da cui dipende H_{res} .

Questo è vero per quanto riguarda la condizione di $T_{amb}=25^{\circ}\text{C}$, ma non è detto per temperature diverse da questa. Potrebbe essere ragionevole assumere $T_{ex}=T_{amb} + 5$.

3.2 - Analisi dell'effetto metabolismo

Nella seconda parte dell'analisi parametrica sono state definite due variabili nuove che servono a legare il metabolismo ad alcuni fattori. Ci si è chiesto cosa succederebbe se per qualunque motivo, il metabolismo aumentasse invece che restare costante. Si sono definiti due incrementi uno per le braccia ($\Delta M[3]$) e uno per le gambe ($\Delta M[5]$) e li abbiamo correlati con ε e con le temperature della pelle e le temperature interne degli arti.

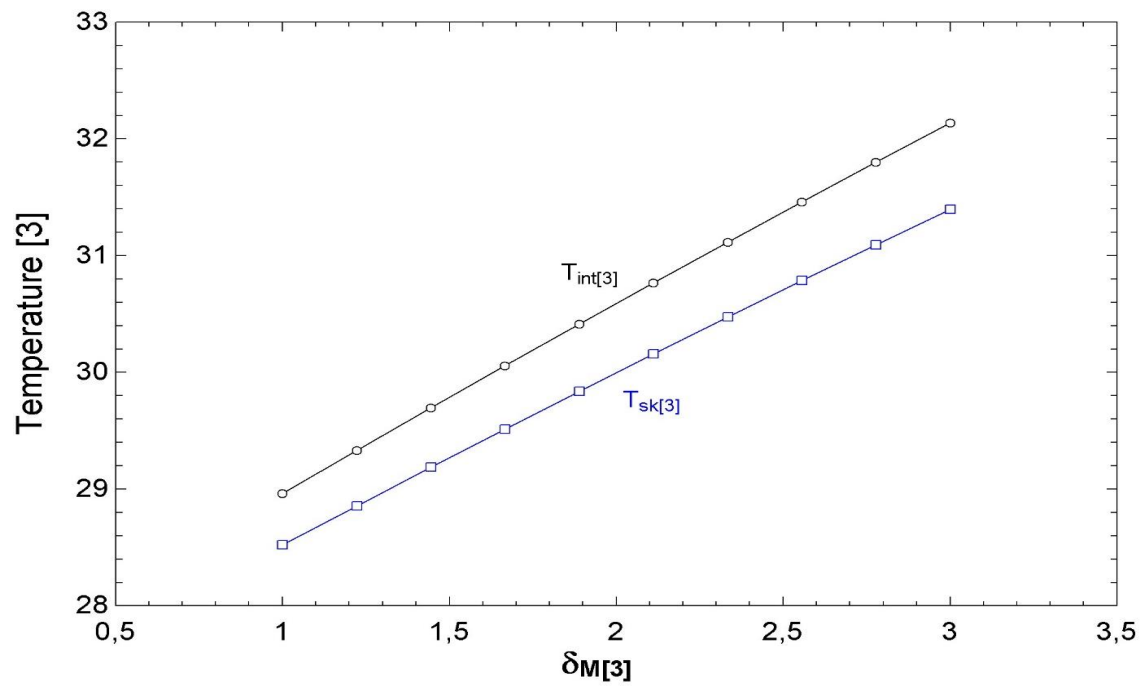


Figura 9. Diagramma $T [3] - \delta M [3]$

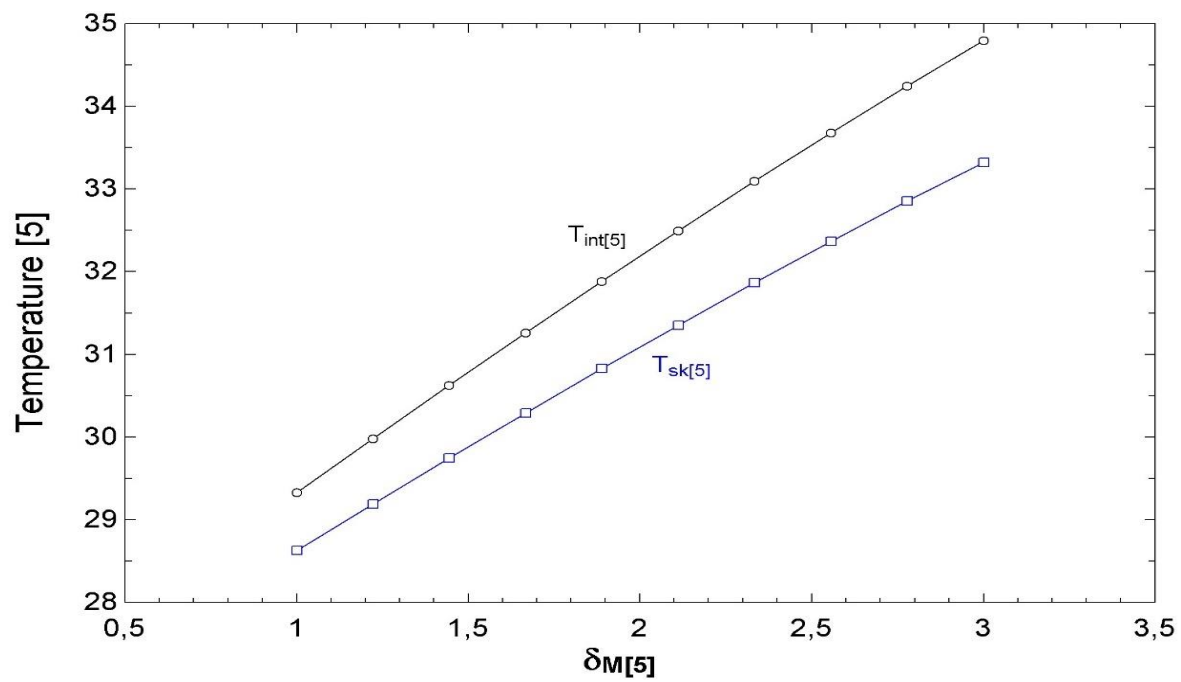


Figura 10. Diagramma $T [5] - \delta M [5]$

Il ΔM è stato variato tra 1 (metabolismo basale) e 3, che indica un'attività che triplica il metabolismo, per esempio un'attività sportiva come andare in bicicletta o esercizi con le braccia [6].

Si vede come, al crescere del metabolismo tutte le temperature sia interne che della pelle crescano con un andamento quasi lineare. Si può notare che il gradiente tra le temperature al crescere del metabolismo è più maggiore per le gambe.

4 - CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Lo scopo di questa tesi era la creazione di un modello base che, in ambiente EES, simulasse gli scambi energetici del corpo umano. È stato preso in considerazione l'intero corpo, modellato come suddiviso in sei cilindri, ai quali sono stati applicati i bilanci e i modelli presenti in letteratura [1] e [2]. Si sono formulate delle ipotesi per introdurre la circolazione sanguigna e la sudorazione corporea al variare della temperatura ambiente, mutuando il più possibile da dati presenti in letteratura [1] e [6], sia dall'ambito energetico che fisiologico.

Grazie a queste si è riusciti ad osservare l'andamento degli scambi energetici al variare della temperatura ambiente e quello delle temperature della pelle ed interne.

Il modello presente diventa poco attendibile per range di temperatura fuori da 20-30°C, ma presenta alcuni comportamenti fisicamente plausibili e significativi, come l'effetto di "alette" degli arti, cioè il supporto che forniscono alla dispersione del calore temperature ambiente alte. Nella modellazione, si è cercato di lasciare aperture a future modifiche: sono infatti presenti anche parametri che nello studio attuale sono stati assunti costanti come il K (coefficiente termico legato alla conduzione), che realisticamente varierà a seconda della parte del corpo considerata permettendo di modellare la variabilità dei tessuti che sono presenti nel corpo umano.

Gli sviluppi futuri potrebbero infatti comprendere l'introduzione del moto del corpo dovuto all'attività fisica [7] e [3], che abbiamo già iniziato a vedere con l'incremento di metabolismo trattato nei risultati. Si potrebbe svolgere uno studio più approfondito del metabolismo che riguardi più da vicino anche i processi chimici alla base di esso e confrontarlo con prove sperimentali come quelle riportate in [8]. Infine, si potrebbe valutare come i vestiti influenzano gli scambi termici [4].

5 - BIBLIOGRAFIA

- [1] Wissler, E. H. (1961). Steady-state temperature distribution. *Journal of Applied Physiology*.
- [2] Keutenedjian Mady, C. E., Silva Ferreira, M., Itizo Yanagihara, J., Hilário Nascimento Saldiva, P., & de Oliveira Junior, S. (2012). Modeling the exergy behavior of human body. *Energy*, 45(1), 546–553. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.064>
- [3]. 2017. «Assessment of Thermal Comfort Conditions during Physical Exercise by Means of Exergy Analysis». *Energy* 128 (giugno): 609–17. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.033>.
- [4] Wang, F. (2011). *Clothing Evaporative Resistance: Its Measurements and Application in Prediction of Heat Strain* (Issue June). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3677.5522>
- [5] John E. Hall, Artur C. Guyton, a cura di Giorgio Aicardi, Daniela Danieli, Stefano Ferraina, Giulia Gastaldi, Umberto Laforenza, Herbert Ryan Marini, Rolando Marini, Pasquale Pagliaro, mauro Pessia, Vito Enrico Pettorossi, Piero Ruggeri, Luciano Zocchi. Milano 2013. *Fisiologia medica*
- [6] <https://www.zuniv.net/physiology/book/chapter21.html>
- [7] Mady, Carlos Eduardo Keutenedjian, Cyro Albuquerque, Tiago Lazzaretti Fernandes, Arnaldo José Hernandez, Paulo Hilário Nascimento Saldiva, Jurandir Itizo Yanagihara, e Silvio de Oliveira. 2013. «Exergy Performance of Human Body under Physical Activities». *Energy* 62 (dicembre): 370–78. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.050>.
- [8] Parsons, K. (2002). *Human Thermal Environments*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16750>
- [9] Ferreira, M. S., & Yanagihara, J. I. (2009). A transient three-dimensional heat transfer model of the human body. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(7), 718–724. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.03.010>