

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BERGAMO

Dipartimento di  
Ingegneria Gestionale, dell'Informazione e della Produzione

Corso di laurea in  
Ingegneria Informatica

Classe L-8

Studio e progettazione di un controllore del  
battito cardiaco durante l'attività fisica  
tramite regolazione dell'intensità  
dell'esercizio

Candidato: *Alessandro Mangini* Relatore: *Chiar.mo Prof. Nicholas Valceschini*

Matricola n.  
1079869

Anno Accademico  
2023/2024



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>4</b>
Caso d'uso . . . . .	4
<b>1 Stato dell'arte</b>	<b>6</b>
1.1 Allenamenti strutturati con Zwift . . . . .	7
1.2 Limite dei software di training indoor . . . . .	9
1.3 Nota sul futuro della tecnologia ANT+ . . . . .	9
<b>2 Metodologia proposta</b>	<b>11</b>
2.1 Controllo in retroazione . . . . .	11
2.2 Configurazione della rete ANT+ . . . . .	15
2.3 Considerazioni sulla coesistenza di più link . . . . .	17
2.4 Problemi noti . . . . .	18
<b>3 Risultati</b>	<b>19</b>
3.1 Controllo proporzionale . . . . .	19
3.2 Controllo proporzionale-integrativo . . . . .	23
<b>Conclusioni</b>	<b>26</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>27</b>

# Introduzione

Letteralmente significa “ciclismo al coperto”, ma l’espressione *indoor cycling* indica, più in generale, un’attività sportiva che prevede la pedalata senza avanzamento su una bicicletta, finalizzata a simulare il ciclismo su strada. Per pedalare al chiuso è necessario l’utilizzo dei rulli, strumenti che consentono di fissare la bicicletta in modo stabile per renderla sempre pronta all’uso. L’attività in questione, spesso praticata dagli atleti impossibilitati ad utilizzare la bici su strada per via del maltempo e delle giornate corte, è diventata nel tempo una forma di allenamento sempre più evoluta e strutturata, in grado di consentire ai ciclisti di svolgere, tra l’altro, sessioni specifiche in assenza di traffico, semafori ed altri impedimenti caratterizzanti la circolazione su strada pubblica. Si può ritenere, di conseguenza, un mezzo estremamente utile per ottimizzare l’allenamento in qualsiasi periodo dell’anno, oltre che nell’ottica di sperimentare nuovi approcci alla preparazione atletica. Buona parte dei rulli (anche chiamati *trainer* o *smart trainer*) offre sì la possibilità di effettuare dei test (mirati, ad esempio, a valutare la condizione fisica di un ciclista), ma risulta limitata dal fatto che sia controllata in anello aperto (ovvero, senza tenere in considerazione, di volta in volta, una misura diretta della grandezza da controllare, quale la pulsazione cardiaca dell’atleta). Da questo aspetto scaturisce l’obiettivo della tesi, che consiste nella creazione di un sistema avanzato di tracking del battito cardiaco attraverso lo sviluppo di un algoritmo di controllo dell’intensità dell’esercizio.

## Caso d’uso

Dal punto di vista dell’utente finale, tale proposta ambisce a mettere a disposizione un applicativo desktop per Microsoft Windows caratterizzato, in primis, da elementi di base per il monitoraggio di una sessione di allenamento indoor, quali un cronometro ed una dashboard che riporti i dati caratterizzanti la seduta in corso, acquisiti in tempo reale. Oltre a ciò viene offerta la possibilità di indicare una pulsazione cardiaca di riferimento, che si è intenzionati in primo luogo a raggiungere, e poi a mantenere, nel corso dell’esercizio. Si tratta, dunque, di una soluzione adatta all’attuazione di metodologie di allenamento orientate alla costruzione della capacità aerobica di un atleta, per la cui messa in pratica è sufficiente conoscere con buona stima le cosiddette “zone di allenamento”

basate sulla frequenza cardiaca dello stesso (facendo riferimento, ad esempio, al comunemente adottato sistema a cinque zone o a quello a sette zone). La tesi è strutturata come segue:

**Capitolo 1** Si discutono le caratteristiche dei software di supporto al ciclismo indoor più utilizzati, oltre che le potenzialità legate allo studio della risposta fisiologica di un atleta.

**Capitolo 2** Si presenta l'approccio adottato al fine di implementare un sistema di controllo del battito cardiaco, corredato di una serie di considerazioni di natura sia teorica che pratica.

**Capitolo 3** Vengono descritti i risultati della campagna sperimentale condotta con l'ausilio dell'hardware a disposizione, arricchiti da una sequenza di grafici costruiti a partire dai dati raccolti sul campo.

**Conclusioni** Si fa il punto riguardo alla soluzione proposta da questo documento, citando un potenziale sviluppo futuro della stessa.

# Capitolo 1

## Stato dell'arte

Il fatto che uno smart trainer sia in grado di interagire con un device esterno (quale un laptop o un PC) fa sì che l'atleta possa vivere un'esperienza di allenamento particolarmente immersiva, dal momento che rende possibile la visualizzazione a schermo di una simulazione audiovisiva che ricalca l'attività fisica in corso. Nello specifico, la velocità virtuale viene regolata in tempo reale per combaciare con la velocità a cui l'utente pedala; analogamente, alcune impostazioni del rullo possono essere settate in corso d'opera per riprodurre nel modo più realistico possibile la simulazione. Per esempio, parametri quali la pendenza del tracciato ricreato e la resistenza applicata dal trainer (a cui si può pensare come ad una grandezza proporzionale al rapporto di trasmissione della bicicletta) possono essere variati al fine di simulare salite, caratteristiche della pavimentazione e l'effetto di un vento virtuale.



Figura 1.1: Postazione adatta allo svolgimento di sessioni di indoor cycling.

I dati relativi alla seduta di allenamento (cadenza di pedalata, velocità, ecc.) vengono trasmessi via wireless ad un dispositivo che si occupa della visualizzazione e dell'elaborazione degli stessi.

Nel caso specifico del protocollo di comunicazione ANT+, adottato nell'ambito di tale progetto per consentire al computer/tablet ed al trainer di scambiarsi informazioni, le tre modalità di interazione attraverso cui il primo può agire sui settaggi del rullo sono le seguenti [3]:

**Basic Resistance** Il trainer riceve un valore percentuale nel range che va da 0% a 100%, che utilizza per computare in maniera diretta la resistenza da applicare (in rapporto al massimo valore in newton che può gestire, determinato da parametri costruttivi).

**Target Power** Il rullo riceve un valore di potenza di riferimento, in funzione del quale regola la propria resistenza al variare della velocità. Ciò gli permette di mantenere una potenza costante in uscita pari a quella richiesta.

**Simulation** Con lo scopo di simulare un determinato percorso, del quale vengono tenuti in considerazione caratteristiche del terreno, altimetria e parametri aerodinamici, viene inviata una serie di informazioni al trainer. Quest'ultimo ne evince la resistenza da applicare.

## 1.1 Allenamenti strutturati con Zwift

Le procedure da poco discusse (di natura pressoché analoga nel caso di Bluetooth, un altro noto standard di trasmissione dati) stanno alla base del software su cui si appoggiano applicazioni utilizzate da milioni di utenti (prima su tutte Zwift), il cui successo si fonda sulla capacità di rendere l'attività fisica più stimolante integrando meccanismi tipici del mondo dei videogame nella pratica della stessa.



Figura 1.2: Interfaccia di Zwift nel corso di una sessione di allenamento.

Un aspetto chiave che contraddistingue Zwift è riconducibile al fatto che, una volta collegata ad uno smart trainer e configurata a tale fine, possa imporre al ciclista di generare una certa potenza. In altre parole, il rullo costringe l'atleta a rimanere (al netto di leggere escursioni) ad

una certa intensità di lavoro (pari, ad esempio, a 120 watt) per un determinato periodo di tempo. Ciò agevola in misura importante il ciclista, il quale su strada non ha altra scelta che sforzarsi di mantenere volontariamente una certa potenza, controllando frequentemente le misurazioni acquisite dal proprio ciclo-computer (assumendo che la bici sia dotata di un misuratore di potenza). Sebbene a ritmi moderati il vantaggio possa risultare poco evidente, ad intensità submassimali ed oltre lo è eccome: il rullo, minimizzando le fonti di distrazione, può fare la differenza.

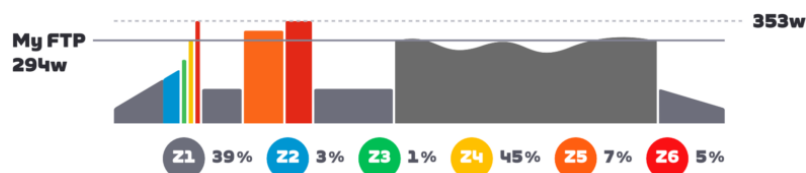


Figura 1.3: Test proposto da Zwift (Zn indica la n-esima zona cardiaca di allenamento).

Quanto affermato sinora ha dei risvolti davvero interessanti: è possibile effettuare dei test al fine di ricavare metriche in grado di riflettere la propria condizione fisica e che, pertanto, possono essere d'aiuto nel calibrare l'intensità e la struttura delle sessioni di allenamento. Ne costituisce un esempio il test FTP mostrato nella figura precedente, volto a stimare la massima potenza che si è in grado di mantenere per lungo tempo, definita, per l'appunto, FTP (*Functional Threshold Power*). A partire da tale parametro l'app riesce a delineare un profilo più rappresentativo dell'atleta, aspetto che rende più semplice suggerire allo stesso sedute di training su misura. Scendendo brevemente nel dettaglio, il test in oggetto ha una durata di 45 minuti, lungo cui i frangenti significativi sono due: una prima parte dedicata al riscaldamento ed a procurare un primo affaticamento ed una seconda fase di 20 minuti, cruciale, in cui all'atleta è richiesto di pedalare ad un'intensità massimale. La propria FTP viene infatti calcolata sulla base della potenza media espressa nel corso di quest'ultima porzione della prova.

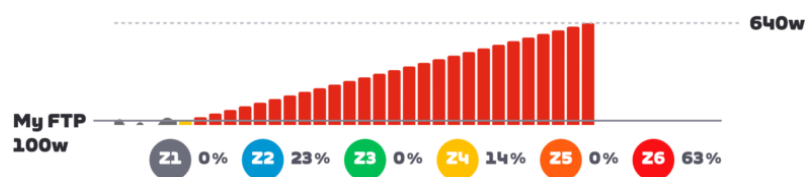


Figura 1.4: Altra variante di test FTP consigliata da Zwift.

Nel caso di questo test incrementale, d'altro canto, l'intensità risulta inizialmente contenuta, per poi essere aumentata di 20 watt ogni minuto fintantoché il ciclista non riesce più a sostenere il ritmo e cessa di pedalare. A tal punto il software ne stima la FTP come il 75% della potenza media più alta fatta registrare nel corso di uno degli intervalli da 1' costituenti la prova.



## 1.2 Limite dei software di training indoor

Come descritto nella sezione 1.1, Zwift tiene conto della potenza espressa dall'atleta ogni qualvolta debba modulare l'intensità della seduta a cui questo si sta sottoponendo. Ciononostante, alla pari di alcuni competitor, ne ignora il battito cardiaco (o meglio, lo visualizza a schermo qualora l'utente indossi un cardiofrequenzimetro, senza tuttavia disporre di funzionalità che regolino l'intensità dell'esercizio stando al suo andamento). Il solo criterio sulla base del quale Zwift sceglie i ritmi di lavoro caratterizzanti le proprie proposte di allenamento è, infatti, la percentuale di FTP del ciclista che si trova davanti. Tale decisione è stata probabilmente dettata dal fatto che la frequenza cardiaca, influenzata da numerosi fattori (quali carenza di sonno, consumo di alcolici, malattie, ecc.), sia stata ritenuta una grandezza eccessivamente variabile.

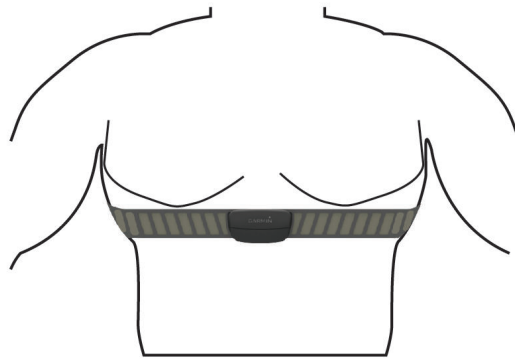


Figura 1.5: Sensore di frequenza cardiaca indossato per mezzo di una fascia toracica.

Tale questione ha dato origine all'idea di implementare un algoritmo di controllo dell'intensità dell'esercizio basato sulla frequenza cardiaca, le cui misurazioni, acquisite per mezzo di un cardiofrequenzimetro, venissero trasmesse ad un computer nella forma di messaggi informativi definiti dallo standard di comunicazione ANT+ [4] (lo stesso a costituire il tramite tra lo smart trainer e la macchina munita del sistema operativo Microsoft Windows). Dettagli a riguardo verranno forniti nel Capitolo 2, ma non prima di fare rapidamente il punto, nella prossima sezione, sul protocollo di trasmissione dati citato, relativamente a cui è stato recentemente reso noto un annuncio di importanza vitale.

## 1.3 Nota sul futuro della tecnologia ANT+

Tale specifica, sviluppata nel 2004 da Dynastream Innovations (azienda acquisita da Garmin due anni più tardi) come standard di comunicazione wireless a bassa potenza, ha rappresentato nell'ultimo ventennio una componente essenziale degli ecosistemi hardware e software attinenti al settore del fitness, con un occhio di riguardo per il mondo del ciclismo. Malgrado ciò, è attualmente in

atto una revisione del panorama normativo europeo (comprendente, nello specifico, una direttiva relativa all'immissione sul mercato di nuove apparecchiature radio) che ne richiederebbe un sostanziale stravolgimento, il quale comprometterebbe anche la compatibilità garantita, al momento, tra prodotti rilasciati sul mercato anni addietro. Poiché la maggior parte del valore dello standard ANT+ è attribuibile proprio all'interoperabilità che esso assicura, ridefinirne le prerogative nell'intento di soddisfare i nuovi requisiti non è stata ritenuta una strada percorribile. Per questa ragione i programmi di certificazione di nuovi device conformi alla specifica, così come il supporto tecnico ad essi associato, verranno interrotti definitivamente a partire dal 30 giugno 2025. I dispositivi attualmente in commercio continueranno invece ad essere funzionanti, così come la documentazione tecnica ad essi correlata rimarrà disponibile sul sito ufficiale.

## Capitolo 2

# Metodologia proposta

Implementare un algoritmo di controllo dell'intensità di una sessione di indoor cycling basato sulla frequenza cardiaca dell'atleta richiede, senz'ombra di dubbio, di procedere alla configurazione di un sistema di controllo in anello chiuso (anche chiamato *feedback loop*). Quest'ultimo risulta, infatti, in grado di autoregolarsi, adattando il proprio comportamento a qualsiasi variazione del battito cardiaco del ciclista (misurato in tempo reale da un apposito sensore). Avendo scelto di lavorare, nel caso specifico, con lo standard di comunicazione ANT+ in qualità di “linguaggio” parlato dai dispositivi in uso, si è optato per la modalità **Basic Resistance** (già descritta nel Capitolo 1), nell'ambito di cui il rullo calcola in maniera diretta la resistenza da applicare a partire da valori in percentuale ricevuti dal computer/tablet, il quale si fa carico di determinarne l'entità in corso d'opera a seconda dell'andamento della risposta fisiologica dell'atleta.

### 2.1 Controllo in retroazione

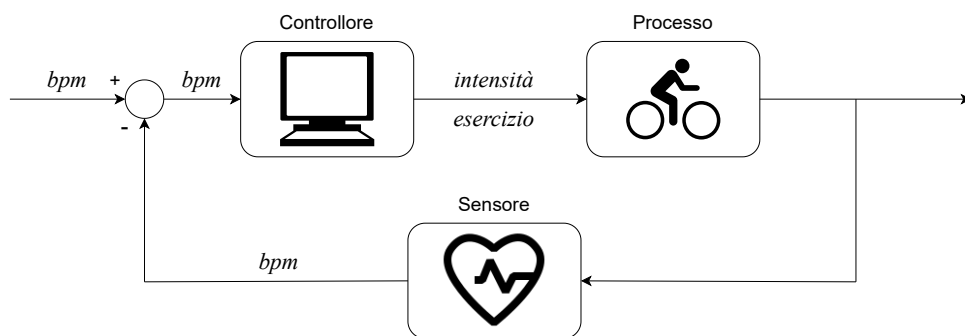


Figura 2.1: Sistema di controllo in anello chiuso.

Il processo sotto controllo è l'atleta stesso, il cui ritmo di lavoro viene dettato dallo smart trainer su cui ha installato la propria bicicletta. A monte, tuttavia, è chiaramente un dispositivo esterno (durante la campagna sperimentale, un laptop) ad inviare comandi al rullo. Nel concreto si

è deciso di fornire al sistema un valore target di battito cardiaco attraverso l'interfaccia grafica dell'applicativo desktop, dunque si può sostenere che la forma di regolazione dell'intensità della seduta che si vuole mettere in pratica sia piuttosto essenziale: qualora la pulsazione cardiaca dell'atleta risultasse inferiore a quella desiderata si aumenterebbe la resistenza del rullo (in misura proporzionale alla differenza tra le due quantità) al fine di intensificare l'attività fisica, altrimenti la si imposterebbe al minimo valore possibile (1%) per agevolare la pedalata ed indurre, di conseguenza, una progressiva diminuzione del battito cardiaco del ciclista.

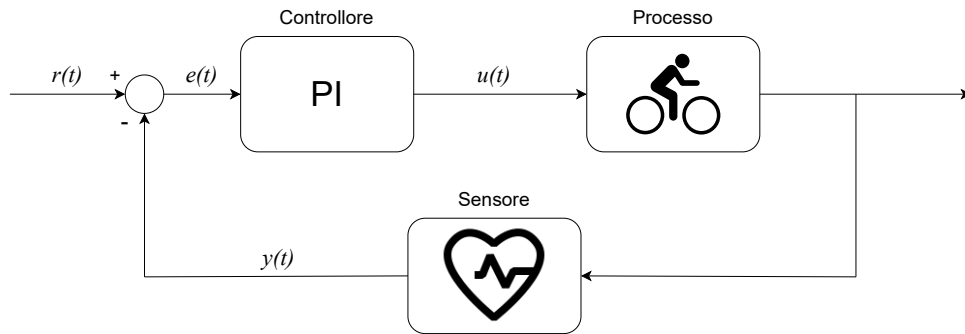


Figura 2.2: Feedback loop nel dominio del tempo.

Utilizzando ora la terminologia propria dell'ingegneria dei sistemi di controllo ed analizzando il sistema nel dominio del tempo, si può affermare che il programma implementi un controllore PI, il quale calcola ad intervalli di tempo regolari l'errore di processo  $e(t)$  come la differenza tra il valore di riferimento  $r(t)$  (la pulsazione cardiaca target) e la variabile di processo misurata  $y(t)$  (la pulsazione cardiaca acquisita tramite cardiofrequenzimetro). Questo gli consente, di volta in volta, di minimizzare l'errore di processo scegliendo un nuovo valore per la variabile di controllo  $u(t)$  (la resistenza applicata dal rullo, in termini percentuali).

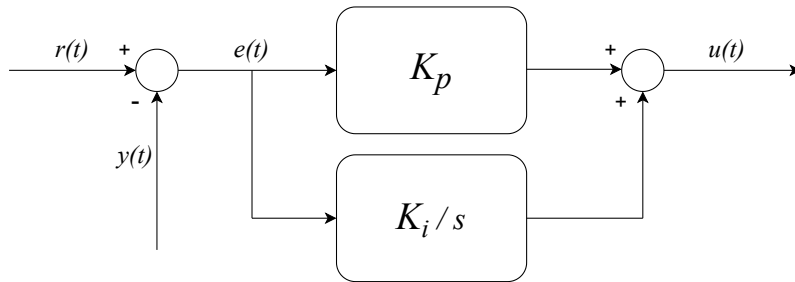


Figura 2.3: Dettaglio del regolatore, rappresentato in forma parallela.

Un controllore di questo tipo è pensato per applicare una correzione sulla base di un termine proporzionale e di un termine integrale, i cui effetti vengono determinati rispettivamente dalla scelta del coefficiente di azione proporzionale  $K_p$  e dal valore assegnato al coefficiente di azione integrale  $K_i$ . La legge di controllo di un regolatore PI (ideale) in forma parallela è, in funzione

della variabile di controllo  $u(t)$ , la seguente [1]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Applicando la trasformata di Laplace si ottiene (come visibile nell'ultima figura):

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{K_i}{s} E(s)$$

Per poter mettere in atto il controllo si rende necessario procedere alla discretizzazione di questa espressione, applicando delle tecniche di integrazione numerica (in particolare, il metodo della trasformazione bilineare) e prendendo in considerazione un regolatore a tempo discreto con tempo di campionamento  $T_s$ . Optando per la procedura numerica nota come “Eulero in avanti” si utilizza l'approssimazione  $s \rightarrow \frac{z-1}{T_s}$ , per mezzo della quale (considerando i singoli contributi) si ottiene:

- Proporzionale

$$U_p(z) = K_p E(z)$$

- Integrale

$$U_i(z) = K_i \frac{T_s}{z-1} E(z)$$

Passando poi alla formulazione ricorsiva (e ritornando, di conseguenza, nel dominio del tempo) si arriva ad avere tali contributi:

- Proporzionale

$$u_p(k) = K_p e(k)$$

- Integrale

$$(z-1) U_i(z) = K_i T_s E(z)$$

$$z U_i(z) - U_i(z) = K_i T_s E(z)$$

$$z U_i(z) = U_i(z) + K_i T_s E(z)$$

$$u_i(k+1) = u_i(k) + K_i T_s e(k)$$

$$u_i(k) = u_i(k-1) + K_i T_s e(k-1)$$

Alla luce di ciò, l'ingresso (a tempo discreto) da fornire al processo sotto controllo risulta essere, globalmente:

$$u(k) = u_p(k) + u_i(k)$$

Si noti come la componente integrale si configuri come una sommatoria, motivo per cui, anche nell'ottica di migliorare l'efficienza computazionale, viene implementata ricorsivamente persino a livello software. Si presti inoltre attenzione all'apporto dell'azione integrale stessa, la quale tenendo conto dell'errore di processo calcolato all'iterazione precedente riesce a garantire errore

nullo a transitorio esaurito (a fronte di segnali di riferimento ed eventuali disturbi additivi di natura costante, come nello scenario in questione), aspetto al quale il contributo di natura proporzionale non riesce a fare fronte in quanto nel caso di quest'ultimo, banalmente, un'azione di controllo è possibile solamente qualora l'errore di processo non risulti nullo. Si propone, a seguire, l'algoritmo chiamato in causa ogni 15 secondi (valore scelto per  $T_s$ ) al fine di procedere al computo della  $k$ -esima azione di controllo (ad eccezione delle prime due linee di codice, eseguite unicamente in fase di inizializzazione):

```

 $e(k-1) \leftarrow 0$ 
 $u_i(k-1) \leftarrow 0$ 
while pulsante di stop non premuto do
     $y(k) \leftarrow \text{battito cardiaco misurato}$ 
     $e(k) \leftarrow \text{riferimento} - y(k)$  ▷ Calcolo dell'errore di processo
     $u_p(k) \leftarrow K_p e(k)$ 
     $u_i(k) \leftarrow u_i(k-1) + K_i T_s e(k-1)$  ▷ Aggiornamento del termine integrale
     $u(k) \leftarrow u_p(k) + u_i(k)$ 
    if  $u(k) > u_{max}$  then ▷ Applicazione dei limiti di saturazione
         $u(k) \leftarrow u_{max}$ 
    else if  $u(k) < u_{min}$  then
         $u(k) \leftarrow u_{min}$ 
    end if
     $e(k-1) \leftarrow e(k)$ 
     $u_i(k-1) \leftarrow u_i(k)$ 
end while

```

La scelta di  $T_s$  non è stata casuale, bensì condizionata dalla necessità di prevedere un certo disaccoppiamento tra la frequenza di acquisizione della variabile di processo (ovvero, il ritmo a cui il programma riceve dal cardiofrequenzimetro rilevazioni di pulsazione cardiaca, fissato a 1.02 Hz) e la frequenza di controllo, la quale deve assolutamente risultare più contenuta ed è pari, come si può facilmente intuire, a:

$$f_s = \frac{1}{T_s}$$

Si passano in rassegna, nella sezione che segue, le caratteristiche dei device impiegati nel corso della campagna sperimentale, la cui interazione ha dato modo di modulare l'intensità di una sessione di allenamento indoor sulla base delle variazioni di frequenza cardiaca del ciclista.

## 2.2 Configurazione della rete ANT+

Prima di esplorare le modalità di comunicazione volte a consentire ai device di interfacciarsi tra loro può essere utile presentarne, per sommi capi, le proprietà, con la finalità di fare mente locale sull'hardware a disposizione:

**Hub** Il ricetrasmittitore collegato attraverso un connettore USB-A ad una macchina su cui è installato il sistema operativo Windows, il quale assume il ruolo di “unità centrale” con il compito sia di acquisire informazioni trasmesse dai sensori che di far pervenire indicazioni allo smart trainer.



Figura 2.4: Ricetrasmittitore munito della connettività ANT+.

**Trainer** Il cosiddetto “rullo”, impiegato sia per regolare l'intensità della sessione di allenamento sulla base del valore di resistenza determinato dal software che per venire a conoscenza, in tempo reale, delle seguenti grandezze istantanee caratterizzanti la prestazione fisica in atto:

- Cadenza di pedalata (rpm)
- Potenza espressa (watt)
- Velocità (km/h)



Figura 2.5: Garmin Tacx NEO 3M Smart Trainer, su cui viene montata la bicicletta.

**HR Monitor** Il sensore di frequenza cardiaca, indossato dall'atleta per mezzo di una fascia toracica dotata di inserti in silicone antiscivolo ed in grado di effettuare misurazioni accurate.



Figura 2.6: Sensore di frequenza cardiaca Polar H10.

Va segnalato il fatto che le grandezze rilevate dal rullo e dal cardiofrequenzimetro vengano trasmesse all'unità centrale a ritmi predefiniti, secondo quanto stabilito dal profilo ANT+ (una sorta di contratto che definisce il formato dei messaggi in uso ed i parametri dei canali di comunicazione su cui questi vengono immessi) che implementano: entrambi, in particolare, inviano pacchetti di dati in modalità *broadcast* circa quattro volte al secondo; ciononostante, come accennato in precedenza, l'unità centrale limita la frequenza di ricezione dati dalla fascia cardio a circa 1 Hz per una questione di ottimizzazione. Quest'ultimi, infatti, riflettono sì l'intensità dell'esercizio fisico che si sta portando avanti con un buon potere esplicativo, ma lo fanno con un certo ritardo, il quale non giustifica la decisione di valutarne l'andamento più volte al secondo.

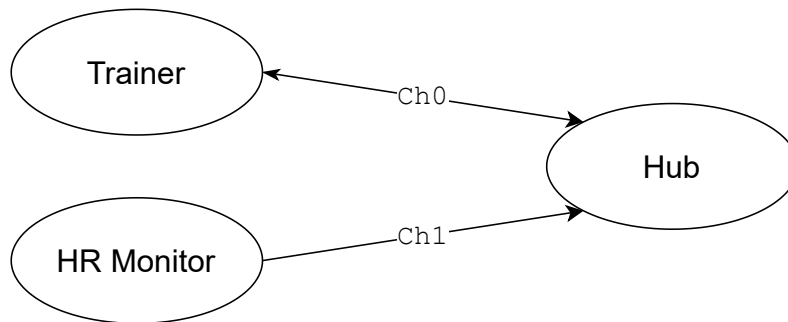


Figura 2.7: Configurazione del network in esame.

I canali di comunicazione di cui la rete si serve, entrambi indipendenti, vedono la presenza dell'unità centrale nel ruolo di slave. Essa è principalmente incaricata di ricevere pacchetti informativi dai sensori (concepiti come master), ma sfrutta il link 0 anche per inviare comandi allo smart trainer finalizzati ad impostarne un nuovo valore di resistenza. Si tratta dunque di canali bidirezionali (malgrado nel caso del canale 1 non ci si avvalga di tale funzionalità), ai quali i dispositivi coinvolti si associano nella fase di inizializzazione del programma.



## 2.3 Considerazioni sulla coesistenza di più link

Si potrebbe pensare che l'utilizzo di più mezzi trasmissivi operanti alla medesima radiofrequenza (nel caso specifico a 2457 MHz, trattandosi di device conformi allo standard ANT+) possa dare vita a fenomeni di interferenza tra gli stessi. In realtà ciò non accade, dal momento che la tecnologia in uso concepisce un link come una costruzione di alto livello nell'ambito di cui la banda complessivamente disponibile viene condivisa attraverso uno schema TDMA (*Time Division Multiple Access*). Basti sapere che la massima frequenza di trasmissione di messaggi informativi in modalità broadcast, pari a circa 300 Hz, è del tutto indipendente dal numero di canali attivi sul dispositivo in uso. Resta, d'altra parte, il fatto che in alcune circostanze non tutti i canali che desiderano procedere alla comunicazione possano avere la possibilità di farlo. Tali eventi, spesso indicati come “collisioni”, hanno luogo a livello del dispositivo e non, a differenza di quanto si possa credere, nello spazio in radiofrequenza.

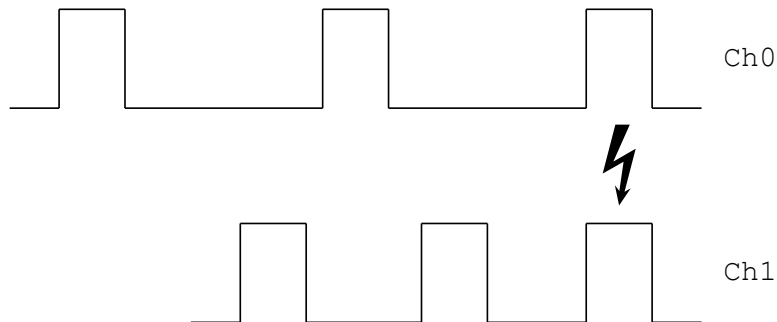


Figura 2.8: Esempio grafico di collisione tra i due canali della rete.

In questi scenari soltanto uno dei link in competizione ha modo di accedere all'unica radiofrequenza a disposizione. Nello specifico, i dati in transito sul canale al quale l'accesso viene negato vengono persi lato slave, mentre i device che si comportano da master riproveranno a trasmettere tali informazioni, temporaneamente conservate in un buffer di cui sono dotati, all'interno della finestra temporale delineata dal successivo periodo di canale. Ciò che è importante tenere a mente, ad ogni modo, è che una collisione tra canali non costituisce un errore; si tratta, all'opposto, di un evento ordinario, il cui verificarsi non deve rappresentare un campanello d'allarme. Certo è che, qualora questo si verificasse con una frequenza tale da estromettere un link dalla comunicazione per un periodo di tempo prolungato, si renderebbe necessario contrastare tale condizione attraverso interventi mirati (quali, ad esempio, l'introduzione di un canale condiviso per gestire più flussi di dati concorrenti o di meccanismi basati su priorità). Una sorgente di collisioni osservata più volte nell'ambito di questo lavoro (fortunatamente, senza implicazioni problematiche) ha a che fare con la sovrapposizione di periodi di canale, nel senso che frequenze di trasmissione come 1.02 Hz (cardiofrequenzimetro) e 4 Hz (trainer) non possono far altro che andare a coincidere periodicamente, impedendo ad uno dei due device di portare a termine la propria trasmissione.

## 2.4 Problemi noti

Nel corso della campagna sperimentale condotta al fine di testare l'algoritmo sviluppato si sono evidenziate due problematiche, legate in diversa misura all'allestimento del luogo in cui effettuare le sessioni di allenamento indoor. La prima sta nella mancata trasmissione di informazioni relative alla cadenza di pedalata da parte del rullo, mentre la seconda ha a che vedere con la potenziale incapacità di portare avanti l'esercizio fisico contando sul supporto del controllore per lungo tempo. Ne segue una plausibile interpretazione:

**Cadenza istantanea sempre pari a 0 rpm** Tale inconveniente potrebbe essere riconducibile ad un bug presente nell'aggiornamento software attualmente installato sullo smart trainer utilizzato, così come al fatto che il sensore di cadenza integrato nello stesso non funzioni correttamente.

**Problemi sporadici con la trasmissione del riferimento di resistenza al trainer** Durante le prove di verifica del funzionamento della soluzione proposta si ha avuto modo di osservare che, talvolta, la trasmissione di comandi finalizzati a variare la resistenza del rullo non andasse a buon fine. Il solo fatto di avvicinare il più possibile il ricetrasmittitore allo stesso (ad una distanza di pochi centimetri, grazie al filo di 1.5 m in dotazione) ha fatto sì, in realtà, che la ricezione del segnale ANT+ migliorasse drasticamente, dando la possibilità di condurre dei test dalla durata compresa tra 1'30" e 3'30" senza alcun intoppo.

## Capitolo 3

# Risultati

È stata portata a termine una campagna sperimentale su un sistema reale, non solo con la finalità di validare il funzionamento dell'algoritmo di controllo della frequenza cardiaca (oltre che la robustezza della comunicazione tra i device della rete ANT+, prerequisito essenziale per poterlo mettere in pratica con efficacia e replicabilità), ma anche nell'ottica di tarare il controllore agendo sui due parametri introdotti nel Capitolo 2: il coefficiente di azione proporzionale  $K_p$  ed il coefficiente di azione integrale  $K_i$ . La regolazione è stata effettuata, per l'appunto, per mezzo di prove empiriche, senza ricorrere ad approcci più strutturati come quelli previsti dai metodi di taratura di Ziegler-Nichols o da quello di Cohen-Coon. A seguire si presentano i risultati di una serie di test di diversa durata, nel contesto dei quali il target di pulsazione cardiaca è stato impostato a 110 bpm e l'atleta coinvolto ha cercato di mantenere una velocità di 20 km/h. Quest'ultima scelta è legata alla volontà di rispettare un'ipotesi fondamentale, la quale prevede che la velocità debba rimanere pressoché costante durante l'attività fisica per impedire che l'effetto del controllo venga falsato (in particolare, significative riduzioni della velocità e, di conseguenza, del battito cardiaco della persona indurrebbero il controllore a computare e trasmettere al rullo valori di resistenza molto elevati, rendendo il gesto della pedalata tutt'altro che naturale).

### 3.1 Controllo proporzionale

Nell'ottica di osservare diversi comportamenti del controllore al variare della scelta dei parametri che ne determinano la reazione alle variazioni della pulsazione cardiaca del ciclista, in una prima fase si è deciso di escludere il contributo dell'azione integrale. Malgrado il solo apporto del termine proporzionale, esclusivamente basato sull'entità dell'errore di processo al momento del calcolo dell'azione di controllo, nel corso delle prime prove l'intensità dell'esercizio si è rivelata facilmente sostenibile. Come si può notare dal grafico che segue, la resistenza calcolata dal laptop ed applicata dal trainer non è mai stata inferiore al valore minimo preventivato (1%, come indicato nella sezione 2.1) e non ha mai superato il 15% del massimo valore supportato.

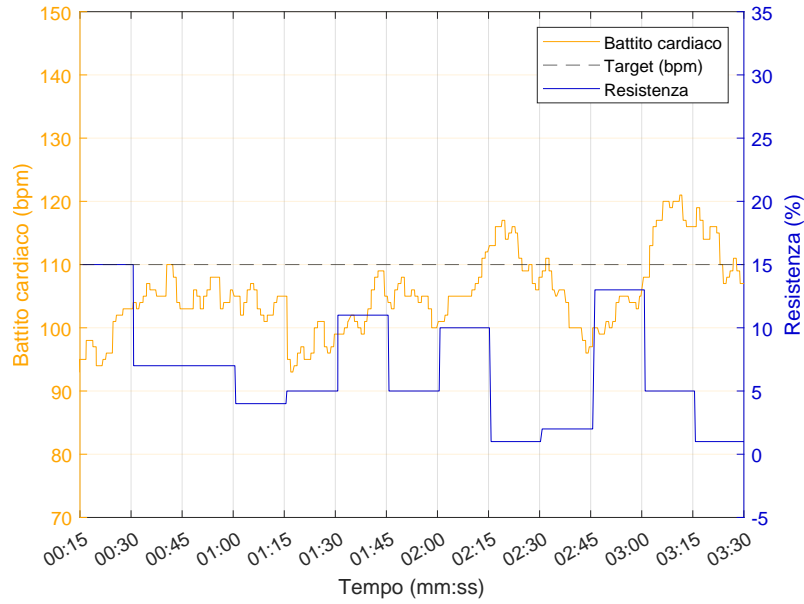


Figura 3.1: Un primo esperimento con  $K_p = 1$  e  $K_i = 0$ .

Nemmeno il fatto di non essersi fedelmente attenuti all'assunzione relativa alla velocità a cui svolgere l'esercizio fisico ne ha compromesso la riuscita, a differenza di quanto ci si potesse aspettare adottando una prospettiva cautelativa.

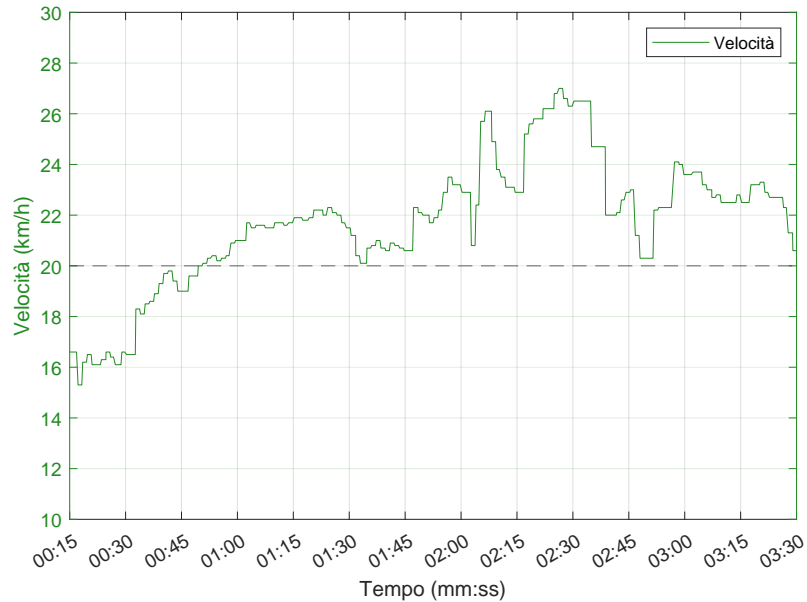


Figura 3.2: Velocità mantenuta nel corso del primo esperimento.

Come si può immaginare, la potenza istantanea generata nei vari frangenti della sessione di allenamento è risultata strettamente connessa alla resistenza applicata dal rullo, all'aumentare della quale il lavoro richiesto all'atleta si intensifica.

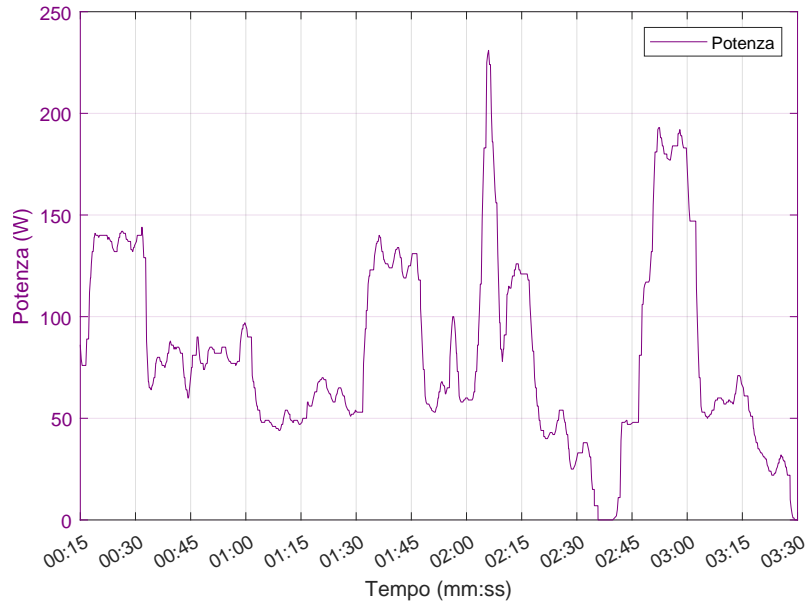


Figura 3.3: Valori di potenza registrati nel primo esperimento.

Ridimensionare l'entità di  $K_p$  è stato sufficiente per ottenere una soluzione migliore dal punto di vista della limitazione delle variazioni repentine di intensità, che possono inficiare l'agilità di pedalata e far aumentare a dismisura il battito cardiaco: in quest'altro caso, infatti, per l'atleta si è rivelato più semplice rimanere nell'intorno del target di 110 bpm settato in precedenza.



Figura 3.4: Un secondo test con  $K_p = 0.5$  e  $K_i = 0$ .

Nulla da segnalare riguardo alla capacità più netta di procedere ad una velocità prossima a 20 km/h. L'atleta ha, semplicemente, prestato più attenzione a tale aspetto nel corso della prova.

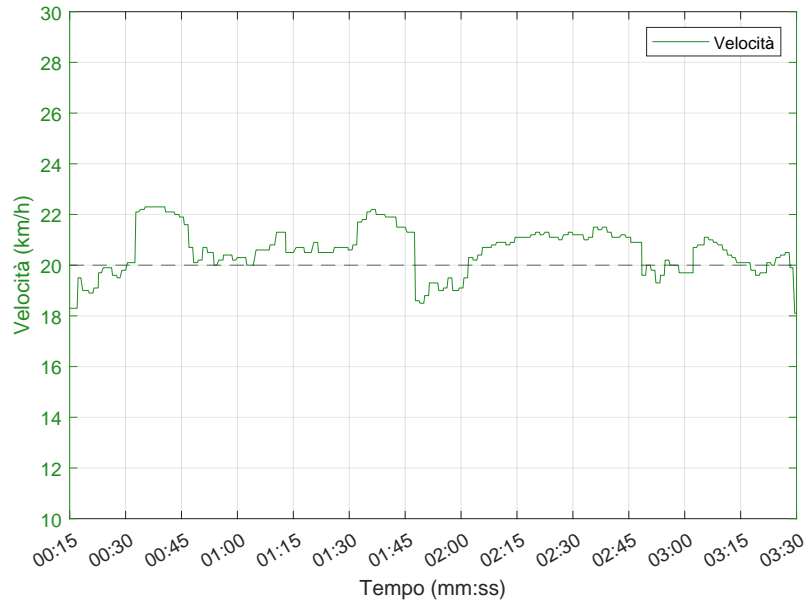


Figura 3.5: Velocità mantenuta nel corso del secondo test.

A riprova dell'esito più soddisfacente in relazione a quello della soluzione precedente, i picchi di potenza istantanea misurati in tal caso sono decisamente più contenuti in termini di valore assoluto. Si parla, difatti, di un massimo di circa 120 watt in confronto al quantitativo più o meno doppio riscontrato nello scenario contraddistinto dalla scelta di  $K_p = 1$ . Adottare, come nel secondo esperimento,  $K_p = 0.5$  e  $K_i = 0$  porta già ad apprezzare a pieno l'efficacia del controllo nel mantenimento del ritmo di lavoro desiderato.

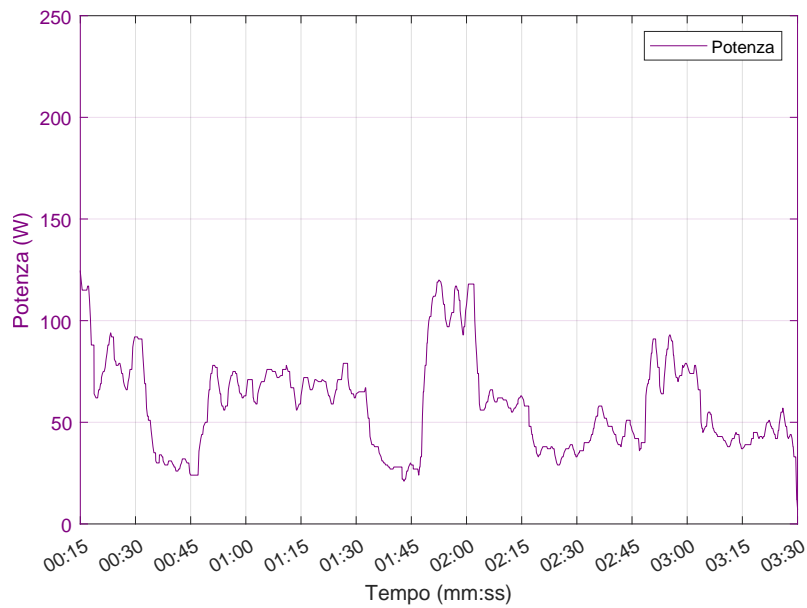


Figura 3.6: Potenza erogata durante il secondo test.

## 3.2 Controllo proporzionale-integrativo

La peculiarità dell'azione integrale, come affermato nel Capitolo 2, risiede nel fatto che un controllore equipaggiato con la stessa tenga conto dei valori passati del segnale d'errore; in particolare, il valore della componente integrale non è necessariamente nullo se è nullo il segnale d'errore. Tale proprietà conferisce ad un controllore PI la capacità di portare la variabile di processo (in tal caso, la pulsazione cardiaca dell'atleta) esattamente al valore richiesto, laddove il contributo della sola azione proporzionale risulterebbe ininfluente. Non si trascuri, tuttavia, il fatto che il calcolo dell'azione di controllo venga effettuato ad intervalli di tempo relativamente poco frequenti (per esattezza, ogni 15 secondi): ciò comporterebbe, qualora si optasse per un valore di  $K_i$  prossimo a quello assegnato a  $K_p$ , un intervento eccessivo da parte dell'azione integrale. Si è quindi partiti dalla scelta che aveva contrassegnato il secondo test ( $K_p = 0.5$ ) per realizzare degli esperimenti nell'ambito di cui l'entità di  $K_i$  risultasse di almeno un ordine di grandezza inferiore rispetto a quella dell'altro coefficiente. Sarà dunque immediato appurare, malgrado la limitata durata dei test che seguono, come la correzione introdotta dal controllore non prenda in esame esclusivamente l'errore di processo corrente, ma anche quello riscontrato in concomitanza con l'iterazione di controllo precedente (vale a dire, 15 secondi prima).

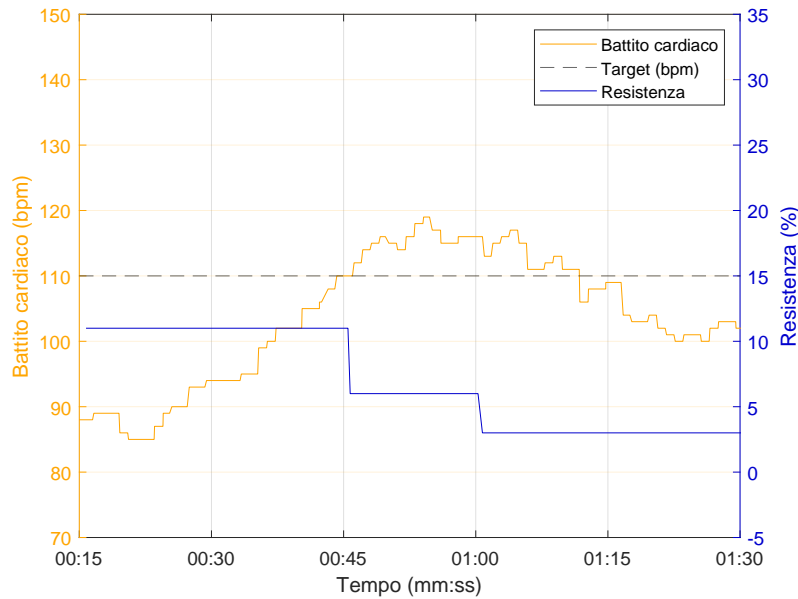


Figura 3.7: Un terzo esperimento con  $K_p = 0.5$  e  $K_i = 0.01$ .

Durante questo terzo test il contributo del termine integrale, condizionato dal valore assegnato a  $K_i$  (probabilmente troppo basso), non è stato percepibile; nulla da evidenziare, pertanto, rispetto agli esperimenti precedenti, nell'ambito di cui il valore del coefficiente di azione integrale era stato posto a zero. Non si riporta, a seguire, l'andamento della velocità, vicina a 20 km/h nel corso dell'intera prova.

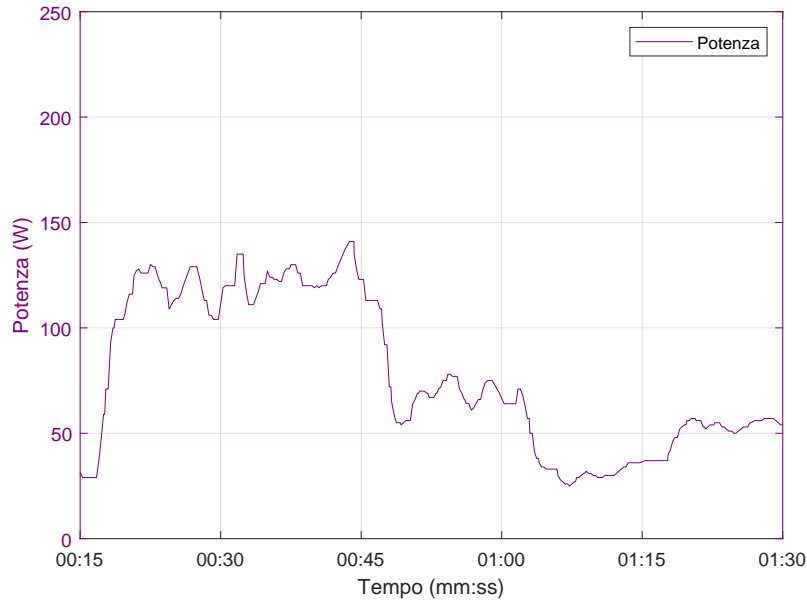


Figura 3.8: Potenza espressa nel corso del terzo esperimento.

In questo terzo esperimento è stato davvero immediato, d'altro canto, constatare il nesso tra la resistenza applicata dal rullo ed il lavoro richiesto all'atleta al fine di continuare a pedalare alla stessa velocità sotto nuove condizioni esogene: la prima diminuzione di intensità intorno a 45" di attività gli consente di passare da circa 120 W alla metà della potenza, così come il successivo decremento avvenuto intorno ad un minuto dall'inizio della prova facilita ulteriormente la prosecuzione dell'allenamento.

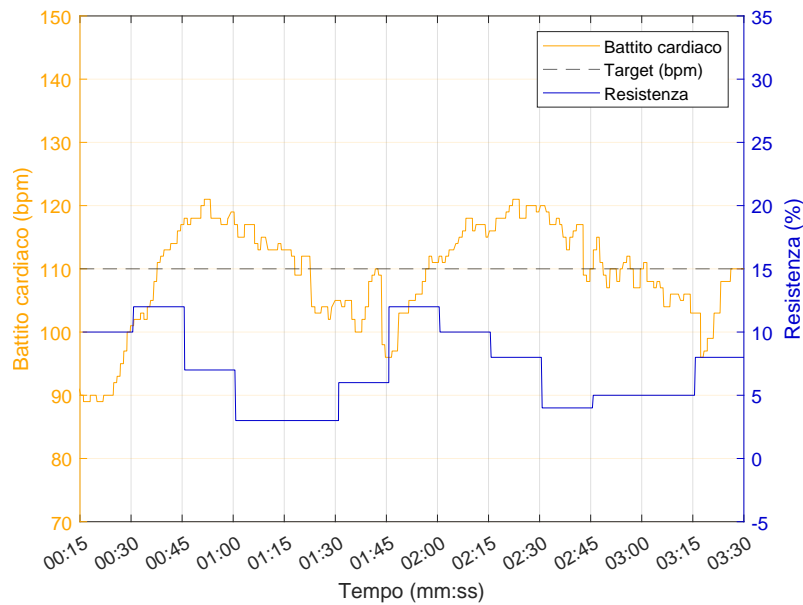


Figura 3.9: Un ultimo test con  $K_p = 0.5$  e  $K_i = 0.025$ .



Preferire un rapporto tra  $K_p$  e  $K_i$  meno elevato si è rivelato essere più indicato, conducendo ad un eccellente risultato nel corso di un ulteriore test. In occasione di quest'ultimo sono emerse, infatti, ottime sensazioni in sella alla bicicletta, con una totale assenza di “strappi” e frangenti in cui la cadenza risultasse troppo bassa (condizione sicuramente da evitare); si omette, come in precedenza, il grafico della velocità registrata lungo la prova.

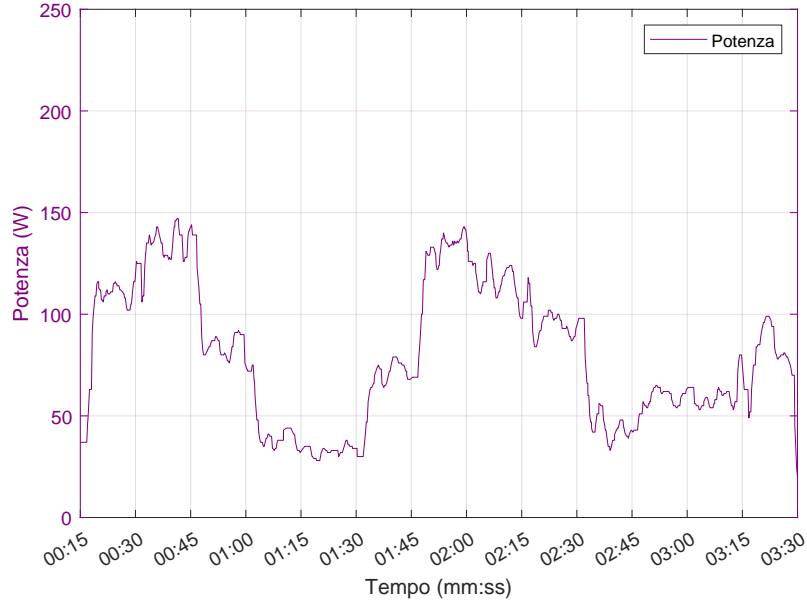


Figura 3.10: Valori di potenza caratterizzanti l'ultimo test.

Tirando le somme, sia il secondo test presentato (con la scelta di  $K_p = 0.5$  e  $K_i = 0$ ) che l'ultimo (contraddistinto da  $K_p = 0.5$  e  $K_i = 0.025$ ) si sono dimostrati più che convincenti da un punto di vista pratico, dando l'impressione che l'apporto dell'azione integrale all'efficacia dell'algoritmo di controllo dell'intensità della seduta di training indoor non sia da ritenersi imprescindibile.

# Conclusioni

L'algoritmo di controllo dell'intensità di sessioni di ciclismo indoor sviluppato, basato sulle variazioni della frequenza cardiaca dell'atleta, può costituire un utile strumento di supporto nell'ambito di allenamenti specificatamente dedicati alla costruzione aerobica. Come mostrano i risultati della campagna sperimentale che ha interessato il vero sistema (i cui attori sono i tre dispositivi descritti nella sezione 2.2), tali sedute si svolgono a ritmi di lavoro basso-moderati e, nel contesto professionale, vengono utilizzate in modo diffuso nei frangenti dell'anno distanti dalle competizioni. Una potenziale evoluzione di quanto proposto potrebbe passare da una modifica dell'input che il ciclista fornisce al programma, attualmente dato dal target di battito cardiaco che egli vuole in prima battuta raggiungere, e poi mantenere, nel corso dell'attività fisica. Si potrebbe pensare, infatti, di essere più ambiziosi, mettendo a disposizione del software una curva di pulsazione cardiaca (per esempio, sotto forma di un file CSV) di cui si vuole seguire l'andamento nel corso della seduta. Una soluzione di questo tipo, più avanzata, richiederebbe chiaramente altre accortezze, ma darebbe la possibilità di sperimentare nuove metodologie di allenamento basate sulla frequenza cardiaca.

# Bibliografia

- [1] Paolo Bolzern. *Fondamenti di controlli automatici*. McGraw-Hill Education, 2015.
- [2] Garmin Canada. *ANT Message Protocol and Usage*. URL: <https://www.thisisant.com/resources/ant-message-protocol-and-usage/>.
- [3] Garmin Canada. *ANT+ Device Profile - Fitness Equipment*. URL: <https://www.thisisant.com/resources/fitness-equipment-device/>. (ANT+ Adopter Account richiesto).
- [4] Garmin Canada. *ANT+ Device Profile - Heart Rate*. URL: <https://www.thisisant.com/resources/heart-rate-monitor/>. (ANT+ Adopter Account richiesto).
- [5] Garmin Canada. *Getting Started with ANT PC Development*. URL: <https://www.thisisant.com/resources/ant-an-getting-started-with-ant-pc-development/>.
- [6] Christian Nagel. *C# 2005. Guida per lo sviluppatore*. Hoepli, 2005.