



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DELL'INSUBRIA

CORSO DI STUDI IN SCIENZE MOTORIE

**LA POTENZA MECCANICA NEL CICLISMO: ANALISI E
CONSIDERAZIONI SU DATI SPERIMENTALI DEL
GIRO D'ITALIA 2014**

Relatore:
Prof. Massimiliano MANTOVANI

Tesi di Laurea di:
Fabio Giuseppe LAGINESTRA

Matr. N. 717923

Anno Accademico: 2013-2014

Sommario

1. Introduzione	4
2. Importanza della potenza.....	6
3. Parametri fisiologici.....	8
3.1 La potenza aerobica : il VO_2 max.....	8
3.2 Ventilazione polmonare VE	9
3.3 Soglia anaerobica	9
4. Fisiologia del ciclismo	11
4.1 La potenza aerobica del ciclista: il VO_2	11
4.2 Potenza assoluta W - Potenza normalizzata W/kg.....	12
4.3 VE, pattern respiratori e fatica dei muscoli inspiratori	12
4.4 Contributo anaerobico	13
4.5 Intensità dello sforzo in gara	14
5. Fattori influenzanti la prestazione: analisi fisiologica	16
5.1 Attrito aerodinamico	16
5.2 Attrito volvente	17
5.3 Pendenza del terreno	18
5.4 Efficienza ed economia del gesto.....	18
5.5 Frequenza di pedalata.....	19
6. Fattori influenzanti la prestazione: analisi fisico-meccanica.....	21
6.1 Lavoro e costo energetico del ciclismo.....	21
6.2 Attrito aerodinamico	22
6.3 Attrito volvente	23
6.4 Pendenza del terreno	23
6.5 Efficienza e frequenza di pedalata	24
7. Strumenti per misurare la potenza.....	25
7.1. SRM	25
7.2 PowerTap.....	26
7.3 Polar Electro.....	26
7.4 Newton iBike	27
8. Analisi sperimentale.....	31

8.1	Introduzione	31
8.2	Materiali, metodi e protocollo	31
8.3	Risultati e discussione.....	33
9.	Appendice.....	44
10.	Bibliografia.....	45

1. Introduzione

L'utilizzo dei power meter nel mondo del ciclismo è una realtà che va man mano consolidandosi. Questi strumenti hanno fatto la loro comparsa alla fine degli anni '80, con il primo SRM ideato da Uli Schoberer e utilizzato in allenamento dal ciclista americano Greg LeMond. Da allora molti altri produttori si sono cimentati nella realizzazione di power meter che sfruttano diversi sistemi, ognuno con i suoi pro e contro. I moderni apparecchi forniscono una quantità di dati davvero notevole, che permette lo studio dei tracciati in allenamento o in gara sotto molteplici aspetti. L'interpretazione e la gestione di questa mole di dati però, presuppone delle conoscenze di fisiologia e di fisica da parte di chi ha il compito di studiare i tracciati, che permettono lo sviluppo di una programmazione dell'allenamento finissima e personalizzata per le esigenze dell'atleta.

In questa tesi verranno discussi i dati derivanti dalle rilevazioni effettuate su ciclisti d'élite, tutti aventi partecipato all'edizione del Giro d'Italia 2014. Il lavoro è stato svolto in diverse fasi: nella prima, si sono svolti i test funzionali in laboratorio per determinare i parametri dei soggetti sul quale l'analisi sarebbe stata effettuata. Nella seconda fase, i ciclisti hanno partecipato al Giro montando sulla propria bici il power meter sul quale abbiamo deciso di fare affidamento per la nostra indagine, il Newton iBike. Al termine delle rilevazioni si è proceduto con la scrematura delle rilevazioni "errate" a causa di qualche malfunzionamento e con l'editing, per implementare a posteriori, dove possibile, eventuali deficit nella misurazione. Si è quindi passati ad analizzare due delle tappe ritenute più significative, effettuando un doppio confronto: uno con la letteratura, per avere feedback sulla bontà delle nostre rilevazioni, ed un altro tra atleti aventi partecipato alla stessa tappa per notare le differenze di carattere fisiologico che intercorrevano tra essi. E' stata inoltre sfruttata la rilevazione per leggere l'andamento della gara, intuendo la strategia del team dalla semplice analisi del tracciato.

Il Capitolo 2 è una estensione dell'introduzione, nel quale si spiega brevemente quali sono i motivi che spingono tecnici e atleti all'approcciarsi all'allenamento tramite i dati di potenza.

Il Capitolo 3 presenta dei cenni di fisiologia generale, con la spiegazione di quelli che sono i principali parametri fisiologici che incontreremo nel corso della tesi.

Il Capitolo 4 illustra i parametri trattati nel capitolo precedente in applicazione al ciclismo, descrivendo le caratteristiche degli atleti in base agli studi presenti in letteratura.

I Capitoli 5 e 6 trattano i fattori che influenzano la prestazione ciclistica, prima da un punto di vista fisiologico, con le considerazioni di quello che succede all'organismo dell'atleta sotto determinate condizioni. In seguito è presentata l'analisi fisico-meccanica delle varie condizioni che determinano la performance.

Il Capitolo 7 si propone di effettuare una dissertazione sugli attuali power meter presenti sul mercato, valutando pro e contro di ognuno dei principali prodotti. Ci focalizzeremo maggiormente sul Newton iBike, visto che è lo strumento utilizzato nella parte sperimentale della tesi per l'analisi.

Il Capitolo 8 illustra l'analisi e le considerazioni oggetti di studio nella tesi. Saranno presentati i soggetti con le rispettive caratteristiche antropometriche e fisiologiche, la strumentazione e i metodi utilizzati nello studio per poi proseguire con la presentazione di risultati e discussione degli stessi.

E' presente un'appendice al termine del lavoro per racchiudere e descrivere le abbreviazioni usate all'interno dell'elaborato.

2. Importanza della potenza meccanica

La prima domanda che ci si pone avvicinandosi al mondo dei misuratori di potenza è: perché utilizzare la potenza per la verifica e la programmazione dell'allenamento quando si possono utilizzare i dati provenienti da un semplicissimo e molto più economico cardiofrequenzimetro? La risposta non è immediata e presenta molte sfaccettature. Innanzitutto la frequenza cardiaca è fondamentalmente il parametro che ci dice quanto velocemente il cuore sta lavorando: questo lavoro del cuore può ovviamente essere influenzato da fattori che poco o niente hanno a che fare con la performance atletica come il livello di stress, lo stato di riposo, l'idratazione del soggetto e la temperatura esterna. La frequenza cardiaca è un importante fattore che ha aiutato ed aiuta molti atleti negli anni ad ottenere miglioramenti, ma è solo uno dei tanti fattori da considerare in un quadro più ampio. La frequenza cardiaca andrà su sia se sono in uno stato d'ansia, sia di paura che di sforzo fisico. La potenza invece è il parametro che ci dice quanto effettivamente sto spingendo sui pedali, la risposta immediata alla domanda "quanto sto spingendo in questo momento?". Inoltre la relativa lentezza della frequenza cardiaca ad adattarsi allo sforzo la rende inutilizzabile per quegli sforzi brevi come possono essere allenamenti volti al miglioramento delle potenzialità anaerobiche. Con un power meter si ha la possibilità di confrontare le informazioni che si raccolgono oggi con quelle di ieri, della settimana scorsa, dell'anno scorso. Posso facilmente capire a che punto della preparazione mi trovo, all'interno del quadro generale della stagione. In questo modo si possono agevolmente fissare obiettivi realistici, riuscendo a capire quando effettivamente l'organismo ha bisogno di recupero ed evitando così situazioni di sovrallenamento. Un tracciato del power meter in gara può essere paragonato ad un filmato di una partita per un allenatore di calcio: dalla sua analisi si possono trarre molte informazioni utili per capire gli errori che si sono commessi in gara, individuare le fasi della gara dove si sono sprecate troppe energie inutili o viceversa capire dove non si è spinto abbastanza. La conoscenza dei propri punti di forza e dei propri punti di debolezza è molto importante nella focalizzazione dell'allenamento nella giusta direzione. La lettura dei dati in tempo reale invece può essere d'aiuto per

trovare la miglior posizione aerodinamica, di ottimizzarla e di guadagnare quindi alcuni watt.

L'uso del power meter nelle gare a cronometro dà all'atleta la possibilità di gestirsi conoscendo il suo potenziale ed evitando di spendere troppo nelle prime fasi o di arrivare ancora "troppo fresco" nelle fasi finali.

Con gli ultimi modelli di cicloergometro si può anche migliorare l'allenamento indoor: l'atleta esce fuori con il power meter, al suo ritorno scarica i dati nel cicloergometro ed in questo modo ricrea precisamente le condizioni di quel particolare percorso. L'allenamento indoor permette di concentrarsi ancora di più sul wattaggio prefissato come obiettivo, senza l'influenza dei fattori esterni che causano delle fluttuazioni nell'espressione di potenza (es. diversa pavimentazione, pedalare in gruppo ecc...).

3. Parametri fisiologici

3.1 La potenza aerobica : il VO₂max

Il consumo d'ossigeno dell'organismo cresce con l'aumento della richiesta metabolica. Ogni soggetto possiede un limite individuale di questo valore. Esso è rappresentato dal "massimo consumo d'ossigeno" o VO₂max che, essendo un flusso, è espresso in l/min. Dato che negli sport come la corsa o il ciclismo la massa del soggetto influenza questo valore, per poter standardizzare e quindi paragonare atleti di corporatura diversa, viene utile esprimere questo valore in ml·kg⁻¹·min⁻¹. La letteratura concorda nel ritenere questo valore come determinato in gran parte geneticamente, e allenabile solo per il 15-20%. Questo significa che per determinate discipline l'allenamento da solo, per quanto importante, non basta per portare un soggetto ad essere un atleta d'élite. Le limitazioni per quanto riguarda il consumo d'ossigeno possono essere a livello centrale o periferico. Tra le prime abbiamo:

- Capacità di assunzione dell'ossigeno (ventilazione polmonare e diffusione dell'O₂ dall'alveolo al capillare)
- Capacità di trasporto dell'ossigeno (legame dell'O₂ con l'emoglobina, quantità di emoglobina presente, capacità del cuore di pompare sangue ossigenato alla periferia)

Il fattore periferico invece è dovuto alla capacità di utilizzare l'ossigeno da parte delle cellule (capillarizzazione, diffusione dell'O₂ dal capillare al mitocondrio, capacità del mitocondrio di utilizzare l'O₂). Secondo uno studio^[8], il fattore che limita maggiormente il consumo d'ossigeno è la capacità di trasporto dell'ossigeno (70-75%) mentre gli altri fattori centrali e periferici influiscono per il 25-30%.

Nell'esecuzione di test incrementali con ergometri diversi, potremmo trovarci di fronte a valori di VO₂max leggermente diversi: in linea generale i valori che troviamo in test al treadmill sono leggermente più alti dei valori trovati al cicloergometro. Questa linea di tendenza però viene meno quando ci troviamo di fronte ad atleti professionisti nel podismo o nel ciclismo: avremo quindi valori più alti nel test il cui gesto corrisponde a quello abituale dell'atleta. E' conveniente

quindi introdurre il concetto di $VO_2\text{peak}$, il consumo d'ossigeno di picco per un determinato ergometro, che non necessariamente corrisponde al $VO_2\text{max}$.

3.2 Ventilazione polmonare VE

Per ventilazione polmonare VE intendiamo lo scambio di aria tra l'alveolo e l'ambiente. Essa sta ad indicare il volume di aria (in litri) scambiato tra l'organismo e l'esterno in un minuto. Possiamo considerare questo parametro come l'equivalente respiratorio della frequenza cardiaca.

$$VE = V_c \times F_{\text{resp}}$$

In questa formula V_c sta a rappresentare il volume corrente, ovvero la quantità di aria mobilizzata durante un atto respiratorio non forzato, e F_{resp} è la frequenza di atti respiratori in un minuto. Generalmente, a riposo, il valore di VE si aggira intorno ai $6\text{-}7 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$.

Durante l'attività sportiva la ventilazione è stimolata a causa della maggiore richiesta di O_2 e per l'aumento della necessità di eliminare CO_2 . In questo caso la ventilazione polmonare può aumentare anche fino a $150 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Questo incremento avviene sia a carico del volume corrente che a carico della frequenza respiratoria. Come vedremo più approfonditamente in seguito, nell'atleta allenato, rispetto al soggetto non allenato, la proporzione con la quale questi due valori contribuiscono all'aumento della VE, è diversa.

3.3 Soglia anaerobica

Per soglia anaerobica intendiamo il valore di VO_2 sopra il quale l'acido lattico inizia ad accumularsi nel sangue. Essa rappresenta teoricamente l'intensità massima di esercizio che si può protrarre senza ricorrere in modo determinante al metabolismo anaerobico lattacido. E' caratterizzata da un aumento del rapporto lattato/piruvato che riflette un rapporto non più proporzionale del lattato rispetto alla glicolisi nel momento in cui il pH del muscolo diminuisce.^[44]

Fino a questo valore, la produzione di lattato e il suo smaltimento sono in equilibrio. Ci sono diversi metodi per individuare la soglia anaerobica: uno dei più

usati è il cosiddetto V-Slope. Esso consiste nell'individuare nel tracciato dell'andamento della CO_2 espirata e dell'introduzione di O_2 , il punto nel quale il primo valore diventa più alto del secondo. Un altro metodo è quello degli equivalenti ventilatori: si individua il punto nel quale il rapporto VE/VO_2 incrementa mentre VE/VCO_2 resta lo stesso o diminuisce. Spesso in letteratura viene fatto coincidere con la concentrazione ematica di lattato pari 4mmol/l ma questo valore è molto discutibile e dipende da svariati fattori.

4. Fisiologia del ciclismo

4.1 La potenza aerobica del ciclista: il VO₂

Le possibilità di successo del ciclista possono essere “predeterminate” dall’analisi dei valori fisiologici dell’atleta in questione. Quali sono quindi i parametri importanti da considerare per allenatori, preparatori e fisiologi dell’esercizio nella valutazione di un ciclista? E’ dimostrato da diversi studi che il ciclista di alto livello possiede dei valori di VO₂max molto alti (circa 75mlO₂·kg⁻¹·min⁻¹) ed una soglia anaerobica corrispondente a circa il 90% di questo valore.^[10]

	MEDIA	DS	MIN	MAX
Età (anni)	28.8	3.6	24	35
Altezza (cm)	177.1	4.1	169	184
Massa (kg)	68.6	4.9	60	77
VO ₂ max (ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹)	73.7	4.19	67	83.5
AT (%VO ₂ max)	89.6	2.7	84.3	94.5

Tabella 1. Caratteristiche antropometriche e fisiologiche di ciclisti professionisti con partecipazioni alla Vuelta a Espana e al Tour de France (Fernandez – Garcia et al., 2000)

E’ dimostrato che la %VO₂max alla quale la soglia anaerobica si trova, è un notevole indicatore della reale performance tra atleti aventi simile potenza aerobica massima.^[6] Nonostante il VO₂max sia un parametro fondamentale nella valutazione di un atleta, esso rappresenta più un prerequisito all’attività di alto livello che un vero e proprio metro di paragone tra atleti. Infatti, i ciclisti d’elite hanno tutti un VO₂max molto simile, quello che li differenzia è la percentuale di esso alla quale fissiamo la soglia anaerobica: in uno studio, è stato rilevato che i ciclisti che primeggiano in gare come il Giro d’Italia, la Vuelta o il Tour de France, sono capaci di mantenere un’intensità submassimale intorno al 90% VO₂max per circa 60 minuti.^[26]

4.2 Potenza assoluta W - Potenza normalizzata W/kg

La massima potenza espressa W_{MAX} durante un test incrementale può essere usata per predire la performance.^[18] In questo studio si è trovato un significativo grado di correlazione tra la W_{MAX} ottenuta con test di laboratorio e la prestazione su una cronometro di 20km. In gare a cronometro che durano tra i 15 e i 60 minuti, l'intensità del passo è vicina ai valori di W_{OBLA} mentre nel resto delle tappe ci si trova spesso ad intensità comprese tra W_{LT} e W_{OBLA} .^[34] In letteratura troviamo un po' di confusione nel definire il primo parametro: è definita soglia aerobica "l'intensità di esercizio che provoca un aumento di 1mmol/L nella concentrazione ematica di lattato rispetto alla condizione di riposo".^[14]

E' importante tener conto non solo della potenza in senso assoluto ma anche relativo: per standardizzare e poter comparare ciclisti con corporature diverse si sono introdotti vari accorgimenti. Queste normalizzazioni sono state attuate per avere maggior corrispondenza tra i dati rilevati in laboratorio e l'accuratezza della previsione della prestazione in gara. In primo luogo troviamo il rapporto tra potenza erogata e kilogrammi di peso W/kg. Sui requisiti di potenza "richiesti" per considerare gli atleti come ciclisti d'élite i dati di letteratura sono in parte discordanti: secondo alcuni studi questo valore deve essere superiore a 5,5 W/Kg.^[36] Questo dato sembra essere però sottostimato in quanto atleti partecipanti alle gare più importanti mostrano rapporti decisamente superiori. Infatti, secondo i dati raccolti da Lucia et al. la potenza media espressa in competizioni come Giro, Tour e Vuelta si aggirano intorno ai 400W in un intervallo di 60 minuti, corrispondenti a circa 6 W/Kg.^[26] Questo dato è supportato dai valori emersi dall'analisi del record dell'ora stabilito da Indurain nel '94 in cui il valore medio di potenza era di ben 509,53W con un rapporto di 6,29 W/kg.^[35]

4.3 VE, pattern respiratori e fatica dei muscoli inspiratori

Rispetto alla popolazione normale, i ciclisti professionisti sembrano aver sviluppato un adattamento particolare per quanto riguarda la respirazione: ad alte intensità di lavoro, continuano comunque ad incrementare il volume corrente V_C a discapito della frequenza di atti respiratori.^[25] Probabilmente questo porta ad un

miglioramento dell'efficienza e del costo metabolico della respirazione che, nei soggetti allenati è quantificato intorno al 15% del VO_2max .^[15] Inoltre un miglioramento della respirazione migliorerebbe l'apporto di sangue ai muscoli che lavorano.^[15] In aggiunta, alcune ricerche suggeriscono che i muscoli inspiratori potrebbero configurarsi come potenziali fattori limitanti la prestazione.^[37] Un ambiente acido nei muscoli respiratori o la competizione tra essi e i muscoli locomotori per la distribuzione del flusso sanguigno, potrebbe contribuire alla fatica dei muscoli inspiratori dovuta ad esercizio intenso.^[20] Il solo allenamento sembra non essere in grado di fornire un allenamento adeguato ed è quindi consigliabile per affinare sempre più la performance del ciclista, proporre un programma d'allenamento specifico per questi muscoli per evitarne la fatica e migliorarne il recupero.^[37]

4.4 Contributo anaerobico

Durante la gara, il fabbisogno energetico è soddisfatto quasi esclusivamente dal meccanismo di produzione aerobico. Da non sottovalutare però, è l'importanza che la quota di energia prodotta dal sistema anaerobico ha sull'esito di una gara visto che sarà proprio a carico di questo meccanismo, la produzione di energia per i vari sprint e nella volata finale.

All'inizio di uno sprint, sia il sistema anaerobico alattacido che il lattacido sono completamente attivati. Come sappiamo, l'organismo non lavora a compartimenti stagni, quindi, in uno sprint di 30 secondi si è visto che il fabbisogno energetico è soddisfatto nelle seguenti misure da: ^[39,40,45]

- Glicolisi 50-55%
- Idrolisi PCr 23-29%
- Ossidazione 16-25%

In più, per una resintesi di ATP pari all'80-100% dei valori di riposo, il recupero dovrà essere tra i 2-4 minuti.^[16,38]

Questi dati sono molto importanti sia per i ciclisti che per gli allenatori in quanto sono alla base delle strategie di gara: sprintare al momento sbagliato (o troppo

presto o troppo tardi) porterà molto probabilmente un esito negativo ai fini del risultato.

4.5 Intensità dello sforzo in gara

Per essere in grado di pianificare programmi di allenamento adatti al ciclismo è fondamentale capire l'intensità e la tipologia di sforzo che viene effettuato dall'atleta. Fernandez – Garcia et al. ^[10] hanno suddiviso i valori di FC ottenuti nello studio, in quattro zone corrispondenti a diverse intensità d'esercizio. I valori di VO₂ e altri parametri metabolici erano stati presi 2 settimane prima delle gare (Vuelta e Tour) in test di laboratorio. Le zone sono:

- Recupero (<50% VO₂max)
- Aerobico moderato (50-70% VO₂max)
- Aerobico intenso (70-90% VO₂max)
- Anaerobico (>90 VO₂max)

	VUELTA A ESPANA	TOUR DE FRANCE
Recupero (min)	79.6	65.4
Aerobico moderato (min)	97.2	89.5
Aerobico intenso (min)	75.2	79.6
Anaerobico (min)	17.5	24.7
Totale (min)	269.5	259.2

Tabella 2. Tempo trascorso alle diverse intensità nella Vuelta e nel Tour (Fernandez – Garcia et al., 2000)

I risultati sono simili sia per la Vuelta che per il Tour. Nella Vuelta per 75 min/day il ciclista era nel range di sforzo “aerobico intenso”, per 97 min/day “aerobico moderato”, per 17 min/day in anaerobico, e per 80 min/day ad intensità di recupero. Nel Tour de France 79 min/day aerobico intenso, 89 min/day aerobico moderato, 24 min/day di sforzo anaerobico e 65 min/day di recupero.

	VUELTA A ESPANA	TOUR DE FRANCE
Recupero (%)	25.1	25.24

Aerobico moderato (%)	32.4	31.98
Aerobico intenso (%)	29.5	29.17
Anaerobico (%)	12.9	16.79

Tabella 3. Percentuale del tempo totale alle diverse intensità nella Vuelta e nel Tour (Fernandez – Garcia et al., 2000)

Inoltre in media, 93 minuti di gara in pianura e 123 di scalata al giorno sono percorsi ad intensità superiori al 70% VO_2max mentre 18 min/day per la pianura e 27 min/day per la montagna sono percorsi ad intensità superiori al 90% VO_2max . In linea generale, circa il 75% dello sforzo è prodotto a intensità superiori al 50%.

5. Fattori influenzanti la prestazione: analisi fisiologica

5.1 Attrito aerodinamico

Come vedremo in seguito più approfonditamente, la resistenza dell'aria è proporzionale al cubo della velocità: essa rappresenta quindi il fattore principale di dispendio energetico ad alte velocità. Essa rappresenta il 90% della resistenza totale per velocità superiori ai 30km/h.^[23] Per velocità superiori ai 50km/h diventa praticamente l'unico fattore determinante ai fini della prestazione.^[13-23]

Di conseguenza la configurazione della bicicletta e la posizione del ciclista ha ricevuto una notevole attenzione nel corso degli anni.

Il vantaggio dovuto ad una ridotta area frontale è ben noto.^[4] In una ideale ed ipotetica condizione di assenza di resistenza dell'aria però, assumere una posizione estremamente aerodinamica sarebbe svantaggioso: il costo metabolico per proseguire alla stessa velocità aumenterebbe, comportando un aumento significativo del consumo d'ossigeno, della frequenza cardiaca e della frequenza respiratoria.^[12] Nello specifico si avrebbe un aumento del costo metabolico di circa 37W e una perdita di efficienza del 3%.^[12] Questo aumento è però compensato nella realtà dai vantaggi prodotti dall'assunzione di una posizione più aerodinamica. Quantitativamente, si ottiene un 20% di riduzione della resistenza dell'aria passando da una posizione con busto eretto e braccia tese ad una posizione con mani intorno ai freni, ed un ulteriore 10-17% assumendo una posizione totalmente aerodinamica.^[4-22] In totale abbiamo una riduzione del 30-35% della resistenza dell'aria. Per questi motivi, conoscere l'area frontale A_f del ciclista è di fondamentale importanza. Le modalità per stimare la A_f sono molteplici, tra le più utilizzate c'è l'equazione di Bassett:^[2]

$$A_f = 0,0293H^{0,725} \cdot M^{0,425} + 0,0604$$

La A_f del soggetto è calcolata partendo dalla sua altezza H , dalla sua massa M e considerando che sia in posizione aerodinamica. La A_f è generalmente il 18% circa della superficie corporea totale.^[2] La A_f è sempre una frazione costante della superficie corporea totale A_{ct} . La superficie corporea è una grandezza presente su due dimensioni mentre il volume corporeo su tre. Segue quindi che soggetti con un importante volume corporeo, avranno una minore A_f per unità di massa

rispetto a soggetti più piccoli. Quindi, i ciclisti più “possenti” avranno una minore spesa energetica per unità di massa ad una data velocità rispetto ai ciclisti più leggeri, o viceversa a parità di spesa energetica raggiungeranno una velocità maggiore. Questa considerazione è fatta esclusivamente considerando il fattore aerodinamico e mettendo da parte la pendenza del terreno o altri fattori. Data l'importanza della resistenza dell'aria, l'abilità di stare a ruota riveste un ruolo determinante in termini di costo energetico: riducendosi drasticamente la principale forza che si oppone al moto, si ha un risparmio energetico di circa il 40%.^[30] Analizzando singolarmente i parametri, viaggiando a 39.5 km/h, si ha una riduzione del 14% del VO_2 , 7,5% nella FC, 31% nella VE.^[17] Inoltre i vantaggi a livello metabolico aumentano con l'aumentare della velocità.^[32] La resistenza dell'aria quando si pedala in gruppo è ridotta del 40%.^[32] Questi fattori sono importanti dal punto di vista strategico, infatti i favoriti per la vittoria delle gare decidono di stare in gruppo poiché ciò permette loro di risparmiare energia per le importanti fasi impegnative della gara o competizione, come ad esempio le tappe di montagna.

5.2 Attrito volvente

Un'altra variabile di grande rilievo è l'attrito volvente. Più è grande l'area di contatto tra ruota e terreno, più l'attrito sarà alto. Questo porta a capire il perché della differenziazione tra pneumatici da strada, pneumatici da sterrato ed altri. L'attrito volvente, in condizioni di bassa velocità e di assenza di vento, può influenzare l'espressione di potenza più dell'attrito aerodinamico.^[9] Le più importanti caratteristiche che determinano l'attrito volvente sono:

- Diametro della ruota – in rapporto di proporzionalità inversa con l'attrito volvente, ruote piccole opporranno più resistenza al moto
- Tipo di gomma – con gomme diverse, a parità di potenza erogata avremo velocità diverse
- Pressione della gomma – più alta è la pressione più bassa sarà la resistenza
- Tipo di superficie della pavimentazione
- Componenti meccaniche della bici – trasmissione, cuscinetti ecc..

5.3 Pendenza del terreno

Si è detto precedentemente che in pianura, il ciclista più possente fisicamente ha un vantaggio rispetto al ciclista più piccolo in termini di costo energetico, considerando solamente la resistenza dell'aria. In condizioni di salita o di discesa il problema assume altre sfaccettature. In salita, la resistenza dell'aria è minore dato che l'andatura è più lenta, di conseguenza la prima forza da contrastare è quella di gravità. La forza di gravità è proporzionale alla massa di ciclista più bicicletta: la massa della bici però ha un'influenza minore sul totale nel caso di un ciclista più pesante (12% e 17% rispettivamente).^[41] Assumendo questo, sembrerebbe che quindi il ciclista più pesante sia ancora una volta avvantaggiato in termini di costo energetico per unità di massa. In realtà non è così, poiché i ciclisti più leggeri durante la scalata hanno un vantaggio dato dal consumo d'ossigeno relativo alla massa corporea che va a compensare lo svantaggio dato dal costo energetico.^[42] In discesa, ancora una volta il ciclista più pesante sarà avvantaggiato visto che la forza di gravità che lo spinge in basso è proporzionale alla massa.^[42] In realtà però questi ultimi non riescono a recuperare nei tratti di discesa lo svantaggio accumulato in salita, quindi possiamo dire che generalmente, i ciclisti più leggeri (scalatori) sono avvantaggiati nelle tappe di montagna, al contrario dei velocisti che sono avvantaggiati in pianura.

5.4 Efficienza ed economia del gesto

Per efficienza intendiamo la percentuale di energia totale volta a produrre lavoro esterno.^[33] L'economia del gesto è definita come la percentuale di VO_2 max necessaria per sostenere un determinato lavoro meccanico.^[5]

In ciclisti professionisti, l'aumento di VO_2 durante esercizio incrementale, tende a diminuire man mano che ci si avvicina a carichi di lavoro importanti.^[28] E' stato notato che l'efficienza meccanica nello stesso momento tende ad aumentare. Questo è probabilmente dovuto all'elevato volume di allenamento che essi sostengono durante l'anno, che rende le unità motorie più resistenti alla fatica ad alte intensità submassimali.^[29] Anche l'aumento di fibre rosse nel vasto laterale sembra poter essere una delle cause del minore costo energetico a queste

intensità.^[19] Tra le altre cause che influenzano l'efficienza sono frequenza di pedalata,^[5] e fattori genetici.^[3]

I ciclisti d'élite mostrano una economia e una efficienza più elevata rispetto agli amatori.^[29] Un valore importante di questi parametri potrebbe compensare un valore relativamente basso di VO₂max^[29] Per questo è importante ai fini della valutazione di un ciclista, tenere in considerazione la sua efficienza.

5.5 Frequenza di pedalata

La frequenza o cadenza di pedalata è un fattore importante per la performance ma in letteratura c'è molta discordanza su quali siano i criteri per determinare la scelta della frequenza da utilizzare nelle diverse circostanze. La cadenza di pedalata influenza il reclutamento delle fibre muscolari:^[1] passando da una situazione di pedalata a 50rpm ad una a 100rpm, verranno progressivamente reclutate sempre meno fibre veloci.^[1] Questo è dovuto alla riduzione di forza muscolare necessaria a produrre 1rpm che viene applicata ad alte frequenze. Il fattore discriminante per il reclutamento di fibre diverse è la forza applicata al pedale e non la velocità di contrazione^[1] come magari si può essere indotti a pensare: una cadenza di 100rpm non è troppo alta per le fibre lente per contribuire al mantenimento della velocità. Ad alte velocità, il ciclista minimizza il reclutamento di fibre veloci mantenendo un'alta frequenza con bassa resistenza.

In una situazione di pedalata a 80rpm, le fibre di tipo I del vasto laterale, si contraggono ad una velocità più vicina alla quella corrispondente al loro picco di efficienza rispetto alle fibre di tipo II.^[7] Di conseguenza un atleta che possiede un pool di fibre prevalentemente di tipo I sarà più efficiente: presenterà quindi un VO₂ minore ad una data potenza. La percentuale di fibre rosse mostra una stretta correlazione con gli anni di allenamento.^[7] Inoltre in base ad altri studi la riduzione di efficienza susseguente ad uno sforzo prolungato nel tempo è dipendente da fattori centrali e periferici ma non dalla frequenza di pedalata.^[25] In uno studio condotto da Lucia et al. sono state analizzate diverse variabili come VO₂, FC, lattato, pH, VE e GE (gross efficiency), a tre diverse cadenze: 60rpm, 80rpm e 100rpm. Il risultato è che all'aumentare della frequenza aumenta l'efficienza e

diminuiscono le altre variabili.^[28] L'aumento dell'economia del gesto è una delle motivazioni per le quali i ciclisti d'élite tendono a utilizzare frequenze di pedalata alte, sopra i 90rpm.^[12] Relativamente al VO_2 , la frequenza ottimale aumenta linearmente dai 40rpm a 100W agli 80rpm ai 300W.^[5]

Un interessante ricerca dal punto di vista pratico è quella che ha preso in considerazione le frequenze di ciclisti professionisti durante competizioni quali Giro, Vuelta e Tour.^[32] La frequenza e la velocità media sono significativamente inferiori nelle tappe di montagna con pendenza del 7,2% (~70rpm) rispetto a tratti in pianura e a cronometro (~90rpm). I ciclisti più pesanti utilizzavano cadenze di 80-90 rpm dove i ciclisti leggeri utilizzavano 90-100rpm. La frequenza media più alta è stata osservata in tratti lunghi e pianeggianti a velocità superiori ai 40km/h ed era di 126rpm. I migliori scalatori avevano una frequenza media di ~80rpm, con il risultato individuale più meritevole di attenzione di 92rpm di media. Il migliore nelle cronometro invece utilizzava una cadenza di 96rpm. La scelta di cadenze >90rpm sembra essere una delle determinanti del successo nelle prove a cronometro.

6. Fattori influenzanti la prestazione: analisi fisicomeccanica

6.1 Lavoro e costo energetico del ciclismo

Se consideriamo una situazione di pedalata a velocità costante e in pianura, il lavoro meccanico W_c sarà svolto essenzialmente contro: l'attrito volvente e contro la resistenza dell'aria (van Ingen Schenau & Cavanagh, 1990). Il primo sarà ottenuto dalla somma della resistenza offerta dalle ruote più la perdita per attrito nei cuscinetti del mozzo e nella trasmissione. Avremo quindi:

$$W_c = a + b \cdot v^2$$

Con:

W_c = lavoro meccanico per unità di distanza

v = velocità dell'aria per condizioni prestabilite

a = costante relativa all'attrito volvente

b = costante relativa all'attrito aerodinamico

L'energia metabolica spesa dipenderà dall'efficienza η del ciclismo.

$$C_c = W_c \cdot \eta^{-1} \rightarrow C_c = (a + b \cdot v^2) \cdot \eta^{-1}$$

Oppure stabilendo $\alpha = a \cdot \eta^{-1}$ e $\beta = b \cdot \eta^{-1}$ avremo

$$C_c = \alpha + \beta \cdot v^2$$

Con:

C_c = costo energetico del ciclismo per unità di distanza

α = energia metabolica spesa per unità di distanza per contrastare l'attrito volvente

β = energia metabolica spesa per unità di distanza per contrastare l'attrito aerodinamico

La costante α è indipendente dalla velocità ed è data principalmente dalle caratteristiche della gomma (misura, tipo e pressione) e dalle caratteristiche fisiche del terreno.

Il termine β , sotto determinate condizioni aerodinamiche, è costante.

La potenza meccanica P_c (o metabolica E_c) richiesta per procedere a velocità costante sarà data dal prodotto di W_c (o E_c) per la velocità stessa. Semplificando, in assenza di vento quindi con $v = s$, avremo:

$$P_c = W_c \cdot s \rightarrow a \cdot s + b \cdot s^3$$

$$E_c = C_c \cdot s \rightarrow \alpha \cdot s + \beta \cdot s^3$$

Essendo W_c e C_c espressi in $J \cdot m^{-1}$ e s in $m \cdot s^{-1}$ il risultato verrà fuori in $J \cdot s^{-1}$ ovvero in Watt.

Per quanto riguarda la potenza metabolica C_c potrebbe essere comodo applicare una trasformazione da Watt in $mlO_2 \cdot min^{-1}$ che è l'unità di misura convenzionale per questo parametro.

Per ricavare i termini a , b , α , β sono stati teorizzati e sperimentati diversi metodi che richiedono mezzi o spazi non facilmente reperibili (Capelli et al. 1993, Di Prampero et al. 1979, Davies 1980, Pugh, 1974). Altri ricercatori hanno sperimentato tecniche con approccio diverso e riproducibili più facilmente su corte distanze (Candau et al. 1999).

6.2 Attrito aerodinamico

Le costanti b e β (relative alla resistenza dell'aria) sono proporzionali a C_d , A_f e ρ_a .

$$b = 0,5 C_d \cdot A_f \cdot \rho_a$$

$$B = b \cdot n^{-1} \rightarrow 0,5 C_d \cdot A_f \cdot \rho_a \cdot n^{-1}$$

ρ_a è dipendente da ρ_b e dalla temperatura T

$$\rho_a = \rho_0 \cdot 0,359 \rho_b \cdot T^{-1}$$

Con ρ_0 a rappresentare la densità dell'aria sul livello del mare (a 760mmHg e 273K di temperatura) **WEAst 1989** e il coefficiente 0,359 dato dal rapporto tra

273/760. Un fattore che influisce sulla p_a è l'umidità dell'aria ma è considerato trascurabile. Ogni cambio in A_f , C_d o dell'altitudine portano a variazioni nel costo energetico per una data velocità o viceversa a velocità diverse per una data potenza metabolica.

6.3 Attrito volvente

La perdita per attrito nei cuscinetti del mozzo e nella trasmissione nelle nuove bici è irrilevante. **Kyle 86** L'attrito volvente è indipendente dalla velocità ed è proporzionale alla massa del ciclista più la bici. Può essere comodo indicare la resistenza data dall'attrito volvente come "coefficiente d'attrito volvente", indicando quest'ultimo come il rapporto tra l'attrito stesso e la massa complessiva. La costante α può essere calcolata dai valori in tabella se la massa è nota. Inoltre quando abbiamo a disposizione la formula contenente α , e quest'ultima è incognita, possiamo ricavarla dalla formula contenente a , ($\alpha = a \cdot \eta^{-1}$), assumendo un valore di efficienza tra 0,23 e 0,25. In questo modo siamo sicuri di non commettere un errore grossolano.

6.4 Pendenza del terreno

Quando si procede in salita, bisogna considerare il lavoro meccanico effettuato contro la forza di gravità. Quando espresso per unità di distanza, esso è dato da:

$$W_{cg} = mgh \cdot d^{-1}$$

Sapendo che $h = d \cdot \sin\gamma$ (con γ = angolo tra la strada e il piano orizzontale) avremo:

$$W_c = mg \cdot d^{-1} \cdot d \sin\gamma \rightarrow W_c = mg \sin\gamma$$

Integrando l'equazione (1) quindi avremo:

$$W_c = a + b \cdot s^2 + mgsin\gamma$$

Per tratti in discesa il terzo termine sarà negativo e rappresenta l'energia resa disponibile dalla gravità che può essere utilizzata per contrastare le altre forze che si oppongono al moto. Questa formula ci può essere utile per calcolare la velocità di un ciclista in una discesa in cui egli non pedala. Sapendo peso, altezza e inclinazione ricaviamo a e b dalla tabella **precedente**, sappiamo che il lavoro $W_c=0$, basterà quindi risolvere per s. Il costo energetico e la potenza metabolica in equazione 2 e 3 saranno:

$$C_c = \alpha + \beta \cdot s^2 + mgsin\gamma \cdot n^{-1}$$

$$E_c = C_c \cdot s \rightarrow \alpha \cdot s + \beta \cdot s^3 + mgsin\gamma \cdot n^{-1}$$

Quest'ultima equazione può essere utilizzata per calcolare la massima pendenza che un ciclista può scalare: bisogna avere un valore di velocità minimo che consenta l'equilibrio da attribuire al termine s e la E_c del soggetto.

6.5 Efficienza e frequenza di pedalata

L'efficienza del ciclismo è in stretta correlazione con la frequenza di pedalata. I dati da diverse ricerche, mostrano che la frequenza di pedalata ottimale cresce da circa 40rpm a 60rpm quando la potenza metabolica è aumentata da 50W a 300W e che il valore di efficienza corrispondente al valore di frequenza è molto vicino allo 0,25. Di Prampero Inoltre, per variazioni relativamente grandi di F_p , il valore di η si discosta solo leggermente da 0,25. Come possiamo vedere dal grafico, ad alti valori di P_c , la connessione tra η e F_p è quasi piatta. Questo ci aiuta a comprendere l'osservazione che durante le competizioni, la F_p è più alta di quella che produce la η ottimale. Di Prampero La riduzione delle forze applicate ai pedali derivanti dall'utilizzo di frequenze di pedalata più alte delle ottimali, porterebbe ad una diminuzione del contributo anaerobico, che va a compensare la piccola perdita in efficienza. Di Prampero

7. Strumenti per misurare la potenza

Attualmente sul mercato sono disponibili vari power meter che differiscono tra loro per metodo utilizzato per la rilevazione dei dati, affidabilità, e prezzo.

7.1. SRM

L'SRM è al momento considerato il “gold standard” per quanto riguarda la misurazione della potenza. Dalla sua prima comparsa sulle scene è stato progressivamente migliorato e testato fino a diventare metro di paragone quando si vuole testare l'attendibilità e validità di un altro potenziometro.

Esso è formato da una serie di estensimetri* che possono essere 4, 8 o 20 a seconda del modello, posti in un piatto che contiene anche la parte elettronica del sistema. Il piatto è posizionato all'interno del “ragno” del pedale, tra la leva e la corona. La forza applicata dal ciclista quindi, produrrà una torsione all'interno del piatto e gli estensimetri* misureranno la deformazione dalla condizione normale, trasformando quest'ultima in segnale elettrico proporzionalmente alla spinta. La potenza è quindi calcolata moltiplicando la torque generata per la velocità angolare (nota grazie a un sensore che misura la frequenza di pedalata).

$$W = T \times V_a$$

Il ciclista legge in tempo reale la potenza alla quale sta spingendo tramite un dispositivo installato sul manubrio della bici che oltre a presentare i dati misurati in tempo reale sul display, memorizza le attività svolte dall'utente. L'installazione del potenziometro sulle moderne bici è estremamente facile e non richiede particolari attrezzature. Essendo fatto di metallo, eventuali problemi potrebbero derivare da sbalzi di temperatura tra l'interno e l'esterno che, modificando le proprietà fisiche dello strumento falserebbero le rilevazioni. E' consigliato quindi lasciare la bici per alcuni minuti alla temperatura esterna per far adattare gli strumenti sensibili alla nuova temperatura.

* *Strumenti che misurano piccole deformazioni quando un corpo è soggetto a sollecitazione meccanica.*

Rispetto al passato, i costi dei nuovi modelli sono decisamente calati, pur restando molto elevati rispetto agli altri potenziometri sul mercato. Questo fa sì che lo strumento non sia alla portata di tutti.

7.2 PowerTap

I principi di funzionamento del PowerTap sono molto simili a quelli dell'SRM, con una sostanziale differenza: il potenziometro è alloggiato all'interno del mozzo della ruota posteriore. La forza applicata dal ciclista si trasferisce tramite il movimento della catena intorno al pignone, causando leggere torsioni all'interno del mozzo stesso. La torque applicata è quindi trasformata in potenza dal PowerTap. Considerando che la misurazione viene effettuata al mozzo, subendo quindi un passaggio in più (dal pedale tramite la trasmissione) il risultato che ci darà il PT sarà di un 2-4% inferiore a quello dell'SRM, dovuto appunto alla dissipazione tramite l'attrito della catena.

Il prezzo di mercato è competitivo e ciò rende il PowerTap una delle migliori scelte in fatto di rapporto qualità/prezzo.

7.3 Polar Electro

Lo strumento della Polar utilizza un metodo diverso rispetto agli altri: attraverso un sensore montato sulla catena, viene misurata la tensione di quest'ultima misurando la frequenza delle sue vibrazioni. Quanto più la tensione aumenta, tanto più velocemente vibrerà la catena. Viene quindi trasformata questa frequenza in forza e moltiplicata con la velocità della catena stessa, misurata da un altro sensore posto sulla gabbia del cambio. Avremo quindi:

$$W = T_{catena} \cdot V_{catena}$$

Il posizionamento dei sensori è una delle discriminanti per la buona riuscita della misurazione e questo non sempre risulta facile. Inoltre dato che un sensore è installato sulla gabbia del cambio, alcune piccole parti potrebbero facilmente finire

nei pressi degli ingranaggi della trasmissione e rompersi. Tra i pro di questo apparecchio c'è sicuramente la qualità del cardiofrequenzimetro di cui è dotato, considerato che la Polar è uno dei marchi leader del settore. Il prezzo di mercato lo rende accessibile ad un più vasto pubblico rispetto ai due precedenti.

7.4 Newton iBike

Gli sviluppatori dell'iBike Newton hanno voluto percorrere una strada alternativa rispetto al resto dei produttori. Il risultato dal punto di vista fisico e ingegneristico è molto interessante. Partendo dalla terza legge di Newton, per la quale ad ogni forza applicata da un corpo su un altro, ne corrisponde una uguale e contraria, essi si sono adoperati per stimare la potenza espressa dal ciclista, calcolando i termini a destra nell'equazione:

$$W = F \cdot v$$

Nella fattispecie secondo Martin (Martin et al.1998)

$$W_{TOT} = \frac{W_{GRAV} + W_{AIR} + W_{ROLL} + W_{BEAR} + W_{KIN}}{e_c}$$

Nella quale:

W_{GRAV} = Potenza utilizzata contro la forza di gravità

W_{AIR} = Potenza utilizzata contro la resistenza dell'aria

W_{ROLL} = Potenza utilizzata contro la resistenza del terreno

W_{BEAR} = Potenza persa nei cuscinetti della bici

W_{KIN} = Potenza relativa ai cambiamenti di energia cinetica

e_c = Fattore di efficienza della trasmissione

Questo è possibile grazie a diversi sensori posizionati all'interno del dispositivo che va ad essere installato sul manubrio della bici. Essi riescono a rilevare e quantificare tramite elaborati calcoli matematici le forze che si oppongono al moto affinché il ciclista si muova alla velocità rilevata. Vengono quindi prese in considerazione le forze d'attrito aerodinamico e volvente e la forza per imprimere accelerazione (sia sul piano orizzontale, per traslare, che sul piano "verticale" per affrontare salite o discese). Il componente principale dell'apparecchio è composto dall'hardware centrale sul quale è posto anche il display che ci mostra in tempo

reale le misurazioni, ed una presa per il vento: quest'ultima è la porta di ingresso dell'aria di un tubo di Pitot* che viene utilizzato per rilevare la pressione dell'aria. Altre grandezze direttamente misurate sono la temperatura e le accelerazioni. Da questi dati è quindi possibile ricavare l'altimetria, la velocità del vento e la pendenza. I dati che vanno inseriti nelle impostazioni del dispositivo sono: circonferenza della ruota e il peso totale di ciclista più bicicletta. Inoltre per stimare l'attrito aerodinamico bisogna inserire altezza e peso del ciclista più la posizione che si assume in bici per più tempo. Vanno quindi effettuate le due principali calibrazioni:

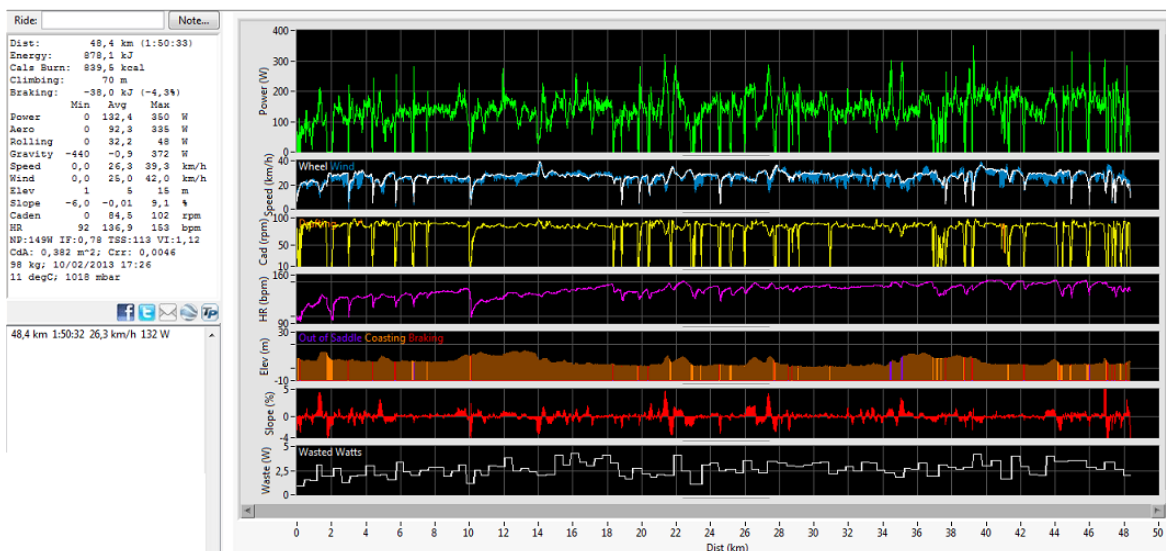
- WIND CAL – calibrazione dello zero del vento
- TILT CAL – calibrazione della pendenza grazie all'accelerometro

Lo step successivo è quello di effettuare il “Calibration ride” ovvero un giro di 3,2km nel quale il ciclista percorre 1,6km su una strada possibilmente sgombra, e ritorna al punto d'inizio. Questa procedura serve per rendere più precisi calcoli e stime di vento, pendenza e fattori d'attrito. Per affinare ancora di più questi valori si può effettuare la prova di “coast-down” multipli, ovvero smettere di pedalare in un determinato momento e il dispositivo in base alla decelerazione migliora questi valori.

L'unico sensore che è posto al di fuori del dispositivo, è posizionato sulla forcella posteriore (lato sinistro) ed è quello che permette al computer di ricavare la velocità di crociera e la frequenza di pedalata. Esso funziona tramite due componenti centrali e due magneti. Il primo magnete va posizionato sul pedale in modo che ad ogni rotazione esso passi davanti al sensore. Stesso principio vale per il sensore della velocità, posizionando il magnete su uno dei raggi della ruota. (INSERIRE IMMAGINI) Uno dei vantaggi dell'iBike rispetto ad altri è l'estrema facilità di spostamento da una bici ad un'altra. Mentre gli altri dispositivi sono montati all'interno del mozzo o del ragno dei pedali, nell'iBike la parte che riceve gli input e la parte che ci mostra l'output sono la stessa cosa. Inoltre, la possibilità di contenere più profili preimpostati, rende l'apparecchio condivisibile anche tra più atleti all'interno di una squadra. Un altro prodotto della linea iBike Newton è il “PowerStroke”: esso permette di aumentare la frequenza di campionamento dei dati fino a 16 volte in un secondo. La massa del ciclista (molto più elevata di quella della bici) fa sì che quest'ultima si muova durante la pedalata. Il potenziometro

riesce quindi a misurare la potenza “sprecata” in tutti i punti della pedalata, ovvero quella quota della potenza che non contribuisce all’avanzamento. Questo avviene perché sebbene i piedi siano forzati a muoversi in cerchio, non vuol dire che essi siano effettivamente spinti in cerchi perfetti. Siamo ovviamente parlando di pochi Watt di potenza, ma che nell’arco di competizioni lunghe potrebbero leggermente inficiare la performance. E’ quindi anche questo un fattore da tener conto quando si tratta di ciclismo d’elite. L’ultimo cenno da fare rispetto all’iBike è il suo software che permette all’utente di interfacciarsi col dispositivo, chiamato Isaac. Questo strumento ha potenzialità enormi, poiché oltre alla semplice funzione di mostrare chiaramente tutti i vari parametri che interessano, possiede innumerevoli funzioni che permettono di editare a piacimento il file in post produzione: si possono cambiare manualmente i valori relativi all’atleta, al terreno, al vento, all’elevazione e quant’altro, al fine di rendere più precise le rilevazioni. Un’altra importante funzione è quella del “Power meter comparison” che permette di confrontare due power meter installati sulla stessa bici.

Un file, nell’Isaac si presenta così:



E’ possibile utilizzare la funzione smoothing per aumentare o diminuire il tempo tra le misurazioni: se mettiamo uno smoothing di 30 secondi ad esempio, sarà fatta una media di questo periodo. Più basso è lo smoothing più precise saranno le misurazioni e più ampie le oscillazioni.

Nel primo grafico vediamo l'andamento della potenza. Nel secondo grafico è presente la velocità: la linea in bianco rappresenta la velocità di crociera, la parte in blu invece è la velocità del vento rispetto alla bici. Se la velocità del vento supera quella della bici il vento sarà "di coda", se invece è inferiore si tratta di vento frontale. Nel terzo riquadro, in giallo è mostrata la frequenza di pedalata; le parti in arancione sono quelle di "drafting", quando l'atleta è in gruppo o comunque sta procedendo in scia di qualcuno.

Il quarto tracciato è quello della frequenza cardiaca, nel caso sia collegato all'iBike anche un cardiofrequenzimetro. Il grafico dell'elevazione nel quinto riquadro merita attenzioni: oltre all'elevazione infatti sono mostrati i tratti in cui l'atleta frena (braking, rosso), non sta pedalando (coasting, in arancione più chiaro) o è in piedi sui pedali (out of saddle, viola). Quest'ultima insieme al grafico dei wasted watts (settimo riquadro) è disponibile se si possiede Newton PowerStroke. Il sesto riquadro rappresenta la pendenza della strada.

Sulla sinistra troviamo la tabella che ci mostra per settori o nel complessivo i vari dati appena citati più i dati ambientali. Interessante la suddivisione della potenza espressa in potenza espressa contro la resistenza dell'aria, del terreno e della gravità.

8. Analisi sperimentale

8.1 Introduzione

In questa parte della tesi sono state effettuate delle analisi e delle considerazioni su alcuni aspetti applicativi riguardanti l'uso della potenza nel ciclismo. Il tracciato, ad un occhio esperto che sia in grado di leggerlo, fornisce una quantità di dati ragguardevole. Per queste analisi si è fatto affidamento sul power meter Newton iBike, sia per la mole di dati che esso registra (capace di dare un quadro completo) sia per la voglia di mettere alla prova questo strumento molto particolare dal punto di vista ingegneristico. Lo studio è stato fatto su due tappe molto diverse tra loro, che richiedono un tipo di sforzo completamente differente: una è una tappa a cronometro individuale, nella quale non esistono strategie di squadra ed è di breve durata. L'altra è una tappa molto lunga, formata da un lungo tratto pianeggiante che termina in una salita importante. A differenza del primo tipo, in questo genere di tappe è necessario considerare anche il fattore strategico dello stare in gruppo o essere in fuga. Si effettuerà un confronto tra i diversi atleti in funzione del loro piazzamento finale, ma anche un confronto con la letteratura. E' necessaria una puntualizzazione: a causa di vari fattori non è stato possibile standardizzare il periodo dei test di laboratorio, che sono quindi stati effettuati in periodi diversi. I valori registrati, hanno probabilmente subito delle variazioni dal momento del test, al periodo in cui il Giro d'Italia ha avuto luogo.

8.2 Materiali, metodi e protocollo

Nel test di laboratorio sono stati testati 7 ciclisti professionisti che hanno partecipato al Giro d'Italia 2014. In questa tesi però ci focalizzeremo su quattro atleti, dei quali abbiamo raccolto i dati di potenza nelle tappe che a noi interessavano per la nostra analisi. I test di laboratorio di tipo incrementale sono stati condotti montando la bici personale del ciclista su dei rulli Elite RealAxiom (Elite, Fontaniva, Italy). La potenza è stata misurata con PowerTap Pro (CycleOps, Madison, USA). Il $VO_2\max$ è stato misurato tramite Cortex Metalyzer

3B (Cortex, Lipsia, Germania). Si è chiesto al ciclista di mantenere una frequenza di pedalata costante a 90rpm. Gli step prima dell'incremento del carico erano di 2 minuti. Dopo aver prelevato il lattato a riposo con un misuratore di lattato Lactate Pro (Arkray, Kyoto, Japan) si iniziava a prelevare il lattato dal 5° step in poi. Per l'analisi e confronto dei risultati di gara è stato usato il software Isaac scaricabile dal sito ufficiale dell'iBike.

Le caratteristiche antropometriche dei soggetti erano le seguenti:

	A1	A2	A3	A4	MEDIA±DS
Età (anni)	26	25	28	27	26,5±1,3
Massa (kg)	59	61	57	64	60,2±3
Altezza (cm)	170	173	167	175	171±3
BMI (kg/ m ²)	20	20	20	21	20,2±0,5
M.grassa (%)	4.4	3.8	4.0	3.7	3,97±0,3

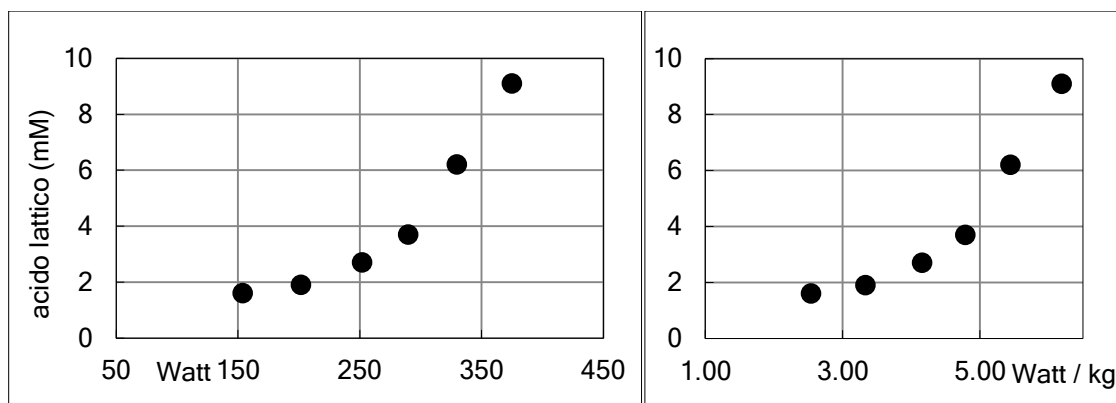
Tabella 4. Caratteristiche antropometriche dei ciclisti facenti parte dell'analisi. A = Atleta

Dal test di laboratorio abbiamo ricavato i seguenti valori:

	A1	A2	A3	A4	MEDIA±DS
W_{max} (W)	387	375	388	391	385,2±7,04
W_{max} (W/kg)	6,5	6,2	6,7	6,1	6,38±0,27
VO_{2max} (l/min)	4,7	5,1	4,3	5	4,77±0,36
VO_{2max} (ml/kg/min)	80	85	75	78	79,5±4,2
FC_{max} (bpm)	189	197	186	188	190±5
La_{max} (mmol)	6,8	9,1	12,2	8	9,0±2,3
W_{OBLA} (W)	305	290	322	331	312±18
W_{OBLA} (W/kg)	5,1	4,8	5,6	5,2	5,17±0,3
VO_{2OBLA} (l/min)	3,5	4,2	3,7	4,5	3,97±0,45
VO_{2OBLA} (ml/kg/min)	59	70	64	70	65,7±5,3
HR_{OBLA} (bpm)	168	180	170	175	173±5
La_{OBLA} (mmol)	4	3,7	5,2	3,1	4±0,9

Tabella 5. Caratteristiche fisiologiche dei ciclisti derivanti dal test incrementale. A = Atleta

Si sono costruite quindi le curve del lattato per ogni atleta in base alle tabelle con tutte le rilevazioni del test incrementale.

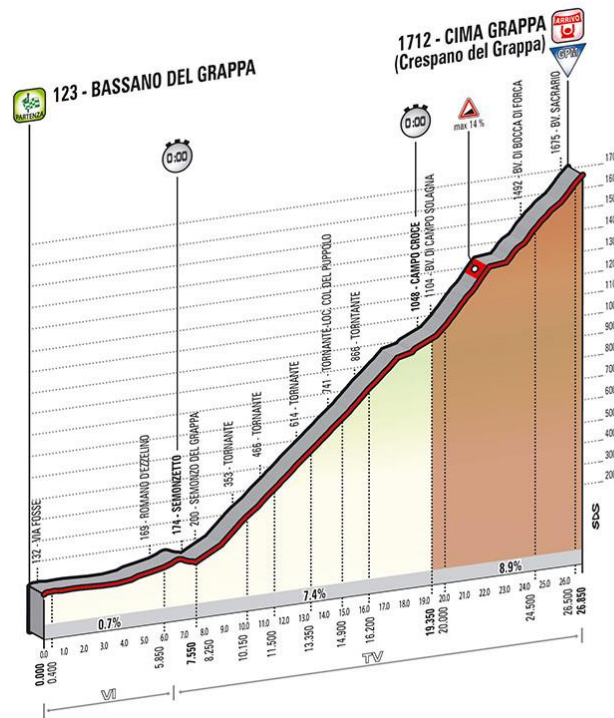


W	W/kg	mmol	ml/min/kg	FC
40	0,66		24,0	100
79	1,30		29,0	111
106	1,75		33,0	117
118	1,95		36,0	120
154	2,54	1,6	43,0	132
202	3,33	1,9	53,0	151
252	4,16	2,7	62,0	168
290	4,79	3,7	70,0	180
330	5,45	6,2	77,0	189
375	6,19	9,1	85,0	197

8.3 Risultati e discussione

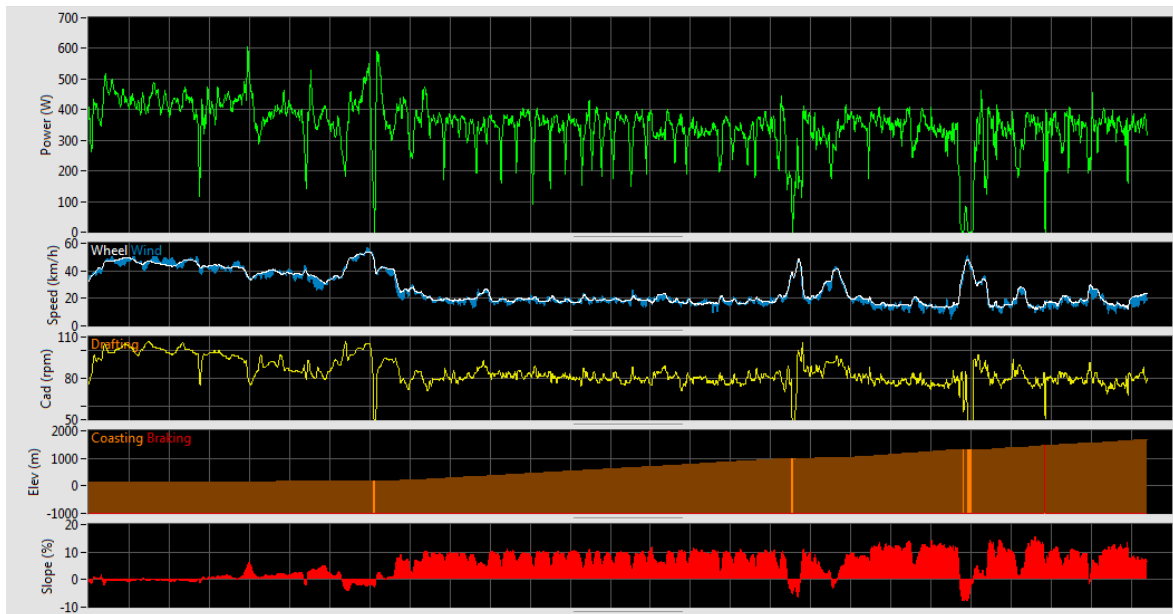
La prima analisi che si è svolta, prende in considerazione una tappa del Giro d'Italia 2014 per effettuare un confronto tra due atleti che hanno ottenuto un piazzamento diverso, tenendo presente quello che la letteratura ci dice. L'atleta 1 ha concluso la tappa nei primi 20, l'atleta 2 di non molto fuori dai primi 100. La tappa analizzata è la 19°esima, la cronoscalata individuale Bassano del Grappa – Cima Montegrappa. E' una tappa lunga 26,8 km con un dislivello tra il punto di partenza e quello di arrivo di 1598m. Dopo 7,5km inizia la salita: essa ha una pendenza media di 8% con un massimo di 14% a pochi km dalla fine. All'arrivo i due ciclisti avevano un distacco tra loro di 5'34".

MONTE GRAPPA (salita)
 Lunghezza: km 19.300
 Disl.: m 1538
 Pend.med.: 8.0 %
 Pend.max: 14 %

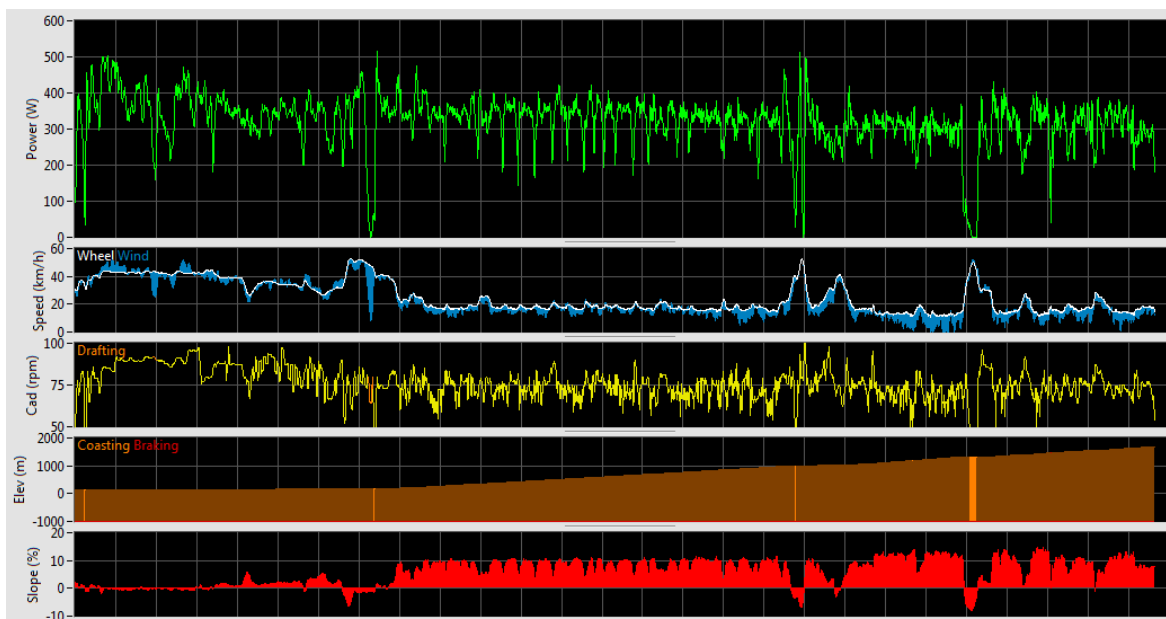


Il tracciato generale di tutte le misurazioni del dispositivo, nell'atleta 1 si presentava così.

In didascalia inserire lo smoothing a 5 secondi, drafting e coasting



Quello dell'atleta 2 si mostrava nel seguente modo:



I punti in cui la potenza cala vertiginosamente, come si può notare confrontando il tracciato della potenza con gli ultimi tre tracciati, corrispondono al momento in cui c'è una discesa importante: si può infatti notare che la frequenza di pedalata va a 0 nel 3° riquadro, ed è segnato come fase di coasting nel 4° riquadro.

Dopo una visione generale dell'andamento della potenza, si è passato a suddividere il tracciato in misurazioni della sua media in 15 intervalli di tempo di 5 minuti. Si sono quindi costruite due tabelle, una con i valori propri dell'intervallo e l'altra con la media dal tempo 0 al tempo parziale.

	ATLETA 1 (W)	ATLETA 2 (W)
0-5	418	365
5-10	386	335
10-15	369	337
15-20	343	340
20-25	343	335
25-30	339	340
30-35	333	332
35-40	325	327
40-45	312	310
45-50	355	306

	ATLETA 1 (W)	ATLETA 2 (W)
0-5	418	365
0-10	402	352
0-15	389	347
0-20	378	345
0-25	370	343
0-30	365	342
0-35	360	341
0-40	356	340
0-45	351	336
0-50	352	333

50-55	331	307
55-60	300	286
60-65	330	296
65-70	343	316
70-75	-	307

0-55	348	331
0-60	345	327
0-65	344	325
0-70	344	324
0-75	-	323

Il valore evidenziato in rosso corrisponde alla potenza media espressa nell'arco della tappa. Se lo rapportiamo alla massa dei due soggetti avremo:

ATLETA 1 > $344/59=5,83$ W/kg

ATLETA 2 > $323/61=5,29$ W/kg inserire tabella con w/kg

Dividendo la tappa in 3 intertempi otteniamo il seguente risultato:

	ATLETA 1	ATLETA 2
1°Intertempo (0-9km)	14'28''	15'33''
2°Intertempo (9-18km)	28'14''	29'40''
3°Intertempo (18-26,8km)	26'59''	30'41''

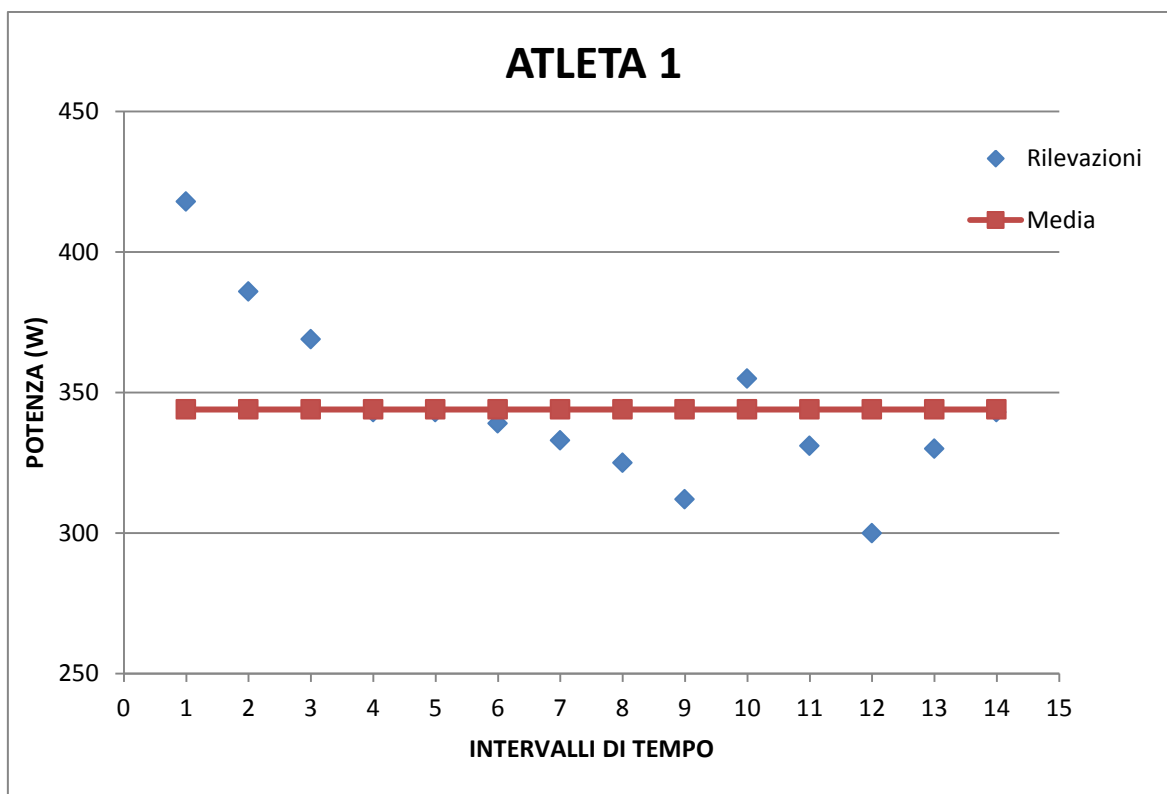
Se si va a vedere la media della potenza normalizzata per il peso in questi tre settori della gara abbiamo: **CONFRONTARE WATT ASSOLUTI IN PIANURA E /KG IN SALITA**

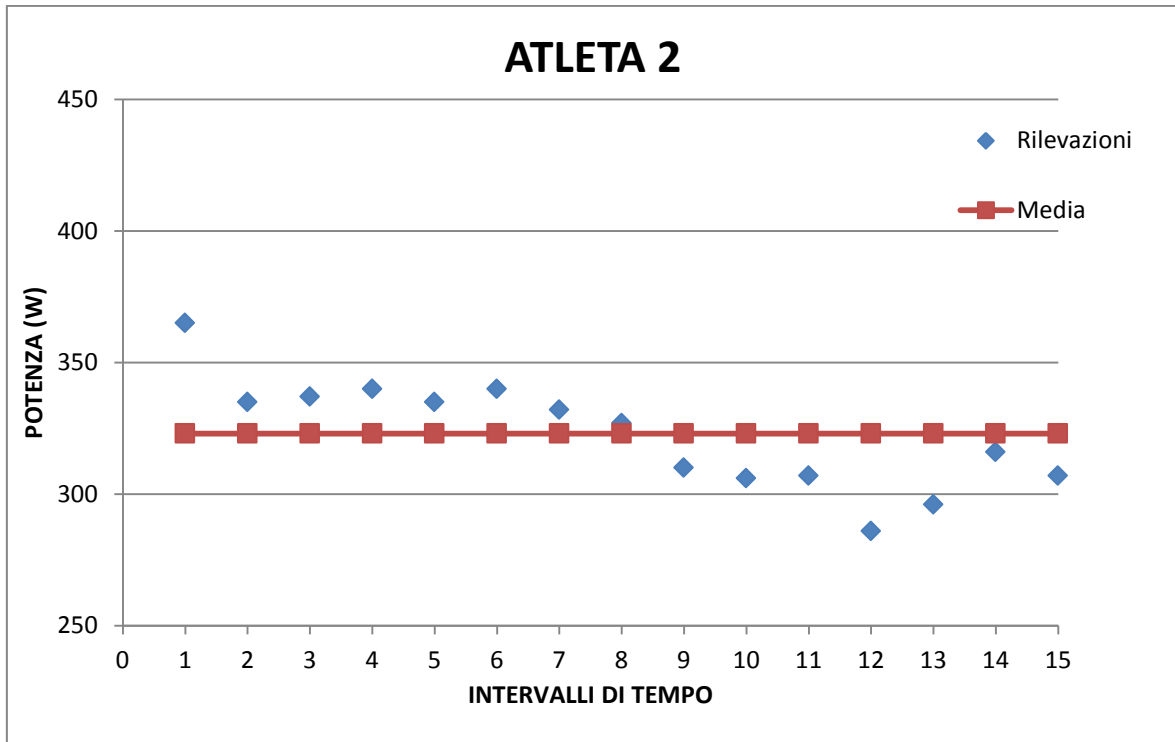
	ATLETA 1 (W/kg)	ATLETA 2 (W/kg)
1°Intertempo (0-9km)	6,61	5,67
2°Intertempo (9-18km)	5,64	5,40
3°Intertempo (18-26,8km)	5,61	4,98

Come si può notare, la maggior differenza di potenza è nel primo tratto (quasi esclusivamente percorso in pianura), dove però la differenza come tempi è di soli 1'05''. Nel secondo e nel terzo tratto, entrambi tratti di montagna, si può notare che, nonostante le differenze in termini di potenza siano nettamente inferiori, i tempi dei distacchi aumentano di molto. Da questa osservazione possiamo notare come una relativamente grande differenza di potenza in pianura non abbia molta

influenza ai termini del risultato in tappe a cronometro, mentre, durante l'ascesa, anche piccole differenze nell'espressione di potenza, portano a discriminare tra un buon piazzamento ed un piazzamento meno buono. (??)

Per visualizzare meglio i dati scritti in tabella SPECIFICARE NUMERO, si sono creati due grafici per confrontare le prestazioni.





Quello che si nota da questi grafici è come, sebbene il primo soggetto sia stato in grado di mantenere potenze più alte su tutto l'arco della gara, egli abbia perso più potenza rispetto al secondo soggetto, che invece seppure a potenza più basse, è stato più costante.

Calcolando la deviazione standard dei due soggetti infatti si nota che:

Deviazione standard soggetto 1 = 30,

Deviazione standard soggetto 2 = 20, **pace strategy**

CONVIENE PARTIRE ALTO CHE MANTENERE

Si può quindi affermare che l'atleta 1 è stato in grado di ottenere un miglior risultato perché capace di esprimere una potenza media maggiore rispetto all'altro, ma l'atleta 2 ha distribuito meglio lo sforzo lungo tutto l'arco della gara, mantenendosi su livelli di potenza maggiormente costanti rispetto all'atleta 1.

Nella seconda analisi, il confronto è stato fatto in una tappa molto diversa dalla precedente: la Valdengo – Montecampione. Questa è una tappa lunga 225km: presenta la prima parte di pianura per 205km, per poi terminare con 19km di salita

formata da tre tratti: i primi 11km con pendenza intorno all' 8%, 3 km al 4% per poi terminare gli ultimi 4km al 9%. Al contrario delle cronometro, in questo tipo di tappa assume una notevole importanza la strategia del team, al fine di favorire uno dei suoi corridori che abbia le potenzialità per ottenere un buon piazzamento. In questo confronto andremo ad analizzare la prestazione di tre ciclisti: uno di essi che ha fatto parte del gruppetto di fuga per la quasi totalità della tappa, gli altri due sono stati in gruppo fino alla salita finale, dove, il ciclista con le caratteristiche di scalatore ha dato il massimo per ottenere la vittoria finale. Al contrario dell'altra analisi, dove gli intervalli considerati erano fissi (sia di tempo, 5 minuti, che di distanza, 9km), in questa analisi saranno considerati degli intervalli non fissi, ma ritenuti rilevanti ai fini preposti.



All'apertura dei files, i tracciati si presentavano così:

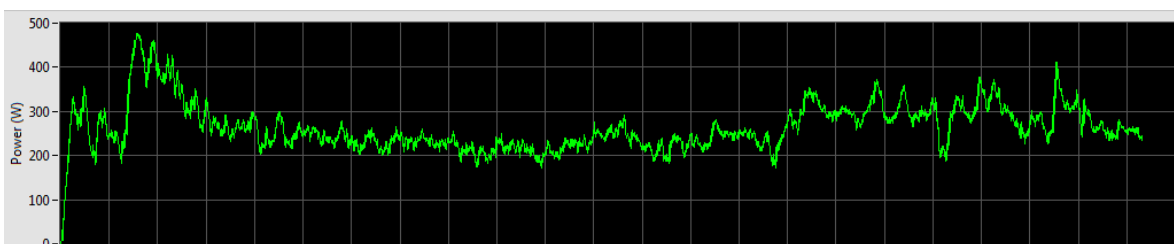


Figura 1. Tracciato della potenza dell'atleta 1. Smoothing = 2 minuti a causa della lunghezza della tappa

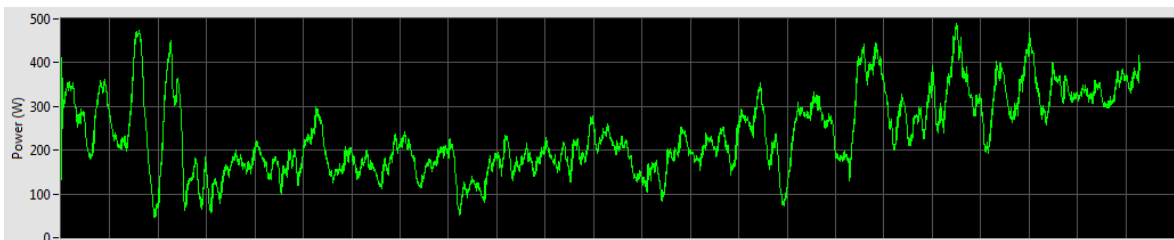


Figura 2. Tracciato della potenza dell'atleta 2. Smoothing = 2 minuti a causa della lunghezza della tappa

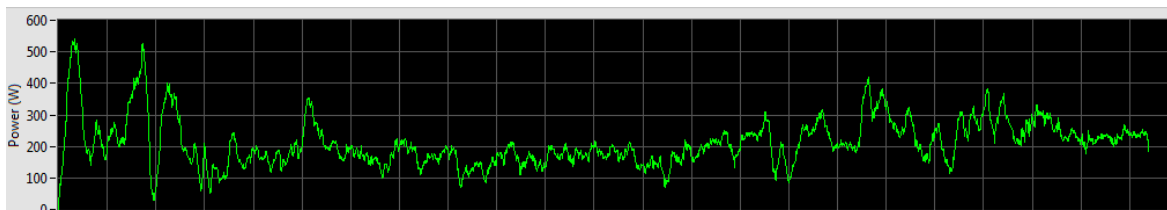


Figura 3. Tracciato della potenza dell'atleta 3. Smoothing = 2 minuti a causa della lunghezza della tappa

Come possiamo vedere, nei primi 12/13km circa gli atleti sono tutti in gruppo.

	ATLETA 1	ATLETA 3	ATLETA 4
Potenza media	245	277	274
Velocità media	50,0	50,8	47,7

Questo si può leggere benissimo dal grafico della frequenza di pedalata dove la traccia è tutta di colore arancione. Da questo momento in poi, nell'atleta 1 vediamo che la traccia diventa gialla, accompagnato da un forte incremento di potenza: questo sta a significare che l'atleta sta provando la fuga. Continuando a leggere il grafico infatti vediamo che la traccia è proprio quella tipica della fuga, con momenti in cui il ciclista si espone per "tirare" e momenti in cui il ciclista è a ruota all'interno del gruppo.

	ATLETA 1	ATLETA 3	ATLETA 4
Potenza media	363	212	242
Velocità media	46,3	41,6	41,9

Dal km 35 al km 100 vediamo che il gruppetto di testa procede ad un ritmo nettamente più elevato rispetto al resto, fino ad incrementare questo vantaggio a 7'. 200 W e 170W alla stessa velocità perché il primo provi a spingere e sei più avanti nell'altro caso sei nel gruppo e hai un minor costo.

	ATLETA 1	ATLETA 3	ATLETA 4
Potenza media	232	171	167
Velocità media	42,6	40,8	40,7

Da questo momento in poi vediamo che la fase che va dal km 100 al km 170 circa, tra i due gruppi c'è un sostanziale equilibrio sebbene le potenze espresse siano

nettamente più alte nel gruppo di testa. Questa variazione nella potenza pur proseguendo alla stessa velocità è dovuta al fatto che chi è in fuga farà sicuramente più fatica rispetto ai ciclisti del gruppo, dato che avrà una maggiore resistenza da superare nel momento in cui si trova davanti a tirare la fuga.

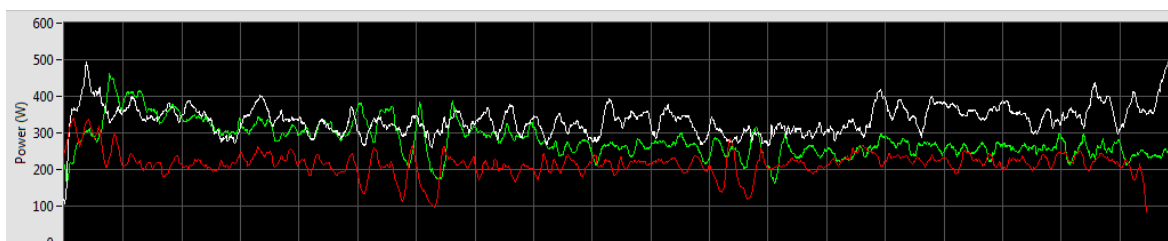
	ATLETA 1	ATLETA 3	ATLETA 4
Potenza media	252	221	200
Velocità media	42,1	42,7	42,7

Dal km 170 fino al km 205 il gruppo aumenta l'intensità in maniera palpabile, per recuperare il terreno in vista della salita finale. Il distacco scende dai 7' del km 100 ai 2'10" del km 205, ai piedi della salita di Montecampione.

	ATLETA 1	ATLETA 3	ATLETA 4
Potenza media	293	320	259
Velocità media	47	51,5	53,1

In questo momento, i tre ciclisti si comportano in modo diverso:

- L'atleta 1, in fuga, prova il tutto per tutto per ottenere un buon piazzamento
- L'atleta 3 che ha disputato tutta la gara in gruppo si stacca per vincere la tappa
- L'atleta 4 che, insieme agli altri velocisti, ha esaurito il suo compito di portare il compagno favorito alla scalata, molla completamente per risparmiare energie in vista delle tappe successive



ATLETA 1 VERDE 3 BIANCO 4 ROSSO

Dai dati in nostro possesso vediamo che l'atleta 3, per i 19km di salita spinge in media a 345W, che normalizzati per il suo peso fanno ben 6 W/kg. Questo è un dato molto positivo considerando anche che questo valore viene dopo aver già

percorso 4h30' in sella. Questa performance gli è valsa il 2° posto nella classifica di tappa. L'atleta 1 mantiene una media invece di 280W, ovvero 4,74 W/kg sebbene come si può vedere dal grafico, è possibile suddividere la sua salita in due tronconi, i primi 7km di salita a 320W (w/kg) di media, e gli ultimi 12km a 260W (w/kg). L'atleta infatti dopo aver tirato la fuga per tutta la tappa, e dopo aver risposto a diversi tentativi di fuga di altri corridori durante la salita, ha mollato negli ultimi 12km, ottenendo il 20esimo posto nella classifica di tappa. L'atleta 4 percorre la salita a soli 230W, corrispondenti a 3,59 W/kg. Questo valore relativamente molto basso non è dovuto alla incapacità del corridore di spingere di più, quanto alla strategia di squadra. Per questa tappa il compito del team era di portare l'atleta 3 alla scalata finale facendo sì che egli arrivasse il più fresco possibile per provare a vincere la tappa.

	ATLETA 1	ATLETA 3	ATLETA 4
Potenza media (W)	280	345	230
Potenza media (W/kg)	4,74	6	3,59

Come citato precedentemente, la letteratura dice che gli atleti che primeggiano nelle tappe delle competizioni importanti, sono capaci di mantenere intensità submassimali (intorno al 90% VO₂max) anche per 60 minuti. Prendendo come riferimento il test di laboratorio, si può notare che la potenza di 345W corrisponde praticamente al valore di 69 ml·kg⁻¹·min⁻¹, ovvero il 92% del VO₂max del ciclista. La frazione analizzata è stata percorsa in 54 minuti. Il suo valore di potenza normalizzata per il peso è di 6 W/kg, valore che la letteratura ci dice essere tipico di chi primeggia nelle gare dei grandi giri.

W	W/kg	VO ₂
80	1,39	28,0
102	1,77	28,0
140	2,43	34,0
175	3,04	41,0
227	3,95	50,0
288	5,01	60,0
322	5,60	64,0

349	6,07	69,0
388	6,75	75,0

DIDASCALIA SPIEGARE VALORI

9. Appendice

10. Bibliografia

1. Ahlquist LE et al. The effects of pedaling frequency on glycogen depletion rates in type I and type II quadriceps muscle fibers during submaximal cycling exercise. *Eur J Appl Physiol* 1992; 65: 360-4
2. Bassett DR et al. Comparing cycling world records, 1967-1996: modeling with empirical data. *Med Sci Sports Exerc* 1999; 31: 1665-76
3. Buelmann B et al. The association between the val/ala-55 polymorphism of the uncoupling protein 2 gene and exercise efficiency. *Int J Obes Relat Metab Disord* 2002;25: 467-71
4. Capelli et al. Energy cost and efficiency of riding aerodynamic bicycles. *Eur K Appl Physiol* 1993; 67: 144-9
5. Coast RJ, Welch HG. Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycling ergometry. *Eur J Appl Physiol* 1985; 53: 339-42
6. Coast RJ et al. Optimal pedaling rate in prolonged bouts of cycle ergometry. *Med Sci Sports Exerc* 1986; 18: 225-30
7. Coyle EF et al. Cycling efficiency is related to the percentage of type I muscle fibers. *Med Sci Sports Exerc* 1992; 21: 782-8
8. Coyle EF et al. Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 1991; 23: 93-107
9. Di Prampero PE. Cycling on Earth, in space, on the Moon. *Eur J Appl Physiol* 2000; 82: 345-360
10. Di Prampero PE, Ferretti G. Factors limiting maximal oxygen consumption in humans. *Respir Physiol.* 1990 May-Jun;80(2-3):113-27
11. Faria IE, Cavanagh PR. The physiology and biomechanics of cycling. New York: John Wiley and Sons, 1978
12. Fernandez – Garcia B. et al. Intensity of exercise during road race pro-cycling competition. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32(5)
13. Garnevale TG, Gaesser GA. Effects of pedaling speed on power-duration relationship for high intensity exercise. *Med Sci Sports Exerc* 1991; 23 :242-6
14. Gnehm P et al. Influence of different racing positions on metabolic costs in elite cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 1997; 29: 818-23
15. Gross AC et al. The aerodynamics of human-powered land vehicles. *Sci Am* 1983; 249: 142-52
16. Hagberg JM, Coyle EF. Physiological determinants of endurance performance as studied in competitive walkers. *Med Sci Sports Exerc* 1983; 15: 287-9
17. Harms GA. Effect of skeletal muscle demand on cardiovascular function. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32: 94-9
18. Harris R et al., Glycogen glycolytic intermediates and high energy phosphates determined in biopsy samples of muscles quadriceps femoris of man at rest. *Scand J Clin Lab Invest* 1974; 33: 109-20
19. Hausswirth C et al. Effects of cycling alone or in a sheltered position on subsequent running performance during a triathlon. *Med Sci Sports Exerc* 1999; 31: 599-604
20. Hawkey JA, Noakes TD. Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance in trained cyclists. *Eur J Appl Physiol* 1992; 65: 79-83

21. Horowitz JA et al. High efficiency of type I muscle fibers improves performance. *Int J Sports Med* 1994; 15: 152-7
22. Johnson DB et al. Respiratory muscle fatigue during exercise: implications for performance. *Med Sci Sports Exerc* 1996; 28: 1129-37
23. Kyle CR. Mechanical factors affecting the speed of a cycle. In: Burke RE. *Science of cycling*. Human Kinetics Champaign, Illinois, pp 133-135
24. Kyle CR. The aerodynamic of helmets and handlebars. *Cycling Sci* 1989; 1: 22-5
25. Kyle CR. The effect of crosswinds upon time trials. *Cycling Sci* 1991; 3 (3-4): 51-6
26. Lepers R et al. Evidence of neuromuscular fatigue following prolonged cycling exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32: 1880-6
27. Lucia A et al. Breathing pattern in highly competitive cyclists during incremental exercise. *Eur J Appl Physiol* 1999; 79: 512-21
28. Lucia A et al. Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32: 1777-82
29. Lucia A et al. In professional road cyclists, low pedaling cadences are less efficient. *Med Sci Sports Exerc* 2004; 36: 1048-54
30. Lucia A et al. Inverse relationship between VO₂max and economy/efficiency in world-class cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 2002; 34: 2079-84
31. Lucia A et al. Physiological differences between professional and elite road cyclists. *Int J Sports Med* 1998; 19:342-8
32. Lucia A et al. Preferred pedaling cadence in professional cycling. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 33: 1361-6
33. Martin JC et al. Validation of a mathematical model for road cycling power. *J App Biomech* 1998; 14; 276-291
34. McCole SD et al. Energy expenditure during bicycling. *J Appl Physiol* 1990; 68: 748-52
35. Moseley L, Jeukendrup AE. The reliability of cycling efficiency. *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33: 621-7
36. Padilla S et al. Level ground and uphill cycling ability in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 1999; 31: 1472-7
37. Padilla S et al. Scientific approach to the 1-h cycling world record: a case study. *J Appl Physiol* 2000; 89:1522-7
38. Palmer GS et al. Heart rate response during a 4-d cycle stage race. *Med Sci Sports Exerc* 1994; 26: 1278-83
39. Romer LE et al. Inspiratory muscle fatigue in trained cyclists: effects of inspiratory muscle training. *Med Sci Sports Exerc* 2002; 34: 785-92
40. Sahlin K et al. Resynthesis of creatine phosphate in human muscle after exercise in relation to intramuscular pH and availability of oxygen. *Scand J Clin Lab Invest* 1979; 39: 551-8
41. Serresse O et al. Estimation of the contribution of the various energy systems during maximal work of short duration. *Int J Sports Med* 1988; 9: 456-60
42. Spriet LL. Anaerobic metabolism in human skeletal muscle during short-term, intense activity. *Can J Physiol Pharmacol* 1990; 70: 157-65
43. Swain DP et al. Influence of body size on oxygen consumption during bicycling. *J Appl Physiol* 1987; 62; 668-72
44. Swain DP et al. The influence of body mass in endurance cycling. *Med Sci Sports Exerc* 1994; 26: 58-63

45. Van Ingen Schenau GJ, Cavanagh P. Power equations in endurance sports. *J Biomech* 23: 865-881
46. Wasserman K. The anaerobic threshold: definition, physiological significance and identification. *Adv Cardiol.* 1986;35:1-23.
47. Withers RT et al. Muscle metabolism during 30, 60, and 90 s of maximal cycling on an air-braked ergometer. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1991; 63: 354-62