

TESI DI LAUREA TRIENNALE

**AZIONAMENTI PER CICLI A PEDALATA ASSISTITA**

ELECTRONIC DRIVES FOR PEDELECS

Laureando:

**Jason Bettega**

Matricola 1052229

Relatore:

**Prof. Ing. Mauro Zigliotto**

# Indice

<b>Elenco delle figure</b>	<b>ii</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1 Motivazione dei cicli a pedalata assistita . . . . .	2
1.2 Fasce d'età coinvolte . . . . .	4
1.3 Servizio comunale di bike-sharing . . . . .	5
1.4 Indagini statistiche . . . . .	6
<b>2 Normativa</b>	<b>10</b>
<b>3 Tipologia di movimentazione</b>	<b>15</b>
<b>4 Tipologia di motore e sensoristica utilizzata</b>	<b>18</b>
4.1 Motore . . . . .	18
4.2 Sensori . . . . .	29
<b>5 Problematiche da risolvere</b>	<b>41</b>
5.1 Carica delle batterie . . . . .	41
5.2 Autonomia delle batterie . . . . .	49
5.3 Peso . . . . .	54
5.4 Ricarica Wireless Power Transfer (WPT) . . . . .	60
<b>6 Conclusioni</b>	<b>67</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>68</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>68</b>

# Elenco delle figure

1.1	Motore elettrico a 6 poli, brevettato dall' inventore americano Ogden Bolton junior. . . . .	2
1.2	La bici elettrica Philips Simplex prodotta nel 1932. . . . .	3
1.3	BikeMi, servizio comunale di bike-sharing fornito dalla città di Milano. . . . .	5
1.4	Grafico relativo alle vendite mondiali di pedelecs. (Fonte: Statista, The Statistics Portal - <a href="http://www.statista.com">www.statista.com</a> ) . . . . .	7
1.5	Grafico relativo all' andamento delle vendite europee di pedelecs, riferite all' arco temporale compreso tra il 2006 ed il 2014. (Fonte: Statista, The Statistics Portal - <a href="http://www.statista.com">www.statista.com</a> ) . . . . .	8
1.6	Grafico relativo alle vendite europee di pedelecs, riferite ad ogni singolo Stato Membro. (Fonte: Statista, The Statistics Portal - <a href="http://www.statista.com">www.statista.com</a> ) . . . . .	9
2.1	A sinistra: copertina de "Il Nuovo Codice della Strada". A destra: foto raffigurante una generica pedelec. . . . .	10
2.2	A sinistra: generico mezzo facente parte della categoria L1eA. A destra: generico mezzo facente parte della categoria L1eB. . . . .	11
3.1	Bicicletta elettrica a pedalata assistita con motore situato sul mozzo anteriore. . . . .	15
3.2	Bicicletta elettrica a pedalata assistita con motore situato sul mozzo posteriore. . . . .	16
3.3	Bicicletta elettrica a pedalata assistita con motore montato centralmente. . . . .	16
4.1	Generico motore al mozzo per biciclette elettriche a pedalata assistita. . . . .	18
4.2	Schema semplificativo di un motore in corrente continua con spazzole. . . . .	19

4.3	Comparazione tra i cicli di isteresi relativi al ferro e ai lamierini al silicio. . . . .	20
4.4	Forze agenti su un singolo conduttore. . . . .	21
4.5	A sinistra: schematizzazione della reazione d' indotto. A destra: aggiunta di poli ausiliari per la risoluzione della problematica relativa alla reazione d'indotto. . . . .	23
4.6	Schema semplificativo di un motore in corrente continua senza spazzole. . . . .	24
4.7	Schema semplificativo di un generico motore brushless. . . . .	26
4.8	Schema semplificativo dell' effetto Hall. . . . .	30
4.9	Sensori ad effetto Hall presenti in un generico motore brushless. . . . .	31
4.10	Schema riguardante il funzionamento dei tre sensori ad effetto Hall in relazione alle tre bobine di un generico motore brushless. . . . .	32
4.11	Generico sensore P. A. S. per pedelec. . . . .	33
4.12	Generico sensore di coppia per pedelec. . . . .	34
4.13	Schema elettrico del ponte di Wheatstone. . . . .	35
4.14	Schema di un estensimetro elettrico. . . . .	36
4.15	Schema semplificativo di un sensore di coppia. . . . .	37
4.16	Dispositivo di rilevamento coppia, velocità e direzione, prodotto da Methode Electronics. . . . .	38
4.17	Sensore cut-off. . . . .	39
4.18	Tubetto V-brake flessibile con gommino. . . . .	40
5.1	Generico caricabatteria per pedelec. . . . .	43
5.2	Schema semplificativo del circuito relativo ad un generico caricabatteria per batterie agli ioni di litio. . . . .	43
5.3	Diagramma relativo al metodo di carica CC-CV. . . . .	45
5.4	Cella zinco-aria . . . . .	47
5.5	Cella litio-zolfo . . . . .	48
5.6	Cella litio-aria. . . . .	48
5.7	Diagramma relativo alla coppia e alla potenza erogate, in funzione della velocità di rotazione del rotore, espressa in Hertz. . . . .	51
5.8	Diagramma, fornito da Bosch, raffigurante l'autonomia di ciascun motore in funzione del livello di assistenza e delle condizioni in cui esso si trova ad operare. . . . .	52
5.9	A sinistra: alluminio. Al centro: acciaio. A destra: carbonio. . . . .	58
5.10	A sinistra: telaio in fibra di bambú. A destra: telaio in canne di bambú. . . . .	59
5.11	Telaio in lega di magnesio. . . . .	60
5.12	Grafico corrente-frequenza. . . . .	64

5.13	Progetto di ricarica wireless ideato dalla società francese Arcade Cycles, in collaborazione con l'azienda tedesca Sew Usocome.	65
5.14	A sinistra: pedelec posizionata su un breve tratto prototipale di pista Flux, per poter attuare le opportune verifiche progettuali. A destra: autobus Volvo ibridi plug-in attualmente in servizio a Goteborg (Svezia).	66

# Capitolo 1

## Introduzione

Le biciclette elettriche a pedalata assistita sono ormai diventate al giorno d'oggi un diffuso mezzo di trasporto, specialmente nell'ambiente urbano. Sempre piú frequentemente in cittá, ma anche in piccoli centri, si vedono persone spostarsi con questi mezzi, veicoli moderni ed eleganti che consentono di muoversi nel traffico con molta agilitá.

Il possedere tali mezzi elettrici porta ad innumerevoli vantaggi; infatti essi: sono esenti da costi di assicurazione e soprattutto dai continui aumenti del costo del carburante, non inquinano, non hanno problemi di parcheggio e consentono di fare meno fatica rispetto alle tradizionali biciclette.

Negli ultimi anni il miglioramento della qualità del prodotto, in particolare per le sue componenti elettroniche sempre piú affidabili e performanti, ha permesso lo sviluppo del mercato del prodotto e la sua diffusione ai livelli attuali, ed in alcuni paesi, tra cui l'Italia, si sta vivendo la sua fase di espansione proprio al giorno d'oggi.

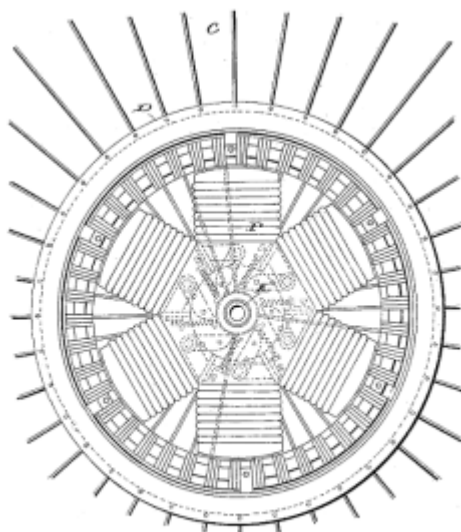
Lo scopo di tale tesi consiste nell'acquisire maggiore conoscenza per quanto riguarda i cicli a pedalata assistita, affrontandone gli aspetti peculiari. Infatti, in questo primo capitolo si affronterá maggiormente il mercato attuale delle pedelecs, soffermando l'attenzione anche sulle varie modalitá di impiego, come ad esempio le iniziative comunali di bike-sharing.

Nel secondo capitolo si definiranno le varie normative che regolano la progettazione e l'immissione nel mercato di tali mezzi elettrici; nel terzo capitolo si porrá l'attenzione sulle varie tipologie di movimentazione, sottolineando rispettivi vantaggi e svantaggi. Nel quarto capitolo si andranno a considerare i tipi di motore e la sensoristica utilizzata nei cicli a pedalata assistita; infine, nell'ultimo capitolo, si andranno ad analizzare le varie problematiche attualmente presenti in tale campo, introducendo gli studi e le possibili soluzioni adottate al riguardo oggi.

## 1.1 Motivazione dei cicli a pedalata assistita

Sostanzialmente, la bicicletta a pedalata assistita (EPAC - Electric pedal assisted cycle, detta anche pedelec o bipa) rappresenta una bici alla cui azione propulsiva umana si aggiunge quella di un motore elettrico.

Il primo prototipo apparve nel 1895 quando l'inventore americano Ogden Bolton junior decise di registrare a suo nome un brevetto presso un ufficio statunitense.



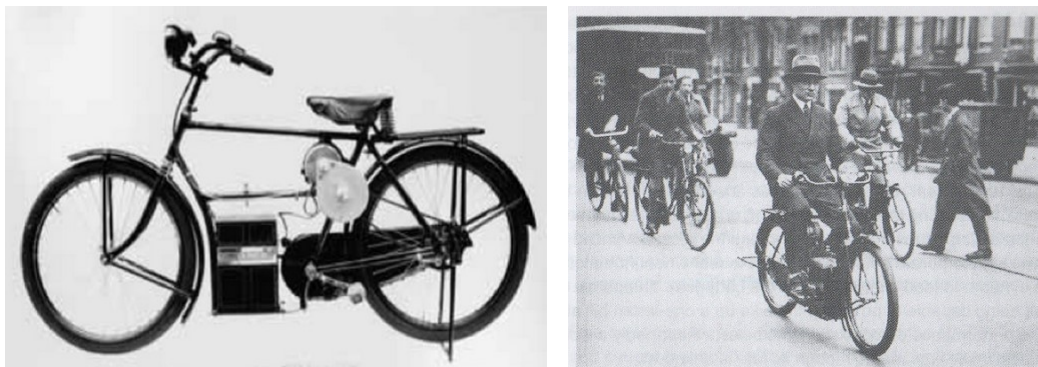
**Figura 1.1:** *Motore elettrico a 6 poli, brevettato dall'inventore americano Ogden Bolton junior.*

La sua idea era semplice ma interessante: installare un motore elettrico sul mozzo posteriore di una bicicletta. Si trattava di un motore a corrente continua, a 6 poli (vedi Figura 1.1). Il motore poteva assorbire fino a 100 ampere da una batteria da 10 volt, posizionata sotto il tubo orizzontale del telaio. Non aveva degli ingranaggi per demoltiplicare la rotazione e, di conseguenza, possedeva una coppia molto elevata ed un'autonomia ridotta, anche perché non erano previsti pedali in ausilio al motore.

Dopo questo primo prototipo, fu proprio durante gli anni Trenta che le bici elettriche cessarono definitivamente di rappresentare un progetto incompreso dalla maggior parte della società; diverse importanti aziende europee, infatti, iniziarono a produrre propri modelli di bici elettriche complete.

Tra queste, un esempio è rappresentato dalla Philips, la quale era già all'epoca un'azienda famosa, attiva soprattutto nel settore delle radio. Nel

1932 i dirigenti dell'azienda decisero di tentare ad espandersi in un altro settore: le bici elettriche. Organizzarono quindi una partnership con la Simplex, azienda produttrice di bici tradizionali, per realizzare il modello illustrato in Figura 1.2, del quale purtroppo l'unico dato preciso che si ha a disposizione riguarda la batteria, che era da 12 volt.



**Figura 1.2:** *La bici elettrica Philips Simplex prodotta nel 1932.*

In seguito a tale breve sintesi riguardante la storia delle pedelec, si deve, tuttavia, sottolineare che é proprio in questi ultimi decenni che il settore della mobilità elettrica si sta sviluppando a ritmi davvero impressionanti, e questo grazie in particolare al progresso scientifico e tecnologico, che purtroppo negli anni '30 non era presente. La società mondiale, infatti, sta dirigendo i suoi studi e le sue ricerche in questo campo, in quanto i vantaggi che derivano dall'utilizzo dei cicli a pedalata assistita risultano essere molteplici.

Si tratta infatti di un mezzo innovativo, che permette di spostarsi velocemente ed agilmente senza faticare; inoltre:

- rappresenta un mezzo completamente ecologico; l'unico fatto a cui si deve porre maggiore attenzione riguarda lo smaltimento delle batterie;
- presenta minimo ingombro e manovrabilità eccezionale;
- possiede bassi costi di gestione, in quanto, dal punto di vista legislativo, é paragonata ad una bici normale. Inoltre il costo dell'energia elettrica é trascurabile, mentre é piú rilevante quello di sostituzione della batteria, da effettuarsi però a lungo termine (ogni 2-3 anni);
- permette di faticare di meno, in quanto il motore aiuta la pedalata del ciclista proprio quando ne ha piú bisogno, soprattutto nelle ripartenze e in salita.

L'utilizzo quindi di una bici elettrica presenta numerosi benefici che possono essere sintetizzati in due aree principali: salute e risparmio; inoltre, tali benefici possono essere percepiti non solo da chi fa uso di una pedelec, ma anche dalla società stessa in generale.

La bici elettrica, infatti, non inquina: non ha emissioni nocive, ed è silenziosa, contribuendo a ridurre l'inquinamento acustico così dannoso per la salute mentale. L'OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) considera, infatti, che il risparmio generato dalla riduzione dell'inquinamento ambientale e acustico derivante dall'uso della bici in EU è stimato in una cifra complessiva superiore ai 3 miliardi di euro.

## 1.2 Fasce d'età coinvolte

L'Italia sta investendo sempre di più le sue risorse nel settore delle bici elettriche.

Nel 2014, infatti, sono state vendute circa 1.6 milioni di bici in Italia, in netto aumento rispetto all'anno precedente (+6.6%) e, di queste, più di 51.000 sono cicli a pedalata assistita; il nostro paese, inoltre, mantiene il titolo di principale produttore europeo, facendo registrare un aumento della produzione (+2.1% in virtù dei 2.728.600 pezzi prodotti), reso possibile dal ruolo di traino svolto dall'export, come riportano i dati stilati dall'ANCMA (Associazione Nazionale Ciclo Motociclo Accessori).

Secondo dati statistici riguardanti la vendita di cicli a pedalata assistita a livello europeo, l'età degli acquirenti risulta essere normalmente superiore ai 60 anni, anche se negli ultimi anni, si è registrata una sempre più elevata quantità di persone che, con età minore di 55 anni, hanno deciso di avvicinarsi al mercato delle e-bike. Tali analisi statistiche affermano quindi che, negli anni a venire, più del 40% delle vendite di cicli a pedalata assistita sarà costituito da acquirenti con età inferiore ai 50 anni.

A confermare l'espansione di tale settore a soggetti non omogenei sono anche le considerazioni di alcune aziende locali, rivenditrici di cicli a pedalata assistita, le quali affermano che tuttora risulta difficile raggruppare gli acquirenti in fasce d'età precise, in quanto si passa dal ragazzo diciassettenne che, non avendo ancora la patente di guida, decide di muoversi rapidamente e senza inquinare, al signore in età avanzata che, per necessità fisica, decide di continuare a muoversi in bici, sfruttando tuttavia un ausilio aggiuntivo. Inoltre, occorre ribadire che, come hanno sottolineato queste nostre aziende locali, sempre più persone, soprattutto quelle che vivono in città a carattere caotico, stanno prendendo in seria considerazione il fatto di sostituire la propria automobile con una pedelec.

### 1.3 Servizio comunale di bike-sharing

In Italia, le città dotate del cosiddetto bike-sharing, ossia della condivisione di biciclette, risultano essere 132; tuttavia, solo poco più di un quarto (39 comuni) ha deciso di mettere a disposizione dei cittadini, oltre alle classiche biciclette tradizionali, anche cicli a pedalata assistita.

Tra queste 39 città spiccano in particolare le città di Genova e di Milano. La prima città, ad esempio, anche se con un numero ancora piuttosto esiguo di pedelecs (poche centinaia), ha permesso ai cittadini genovesi di superare con maggiore facilità i numerosi dislivelli che caratterizzano la città stessa.

Tuttavia, fino ad oggi, risulta essere Milano il comune che ha maggiormente investito in questo settore.



**Figura 1.3:** *BikeMi, servizio comunale di bike-sharing fornito dalla città di Milano.*

Infatti, il bike-sharing di Milano, denominato *BikeMi*, prevede costi piuttosto contenuti (36 euro annuali, 9 euro settimanali oppure 4.50 euro giornalieri) e, con 280 stazioni attive e oltre 4.650 biciclette (di cui circa 1.000 elettriche e alcune decine per bambini), è il sistema più esteso ed utilizzato d'Italia. Nel 2015 sono stati effettuati 3.1 milioni di prelievi e gli abbonamenti annuali sono stati 44.682. Il 14 aprile 2016 si è raggiunta la cifra record di 20.324 prelievi, mentre dal 30 aprile 2016 rappresenta il primo sistema integrato al mondo con biciclette tradizionali, elettriche e per bambini.

Qui di seguito si può trovare l'elenco di tutte e 39 le città che, all'interno del loro bike-sharing, prevedono la condivisione anche di cicli a pedalata assistita: Ravenna, Modena, Ferrara, Faenza, Padova, Crema, Brescia, Lodi,

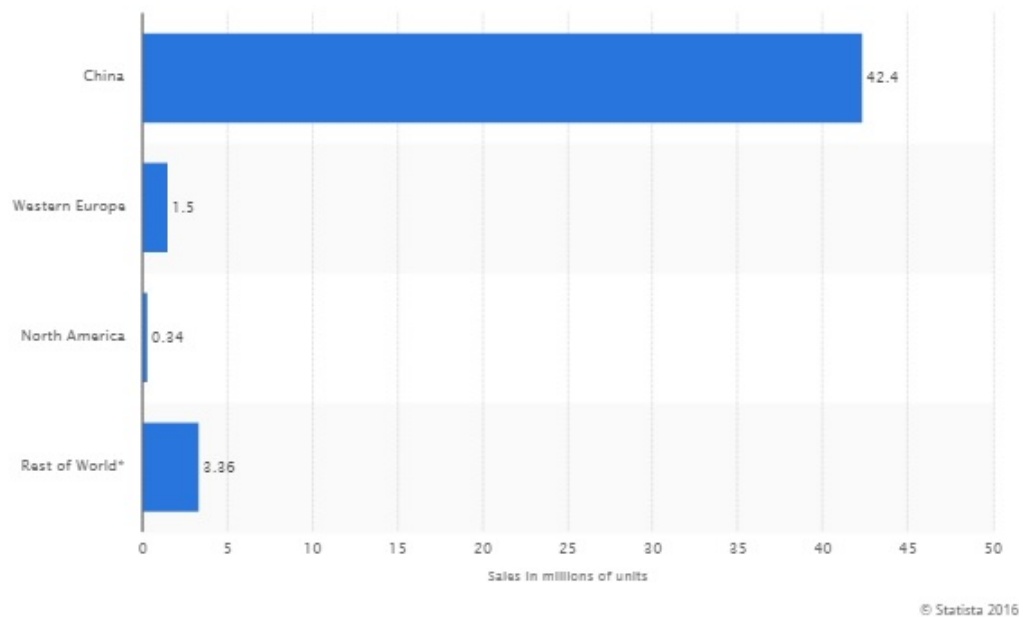
Trento, Abano Terme, Montegrotto Terme, Montebelluna, Carugate, Gallarate, Gorgonzola, Cernusco sul Naviglio, Francavilla al Mare, Vercelli, Alessandria, Casale Monferrato, Cesena, Orestano, Montefalcone, Aosta, Vittorio Veneto, Conegliano, Pesaro, Pordenone, Latina, Chioggia, Preganziol, Pieve di Soligo, Reggio Emilia, Piacenza, Bologna, Imola, Verona, Genova e Milano.

Infine, una notizia piuttosto recente, datata luglio 2016, arriva dall'Ateneo Luiss di Roma; quest'ultimo, infatti, ha sviluppato un innovativo progetto di e-sharing, il cosiddetto *Green Mobility*, che rappresenta un servizio di condivisione di veicoli elettrici realizzato in partnership con Electric Drive Italia, Mercedes Italia e in collaborazione con Intesa SanPaolo e che sarà attivo da settembre 2016. Inizialmente disponibile soltanto per consentire a studenti, docenti e personale amministrativo di spostarsi a emissioni zero tra le tre sedi dell'Università capitolina, in futuro dovrebbe essere esteso ai residenti di Roma e ai turisti grazie pure al potenziamento delle stazioni e dei servizi.

Diversamente dagli altri e-sharing, tale sistema consente di prenotare e prelevare i mezzi, effettuare le ricariche presso le colonnine abilitate e versare il costo del nolo non attraverso una tessera di riconoscimento o la stipula di un contratto con un operatore energetico, bensì tramite un'apposita app per smartphone che permette di utilizzare il servizio con pochi gesti. Un'opportunità che, di fatto, rende il servizio attivo 24 ore su 24 per 7 giorni la settimana permettendo l'uso dei mezzi anche per spostarsi su tutto il territorio comunale di Roma. A rendere, inoltre, ancora più attrattivo il progetto Green Mobility è pure il parco veicoli. Nelle tre sedi della Luiss, infatti, sono dislocati 54 mezzi: 18 auto elettriche, 12 scooter a batterie e 24 bici a pedalata assistita. Si tratta delle Smart ED, delle pedelecs Freesby e dei ciclomotori messi a disposizione dalla Energeko, società romana specializzata nella fornitura di veicoli a zero emissioni.

## 1.4 Indagini statistiche

Passando ora ad analisi di carattere statistico, si procede con uno sguardo più approfondito alle vendite di e-bike. Innanzitutto, si parte considerando le vendite mondiali, facilmente sintetizzate nel grafico in Figura 1.4:

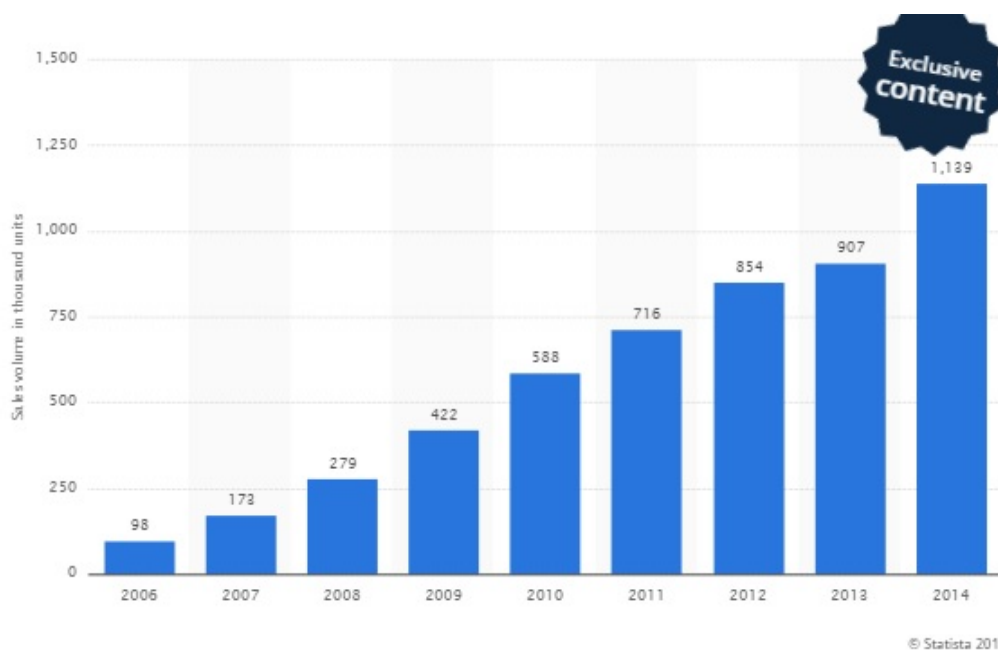


**Figura 1.4:** *Grafico relativo alle vendite mondiali di pedelecs. (Fonte: Statista, The Statistics Portal - [www.statista.com](http://www.statista.com))*

Suddividendo il territorio mondiale in quattro macrosezioni, ossia Cina, Europa Occidentale, Nord America e Resto del Mondo, si può vedere molto chiaramente come al primo posto vi sia la Cina, con 42.4 milioni di vendite, seguito poi, con grande distacco, dalla porzione comprendente il Resto del Mondo, con le sue 3.36 milioni di vendite.

Solo al terzo posto si incontra l'Europa Occidentale, con 1.5 milioni di vendite, seguita infine dal Nord America, con appena 0.34 milioni di vendite.

In seguito a tale panoramica globale, si considerano ora le vendite relative all'Unione Europea; a questo punto, risulta utile considerare sostanzialmente due grafici, il primo comprendente l'andamento delle vendite di pedelecs nel corso degli anni (dal 2006 al 2014), e il secondo riguardante la suddivisione, per singolo stato, delle vendite relative al 2014.

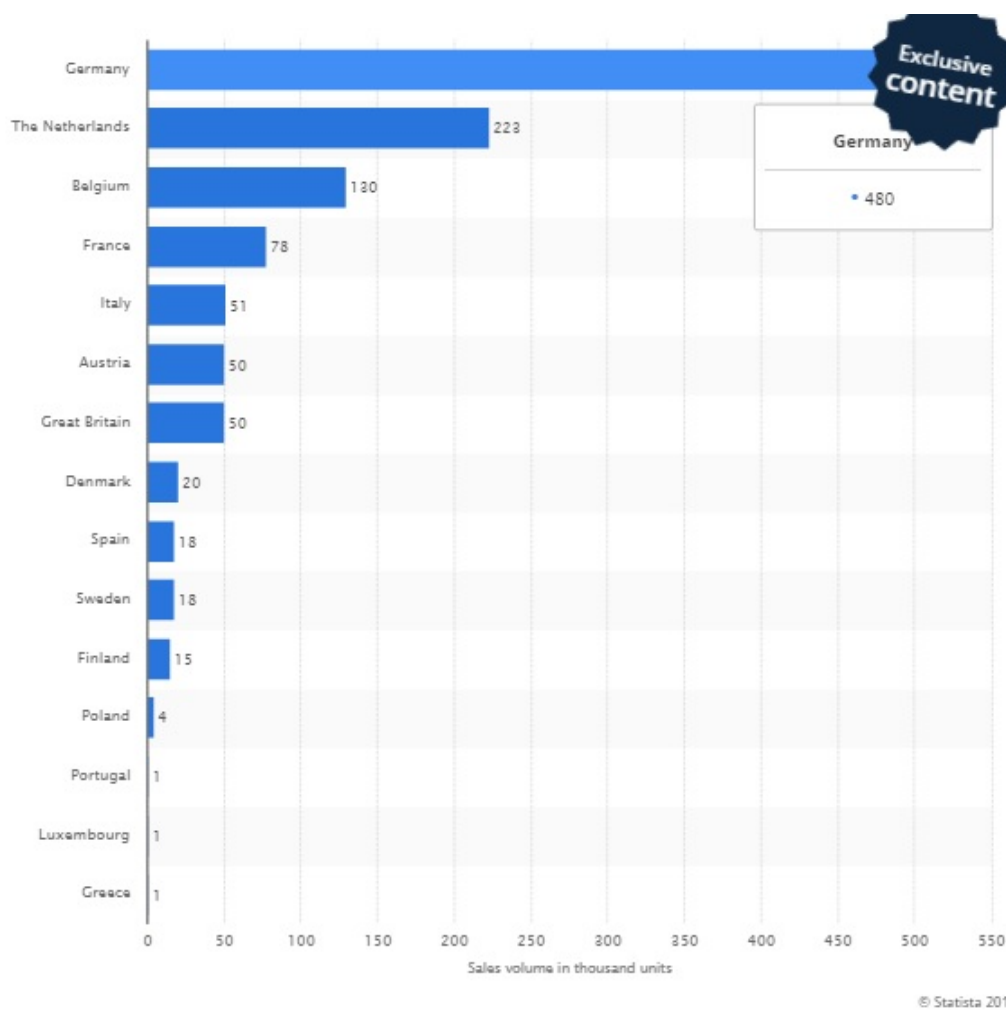


**Figura 1.5:** *Grafico relativo all' andamento delle vendite europee di pedelecs, riferite all' arco temporale compreso tra il 2006 ed il 2014. (Fonte: Statista, The Statistics Portal - [www.statista.com](http://www.statista.com))*

Tali dati sottolineano in maniera significativa come la vendita di cicli a pedalata assistita sia aumentata in maniera vertiginosa in un arco temporale relativamente ristretto; infatti, considerando il grafico in Figura 1.5, si può facilmente notare come, ad esempio, le vendite relative al 2010 (588 migliaia di unità) siano raddoppiate in maniera spaventosa nel solo arco temporale di quattro anni, arrivando ad un volume di 1.139 milioni di unità vendute nel 2014.

Nel grafico in Figura 1.6, invece, si può vedere chiaramente come le vendite di cicli a pedalata assistita interessano, in modo specifico, i vari stati dell'UE.

Al primo posto infatti si trova la Germania, con 480 migliaia di unità vendute, seguita da Olanda, Belgio e Francia; al quinto posto, invece, si trova l'Italia, con le sue già note 51 migliaia di unità vendute.



**Figura 1.6:** *Grafico relativo alle vendite europee di pedelecs, riferite ad ogni singolo Stato Membro. (Fonte: Statista, The Statistics Portal - [www.statista.com](http://www.statista.com))*

A primo impatto, osservando tale grafico, il volume di vendita riguardante l'Italia potrebbe risultare una quantità piuttosto esigua rispetto ai volumi caratterizzanti altri stati come, ad esempio, Germania ed Olanda; tuttavia, come già accennato nelle pagine precedenti, dall'analisi del mercato attuale si é dedotto chiaramente che le vendite italiane riguardanti le e-bike sono destinate a crescere con andamento pressoché esponenziale.

# Capitolo 2

## Normativa

Dalla batteria e dal motore delle biciclette elettriche derivano numerosi rischi che non esistono con le biciclette tradizionali e, di conseguenza, questo tipo di bicicletta deve essere sottoposto ad una serie di norme e regolamenti europei armonizzati.

Tali mezzi elettrici, infatti, devono rispondere a quanto previsto dal decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti datato 30 gennaio 2003, che specifica quali devono essere le caratteristiche dei cicli a pedalata assistita.

Tale decreto riprende la Direttiva Europea 2002/24/CE e definisce cicli a pedalata assistita le *biciclette dotate di un motore ausiliario elettrico avente potenza nominale continua massima di 0.25 kW, la cui alimentazione é progressivamente ridotta ed infine interrotta quando il veicolo raggiunge i 25 km/h, o prima se il ciclista smette di pedalare*. Anche l'articolo 50 del Codice della Strada prevede tale definizione per le cosiddette pedelecs.



**Figura 2.1:** *A sinistra: copertina de “Il Nuovo Codice della Strada”. A destra: foto raffigurante una generica pedelec.*

Ai veicoli che soddisfano questa direttiva non viene richiesta l'omologazione e, pertanto, essi vengono considerati a tutti gli effetti come biciclette tradizionali; veicoli, invece, che non soddisfano anche uno solo di questi tre requisiti non possono essere considerati cicli a pedalata assistita e devono, quindi, essere omologati ed immatricolati.

Tra questi ultimi si trovano, ad esempio, modelli equipaggiati con motorizzazioni di potenza superiore ai 250 W ed in grado di esprimere velocità anche al di sopra dei 25 km/h oppure modelli in cui l'uso del motore risulta indipendente dalla pedalata. Solo a titolo informativo, si procede quindi con il definire come vengono classificati questi modelli che necessitano di relativa omologazione ed immatricolazione; tali modelli devono sostanzialmente ricadere in due categorie, così definite:

- **L1eA**, comprendente i cicli a due o tre ruote, progettati per la trazione a pedale ed equipaggiati con motore elettrico ausiliario di potenza nominale continua massima non superiore a 1000 W ed in grado di esprimere velocità non superiori a 25 km/h.
- **L1eB**, comprendente i cicli a due o tre ruote, dotati di motore elettrico con potenza nominale continua massima sino a 4000 W e velocità di costruzione non superiore ai 45 km/h.



**Figura 2.2:** *A sinistra: generico mezzo facente parte della categoria L1eA. A destra: generico mezzo facente parte della categoria L1eB.*

L'omologazione, infatti, deve essere effettuata da un organo abilitato da uno Stato Membro, per certificare che l'intero veicolo ed ogni suo singolo componente sia stato sottoposto ai test ed alle verifiche previste, e pertanto approvato.

Mentre la categoria L1eB é assimilata ai "ciclomotori" e pertanto regolata da norme sul loro impiego che da tempo prevedono l'uso obbligatorio del

casco, un limite di età, l'obbligo di assicurazione, targatura e talvolta patente, la L1eA definisce i cosiddetti "motocicli a prestazioni ridotte" e rappresenta una novità che sta suscitando non poche discussioni all'interno dei vari stati nazionali per definirne gli obblighi di legge.

L'orientamento prevalente sembrerebbe quello di prevedere l'uso del casco anche per questa categoria per quanto più vicina funzionalmente alle biciclette. In Italia, come ribaditoci dall'ANCMA (Associazione Nazionale Ciclo e Motociclo e Accessori), i mezzi L1eA sono considerati motorini e, come tali, soggetti a targatura, assicurazione ed obbligo di casco.

Infine, tornando ai cicli a pedalata assistita definiti dalla Direttiva Europea 2002/24/CE, è da sottolineare che per tali cicli vige lo standard europeo EN 15194, che però la maggior parte dei paesi europei non ha introdotto come obbligo di conformità, lasciando quindi ai costruttori la possibilità di autocertificare la rispondenza dei loro prodotti alle norme così come alla Direttiva Macchine, che pone vincoli per la sicurezza, ed alla direttiva EMC (Compatibilità Elettromagnetica). Pertanto, se un produttore ha a disposizione proprie strutture di collaudo e ritiene che le pedelecs che produce, dopo il debito collaudo, siano conformi alle norme EN 15194, tale produttore può certificare i propri prodotti.

Mentre le norme EN 15194 riguardano esclusivamente la parte elettrica del veicolo, per la parte ciclistica si applicano le norme EN 14764; quindi, il veicolo deve essere dotato di una serie di istruzioni, utili all'acquirente, e della marcatura di seguito esplicita.

Marcatatura:

1. sul telaio deve essere riportato in modo evidente e permanente un numero di serie, in una posizione facilmente visibile;
2. sul telaio deve essere indicato in modo evidente e permanente il nome del produttore, o del rappresentante del produttore, ed il numero di standard europeo pertinente, cioè EN 14764;
3. nei pochi stati membri dell' UE (ad esempio, Francia), in cui vige l'obbligo di conformità alle norme EN15194, sul veicolo deve essere indicata in modo duraturo la seguente dicitura: *EPAC conforme a EN 15194*. In tutti gli altri stati membri, invece, tale dicitura non risulta obbligatoria.

All'inizio del 2010, inoltre, la Commissione Europea ha definitivamente confermato che i cicli a pedalata assistita definiti dalla Direttiva Europea 2002/24/CE rientrano nell'ambito di applicazione della Direttiva 2006/42/CE, ossia della Direttiva Macchine. La maggior parte dei requisiti contenuti in quest'ultima risultano già previsti dalle norme EN 15194 , pertanto la fase

successiva sarà la pubblicazione del riferimento dello standard nella Gazzetta Ufficiale, che trasformerà le norme EN 15194 in uno standard armonizzato nell'ambito della Direttiva Macchine. Ciò significa che una pedelec conforme alle norme EN 15194 sarà presunta conforme alla Direttiva 2006/42/CE. La Direttiva Macchine, tuttavia, impone qualche obbligo amministrativo aggiuntivo per i produttori; essi, infatti, devono tenere a disposizione la documentazione tecnica completa del prodotto e devono allegare alla pedelec una Dichiarazione di conformità CE.

Infine, il veicolo deve essere dotato della marcatura di conformità CE costituita dall'omonimo simbolo "CE"; tale marcatura deve essere visibile, leggibile e indelebile e deve essere apposta sulla pedelec accanto al nome del produttore, o del suo rappresentante autorizzato. La marcatura, tuttavia, può essere apposta solo se la pedelec è conforme anche alla Direttiva 2004/108/CE, relativa alla Compatibilità Elettromagnetica.

Tutti i dispositivi elettrici, infatti, si influenzano a vicenda quando vengono collegati tra di loro o se sono posizionati in prossimità; lo scopo della Compatibilità Elettromagnetica (EMC) è tenere questi effetti collaterali sotto ragionevole controllo. La direttiva EMC richiede che le pedelecs siano identificate per tipo, lotto, numero di serie o qualsiasi altra informazione che consenta l'identificazione del veicolo; per facilitare la tracciabilità, l'effettivo produttore deve essere identificato con nome e indirizzo.

Infine, visto che uno dei principali rischi associati al trasporto di batterie e di apparecchiature con alimentazione a batteria è il cortocircuito della stessa, dovuto al contatto dei terminali con altre batterie, oggetti di metallo o superfici conduttive, di conseguenza, tale trasporto è soggetto a norme molto rigorose, armonizzate a livello internazionale.

Qualsiasi batteria agli ioni di litio con energia superiore a 100 Wh è classificata come CLASS 9 - MISCELLANEOUS DANGEROUS GOODS (Classe 9 - Merci pericolose varie) in base alle norme sul trasporto di merci pericolose su strada (ADR) e per via aerea (IATA & ICAO). Le batterie agli ioni di litio per pedelec hanno più di 100 Wh e quindi il trasporto deve essere conforme a tali norme. Dato che le batterie possono contenere metalli come zinco, rame, manganese, litio e nickel, che comportano rischi per l'ambiente e per la salute degli esseri umani se le batterie non vengono smaltite in modo corretto, la raccolta, il riciclaggio, il trattamento e lo smaltimento di batterie e accumulatori sono regolamentati a livello europeo dalla Direttiva 2006/66/CE, conosciuta anche come Direttiva Batterie.

Tale direttiva proibisce anche l'introduzione sul mercato della maggior parte delle batterie e degli accumulatori con un determinato contenuto di mercurio o cadmio. La direttiva si applica a tutte le batterie e quindi comprende anche le batterie agli ioni di litio (Li-Ion), comunemente utilizzate

sulle biciclette elettriche. Queste batterie sono classificate come “batterie industriali” ed, attualmente, il loro smaltimento in discariche o in inceneritori non é piú consentito; risulta essere compito dei produttori di batterie, infatti, finanziare i costi da sostenere per la raccolta, il trattamento e il riciclaggio dei rifiuti di batterie.

Qui di seguito si possono trovare le misure specifiche da applicare alle batterie industriali:

- al momento della prima immissione sul mercato delle batterie i produttori devono essere inseriti in un registro nazionale tenuto da tutti gli Stati membri;
- i produttori di batterie industriali, o i terzi che agiscono in loro nome, hanno l’obbligo di riprendere i rifiuti di batterie industriali;
- le batterie industriali devono essere facilmente rimovibili dalle biciclette elettriche; se la batteria é integrata nella bicicletta, questa deve essere corredata di istruzioni che indicano sia come rimuovere la batteria senza pericolo sia chi é la persona piú adatta ad eseguire questa operazione;
- le batterie devono essere dotate di apposita etichetta con il simbolo della raccolta differenziata (un bidone della spazzatura con ruote barrato da una croce) e dell’indicazione del contenuto di metalli pesanti;
- tutte le batterie industriali raccolte devono essere riciclate;
- non é possibile smaltire le batterie industriali in discariche o in inceneritori.

## Capitolo 3

# Tipologia di movimentazione

Esistono varie tipologie di motori per cicli a pedalata assistita; esse si differenziano sostanzialmente per la loro ubicazione nella bici e si possono, pertanto, definire 3 gruppi distinti:

1. **Motori sul mozzo anteriore:** sono il sistema piú semplice e spesso meno costoso. I vantaggi che ne derivano sono la facilitá nel montaggio, in quanto non interferiscono con i pedali o la catena, e l'elevata stabilitá del mezzo. Per quanto riguarda gli svantaggi, tale tipologia risulta poco efficiente in caso di asfalto scivoloso (pioggia), su sterrati o in salita, in quanto la ruota anteriore, con meno carico rispetto a quella posteriore, rischia di slittare. Tale tipologia risulta, quindi, ideale nel caso di percorsi semplici e pianeggianti.



**Figura 3.1:** *Bicicletta elettrica a pedalata assistita con motore situato sul mozzo anteriore.*

2. **Motori sul mozzo posteriore:** con questo tipo di motori non ci sono i rischi di slittamento della ruota, come nel caso precedente. Tra i possibili svantaggi riguardanti tale tipologia, si ricorda che il montaggio risulta piú difficile, in quanto vi potrebbero essere interferenze con il

cambio; in caso di foratura, inoltre, hanno anche l'inconveniente di rendere piú difficile la sostituzione della ruota, in quanto prima di tutto risulta obbligatorio scollegare il cavo del motore, operazione piuttosto delicata se non é presente uno sgancio rapido del cavo. Tuttavia, tra i vantaggi, si ricorda che i motori al mozzo posteriore sono ottimi per un uso urbano o trekking, tanto che molte bici, anche di fascia alta, sono basate su questa soluzione.



**Figura 3.2:** *Bicicletta elettrica a pedalata assistita con motore situato sul mozzo posteriore.*

- 3. Motori montati centralmente:** i motori montati centralmente, al livello dei pedali, agiscono direttamente sul sistema di trasmissione della bici. Per quanto riguarda gli svantaggi, essi sono piú complicati da montare, e richiedono in genere un telaio apposito; tuttavia, hanno il vantaggio di non interferire con il montaggio e lo smontaggio delle ruote. Inoltre, essendo solidali al telaio, e non posizionati su masse sospese come i motori al mozzo, temono meno le buche, tanto da essere una scelta praticamente obbligata per le mountain bike elettriche.



**Figura 3.3:** *Bicicletta elettrica a pedalata assistita con motore montato centralmente.*

C'è anche una differenza relativa ai regimi di rotazione dei due tipi di motore. I motori al mozzo (detti anche "hub") sono vincolati al numero di rotazioni della ruota su cui si trovano; questo determina il fatto che nelle fasi di partenza, quando la ruota gira lentamente, anche il motore debba

erogare la sua potenza a bassi regimi di rotazione, in maniera quindi poco efficiente ed assorbendo molta energia dalla batteria; la stessa cosa accade, ad esempio, nelle salite ripide. I motori montati sul movimento centrale, invece, poiché agiscono sulla trasmissione, possono lavorare sempre ad un regime di rotazione ottimale, a patto di utilizzare bene il cambio, con conseguente minor consumo.

Nella maggior parte dei casi, inoltre, i motori centrali sono abbinati a sensori di torsione, i quali misurano lo sforzo del ciclista e determinano, quindi, una pedalata piú naturale. I motori al mozzo, invece, sono spesso abbinati a semplici sensori di pedalata, che determinano una guida meno naturale ma, al contempo, permettono la cosiddetta “pedalata simbolica”; in questo ambito, il mercato mondiale sembra andare decisamente verso la direzione dei motori sul movimento centrale, in quanto preferiti da quasi tutte le grandi aziende del settore.

# Capitolo 4

## Tipologia di motore e sensoristica utilizzata

Dopo aver analizzato le possibili ubicazioni che il motore può occupare nei cicli a pedalata assistita, si passa ora alla descrizione dettagliata del motore elettrico e dei vari sensori presenti in una generica pedelec.

### 4.1 Motore



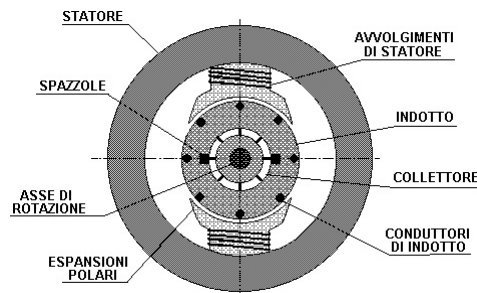
**Figura 4.1:** *Generico motore al mozzo per biciclette elettriche a pedalata assistita.*

In primo luogo, pertanto, si andranno ad analizzare le tipologie di motori utilizzabili. Innanzitutto, questi sono motori elettrici in corrente continua, con tensioni che vanno normalmente da 12 V a 48 V, e li si possono suddividere in due grandi categorie: quelli “con spazzole” (“brushed”) e quelli “senza spazzole” (noti anche come “brushless”). Quest’ultima, essendo la tecnologia più adottata oggi, presenta la caratteristica fondamentale di non dover adottare un sistema di contatti su lamelle solidali al rotore. Pertanto, i vantaggi che ne derivano sono che il motore brushless risulta essere più leggero, più piccolo, più efficiente, e meno sottoposto a guasti.

Si procede comunque con l'analisi dettagliata di tali due tipologie, affrontando, in primo luogo, il funzionamento del motore provvisto di spazzole, la cui descrizione permette di delineare le caratteristiche principali del generico motore in corrente continua:

- **Motore CC con spazzole (“Brushed”)**

La struttura base di un motore a corrente continua con spazzole é del tipo rappresentato in Figura 4.2.

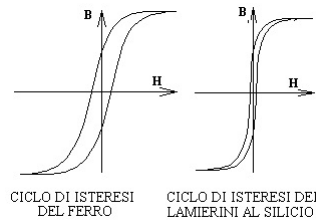


**Figura 4.2:** *Schema semplificato di un motore in corrente continua con spazzole.*

Lo statore é costituito da un monoblocco di acciaio, mentre le espansioni polari, essendo soggette ad un flusso magnetico variabile, sono realizzate in lamierini al silicio al 4 % o 5 % per minimizzare le perdite per isteresi e correnti parassite.

Analogamente l'indotto, essendo anch'esso soggetto a flusso magnetico variabile, é realizzato in lamierini al silicio avvitati fra loro e fissati insieme attorno ad un asse meccanico di rotazione, realizzato in acciaio, ruotante su boccole di ottone o su cuscinetti a sfere per ridurre al minimo l'attrito.

Il silicio, presente in lega assieme al ferro dei lamierini, riduce l'area del ciclo di isteresi, che é eguale all'energia persa per unitá di volume nel nucleo ferromagnetico ad ogni ciclo compiuto.



**Figura 4.3:** *Comparazione tra i cicli di isteresi relativi al ferro e ai lamierini al silicio.*

Queste rappresentazioni chiariscono il motivo per cui il nucleo magnetico dello statore, che é soggetto ad un flusso costante, si realizza in acciaio o in ferro, mentre i nuclei magnetici, sottoposti a flusso variabile, si realizzino invece in lamierini al silicio.

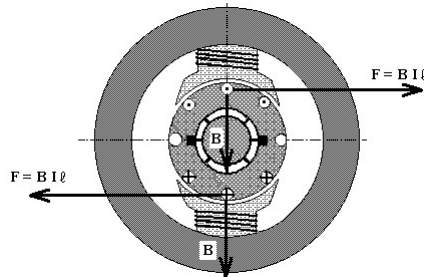
Attorno alle espansioni polari sono avvolte le bobine dei campi di statore, che sono collegate in serie e la cui corrente continua determina il flusso magnetico all'interno del motore.

Le spazzole, costituite da carboncini di grafite, sono contatti striscianti sul collettore che consentono l'immissione della corrente nei conduttori attivi del rotore, determinando la coppia motrice e, di conseguenza, la rotazione del motore.

Si passa ora allo studio del principio di funzionamento di tale motore. La corrente elettrica passa in un avvolgimento di spire che si trova nel rotore; tale avvolgimento, essendo composto da fili di rame, crea un campo elettromagnetico al passaggio di corrente. Questo campo elettromagnetico risulta essere immerso in un altro campo magnetico creato dallo statore, il quale é caratterizzato dalla presenza di una o piú coppie polari. A causa dell'induzione elettromagnetica il rotore inizia a girare, in quanto il suo campo magnetico tende ad allinearsi con quello dello statore. Durante la rotazione il sistema spazzole-collettore commuta l'alimentazione elettrica degli avvolgimenti del rotore in modo che i campi magnetici di statore e di rotore non raggiungano mai l'allineamento perfetto; in questo modo si arriva ad ottenere la continuitá della rotazione. Si sa dall'elettrotecnica, ed in particolare dalla legge di Lorentz, che un conduttore di lunghezza  $l$ , percorso da corrente elettrica  $I$  ed immerso in un campo magnetico di induzione  $B$ , é sottoposto ad una forza  $F$  di valore:

$$F = BI l$$

Nel motore, gli avvolgimenti di statore, percorsi da corrente continua, determinano un flusso magnetico costante  $\phi = BS$ , il quale entra nell'indotto investendo i conduttori attivi posti lungo la superficie esterna del rotore.



**Figura 4.4:** Forze agenti su un singolo conduttore.

Questi, essendo attraversati dalla corrente di indotto immessa, come si è detto, attraverso le spazzole, sono soggetti alla forza  $F$  che, moltiplicata per il braccio  $b$  costituito dal raggio del rotore, dá luogo alla coppia motrice  $\tau$ :

$$\tau = bBIl$$

Se i conduttori attivi, esternamente disposti sono  $N$ , la coppia motrice sarà:

$$\tau = NbBIl$$

(Il verso della forza lo si può determinare con la ben nota regola della mano destra.)

Se i conduttori nella parte superiore dell' indotto sono percorsi da corrente uscente, nella parte inferiore lo sono da corrente entrante, perciò le due forze saranno rivolte una a destra e una a sinistra, come in Figura 4.4; la coppia motrice totale sarà, quindi, data dalla somma delle coppie di tutti i conduttori attivi disposti lungo il bordo dell'indotto.

La coppia motrice così prodotta determina la rotazione dell'indotto, portando i conduttori attivi percorsi da corrente uscente ad allontanarsi dal polo Nord sotto il quale si trovavano e andando, quindi, a posizionarsi in corrispondenza del polo Sud; in questo modo, si determina una coppia di valore opposto alla precedente, la quale impedirebbe ogni ulteriore rotazione dell'indotto.

Per consentire, invece, che la coppia motrice abbia sempre lo stesso verso, e che quindi i conduttori che vanno a posizionarsi sotto il polo Sud siano sempre percorsi da corrente con verso opposto a quelli posizionati sotto il polo Nord, i conduttori non saranno attraversati da corrente di verso costante, ma il verso della corrente verrà continuamente invertito, ogni mezzo giro, da un commutatore rotante detto “collettore”, costituito da tante lamelle di rame disposte lungo il bordo del rotore, essendo da questo ben isolate. Il verso delle correnti viene quindi definito “posizionale”.

A queste lamelle fanno capo tutti i conduttori attivi dell’indotto, e su queste lamelle strisciano le spazzole che consentono l’immissione della corrente continua da una struttura fissa, lo statore, ad una rotante, l’indotto.

Dalla formula ricavata per la coppia motrice  $\tau$  si deduce che, per aver un motore di considerevole coppia, é necessario che lo statore produca una grande induzione magnetica  $B$  e che nell’indotto vi siano molti conduttori  $N$  percorsi da grande corrente  $I$ .

I conduttori di indotto sono allocati in apposite cave tracciate all’interno del rotore; pertanto, se il loro numero deve essere alto, la sezione non può essere grande, mentre, viceversa, se devono essere percorsi da corrente intensa, allora la loro sezione deve essere grande e nelle cave ne possono quindi entrare pochi.

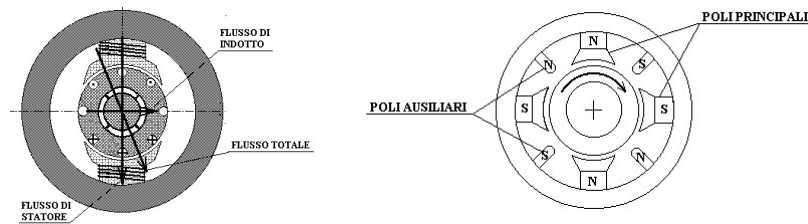
La scelta va naturalmente ottimizzata, scegliendo caso per caso la soluzione più conveniente. Se il motore é alimentato con bassa tensione, per esempio, allora si sceglie la soluzione di un solo conduttore ma di grande sezione, per consentire il passaggio di correnti intense, come avviene nel motorino d’avviamento degli autoveicoli, mentre se l’alimentazione é a tensione più elevata, si preferiscono molti conduttori ma di sezione piccola.

Analogamente si procede per gli avvolgimenti di statore, dove il flusso magnetico necessario é prodotto, per la legge di Hopkinson, dalle amperspire:

$$NI = R\phi$$

Anche qui la forza magnetomotrice  $NI$  necessaria per produrre il flusso  $\phi$ , può essere prodotta da poche spire percorse da corrente intensa o da molte spire percorse da piccola corrente.

Un problema che caratterizza tale tipologia di motore elettrico é la presenza della cosiddetta reazione d'indotto. Infatti, la corrente che attraversa l'avvolgimento d'indotto determina un nuovo flusso magnetico che va ad interagire con quello prodotto dallo statore, causandone una riduzione del valore in seguito alla non linearit  della caratteristica di magnetizzazione.



**Figura 4.5:** *A sinistra: schematizzazione della reazione d' indotto. A destra: aggiunta di poli ausiliari per la risoluzione della problematica relativa alla reazione d'indotto.*

Si pu  ovviare alla reazione d'indotto in varie maniere. Se il motore   di piccola potenza, la si pu  ignorare, in quanto il peggioramento che ne deriva, in termini di rendimento, risulta essere trascurabile; se, invece, il motore   di considerevole potenza, allora si pu  costituire un sistema di spazzole regolabili in posizione angolare in modo da compensare al meglio la reazione d'indotto.

Tuttavia, il metodo pi  utilizzato per risolvere tale problematica consiste nell'aggiunta di coppie di poli ausiliari, i quali, posti nello statore, vengono attraversati dalla corrente di indotto con un verso tale da opporsi alla reazione stessa, in modo da annullarne quasi completamente gli effetti.

Per quanto riguarda la coppia  $\tau$ , indicando con  $\phi$  il flusso per spira e con  $i_a$  la corrente di armatura, essa pu  essere definita dalla seguente relazione generica:

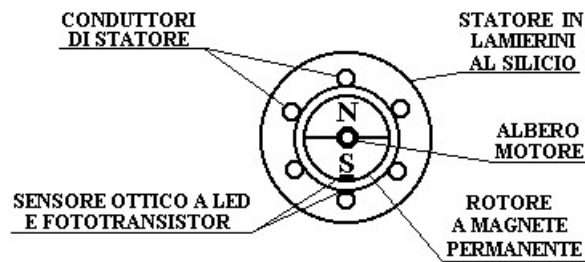
$$\tau = K_\tau \phi i_a$$

Si deduce facilmente che, per ottenere un aumento di coppia, risulta necessario aumentare il flusso magnetico, e di conseguenza la corrente; tuttavia, l'aumento di corrente non deve superare il valore di corrente nominale caratterizzante il motore, altrimenti si giungerebbe a perdite dissipative eccessive per effetto di saturazione.

Concludendo, quindi, tale descrizione del motore in corrente continua con spazzole, si può affermare che, per poter variare la coppia si può agire su  $i_a$  (corrente di armatura) oppure su  $i_e$  (corrente di eccitazione); tuttavia, visto che la corrente  $i_e$  risulta più “lenta”, in quanto presenta una costante di tempo maggiore, solitamente si preferisce variare la corrente di armatura  $i_a$ . A causa di tale differenza presente tra  $i_a$  ed  $i_e$ , nel motore si instaura solitamente un regime oscillatorio.

- **Motore CC senza spazzole (“Brushless”)**

Dopo aver analizzato in dettaglio le peculiarità relative al generico motore in corrente continua, provvisto di spazzole, si passa ora allo studio del motore che caratterizza la stragrande maggioranza dei cicli a pedalata assistita, ossia il cosiddetto motore brushless, il quale non comporta la presenza di spazzole.



**Figura 4.6:** Schema semplificato di un motore in corrente continua senza spazzole.

Innanzitutto, “brushless” significa senza spazzole, e tale affermazione sta ad indicare che agli avvolgimenti rotorici non viene inviata alcuna corrente; di conseguenza, non vi è la necessità di introdurre contatti elettrici striscianti, i quali, come si sa, costituiscono il punto debole delle macchine elettriche dal punto di vista della durata, della sicurezza del funzionamento, della silenziosità e dell’affidabilità.

Il motore brushless, quindi, risulta essere un motore elettrico a corrente continua con il rotore a magneti permanenti e lo statore a campo magnetico rotante, dove ha sede l’avvolgimento di eccitazione. La commutazione della corrente circolante negli avvolgimenti dello statore, e quindi la variazione dell’orientamento del campo magnetico da essi generato, avviene elettronicamente. Ciò comporta una minore resistenza meccanica ed una maggiore silenziosità, elimina la possibilità che si for-

mino scintille al crescere della velocità di rotazione ed, in particolare, riduce notevolmente la necessità di manutenzione periodica.

Tuttavia, cerchiamo di dare uno sguardo piú approfondito ai vantaggi che caratterizzano tale tipologia di motore elettrico. L'eliminazione delle spazzole, innanzitutto, provoca un aumento della vita attesa del motore ed una notevole diminuzione della principale fonte di rumore elettromagnetico; l'ingombro risulta essere limitato rispetto alla potenza ed, in particolare, rispetto alla coppia che tali motori riescono ad erogare. L'assenza di scintille risulta particolarmente fondamentale quando il motore si trova costretto ad operare in ambienti saturi di composti chimici volatili come, ad esempio, i carburanti; é da sottolineare, tuttavia, che tali ambienti non riguardano la tematica che si sta affrontando, in quanto relativa ai cicli a pedalata assistita.

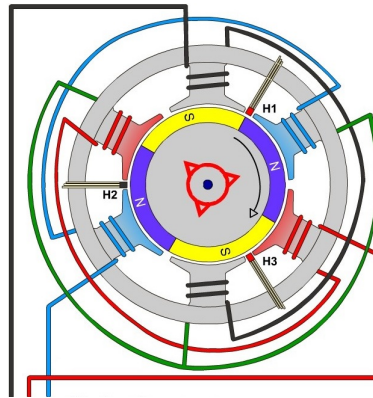
Un ulteriore aspetto riguarda i magneti permanenti, i quali, oltre ad essere posizionati sul rotore, sono realizzati con materiali ferromagnetici (ad esempio, ferro, nichel, cobalto, alcune terre rare, alcuni minerali naturali come la magnetite) che permettono di ottenere un'inertza rotorica molto bassa; tale caratteristica permette, quindi, di avere un controllo estremamente preciso sia in velocità sia in accelerazione.

Infine, risulta doveroso ricordare che, per i vantaggi sopra elencati, il rendimento di queste macchine risulta essere piuttosto elevato, con valori che possono raggiungere anche lo 0.98.

Passando ora all'analisi dei principali svantaggi caratterizzanti i motori brushless, a differenza di quelli a spazzole, il controllo dei motori senza spazzole viene effettuato elettronicamente tramite un controller; pertanto, oltre al costo del motore, deve essere sommato anche il costo del sistema di controllo. Per i motori a spazzole, invece, il controllo per la regolazione della velocità viene realizzato tramite un potenziometro o un reostato, i quali, anche se rappresentano sistemi poco efficienti, risultano essere estremamente economici; la resistenza variabile di un potenziometro o di un reostato, infatti, permette di variare l'intensità di corrente assorbita dai motori. Tale metodo di controllo non risulta pertanto applicabile al motore brushless, il quale deve essere controllato da un suo determinato controller.

In conclusione, quindi, il principale svantaggio caratterizzante i motori brushless risiede nel maggiore costo, in quanto essi necessitano di un complicato sistema di controllo elettronico della velocità e di un generatore particolare di tensione, il quale genera tensioni trapezoidali, a sua volta controllate da un sensore di posizione di tipo ottico o magnetico.

Pertanto, avendo definito le caratteristiche generali riguardanti il motore brushless, con i rispettivi vantaggi e svantaggi, si procede ora con l'analisi del principio di funzionamento di tale tipologia di motore elettrico.



**Figura 4.7:** *Schema semplificato di un generico motore brushless.*

Il motore in corrente continua senza spazzole viene definito anche “sincrono”, in quanto il campo magnetico generato dallo statore e il rotore girano alla stessa frequenza.

Lo statore ed il rotore sono entrambi a forma di corona cilindrica di materiale ferromagnetico laminato e separati da un traferro in aria. Sul rotore trovano posto i magneti permanenti; dato che essi presentano generalmente una permeabilità magnetica differenziale molto simile a quella dell'aria, a seconda della loro disposizione e della forma del rotore si possono ottenere strutture di rotore isotrope oppure anisotrope dal punto di vista magnetico, che caratterizzano rispettivamente i motori brushless SPM (Surface Permanent Magnet) ed IPM (Interior Permanent Magnet).

L'avvolgimento di statore é di tipo trifase; le tre fasi sono reciprocamente sfasate nello spazio di  $\frac{2\pi}{3}$ , e ciascuna fa capo ad una coppia di morsetti indicati con aa', bb', cc', attraverso i quali é possibile fornire loro alimentazione da una sorgente trifase esterna. I conduttori che compongono ciascuna fase sono distribuiti lungo le cave statoriche, ricavate secondo la direzione delle generatrici del cilindro di statore; quando alimentato, l'avvolgimento di statore produce un campo magnetico che va ad interagire con i magneti sul rotore: é in questo modo che si riesce a mettere in rotazione il rotore e a produrre, pertanto, il moto.

Per quanto riguarda i magneti permanenti, il numero di coppie di poli N-S va da due a otto. Aumentando il numero di coppie di magneti, di conseguenza aumenta la coppia e si riduce la cosiddetta “cogging torque” (o “coppia di puntamento”), uniformando l’erogazione di potenza del motore, al prezzo però di una maggiore complessità del sistema di controllo, di un costo superiore e di una velocità massima inferiore.

La sorgente di alimentazione è solitamente la rete trifase di distribuzione; da essa è possibile ottenere una tensione continua  $U_{dc}$  mediante raddrizzatori a diodi; la tensione  $U_{dc}$  andrà quindi ad alimentare il blocco invertitore di tensione (o inverter). L’inverter è un convertitore statico che trasforma la tensione continua in tre tensioni alternate, di cui è possibile regolare la frequenza e l’ampiezza, che saranno poi le tensioni di fase che alimentano il motore. Il termine “alternate”, riferito alle tensioni appena citate, non implica che queste siano obbligatoriamente sinusoidali. Infatti, attualmente sono presenti tre tipologie distinte per il controllo dei motori brushless, ed ognuna di esse, per poter attuare ciò, utilizza una forma d’onda caratteristica; esse sono: controllo sinusoidale, controllo trapezoidale e controllo a campo commutato. Quest’ultima tipologia, presentando una maggiore semplicità di pilotaggio, risulta essere quella maggiormente adottata nel campo delle pedelec e prevede che l’inverter alimenti due fasi alla volta, diversamente dal controllo sinusoidale in cui l’alimentazione viene inviata contemporaneamente a tutte e tre le fasi. Pertanto, tornando all’inverter, già qui si può intuire che la sua funzione risulta simile a quella del sistema spazzole-collettore del motore provvisto di spazzole.

Tuttavia, affinché si possa risolvere il problema dell’oscillazione di coppia dovuta alla “cogging torque”, ossia la coppia di puntamento, risulta necessario applicare lo *skewing*, che consiste nel posizionare i magneti permanenti stessi lungo direzioni inclinate di una certa quantità rispetto alle direttrici del cilindro.

La coppia  $\tau$  può essere descritta dalla seguente relazione:

$$\tau = K\lambda_{mg}I\sin(\alpha)$$

dove  $K$  è una costante che dipende dal numero di poli del motore,  $\lambda_{mg}$  è il massimo flusso concatenato dalla fase  $a$  e prodotto dal magnete permanente e  $I$  è l’ampiezza della corrente di fase di statore. La coppia è massima, a parità di modulo della corrente, quando  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , ovvero quando il fasore della corrente si sovrappone a quello della forza

contro-elettromotrice. Risulta evidente che il corretto funzionamento del motore brushless é legato alla conoscenza esatta della posizione del flusso del magnete permanente, ovvero del rotore. Il motore sincrono a magneti permanenti necessita dunque di un sensore di posizione assoluto, che si analizzerá meglio in seguito.

Se indichiamo con  $\theta_m$  la posizione assoluta del flusso del magnete permanente rispetto allo statore, ossia la posizione assoluta del rotore rispetto allo statore, il riferimento di corrente per la fase  $a$  che realizza il massimo rapporto coppia/corrente é dato dalla seguente espressione:

$$I^*_a = I \cos(\theta_m + \frac{\pi}{2}) = -I \sin(\theta_m)$$

e, naturalmente, visto che le fasi  $b$  e  $c$  risultano sfasate rispettivamente di  $\frac{2\pi}{3}$  e  $\frac{4\pi}{3}$ , valgono anche:

$$I^*_b = I \cos(\theta_m - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2}) = -I \sin(\theta_m - \frac{2\pi}{3})$$

$$I^*_c = I \cos(\theta_m - \frac{4\pi}{3} + \frac{\pi}{2}) = -I \sin(\theta_m - \frac{4\pi}{3})$$

Definendo con  $\Lambda_{mg}$  il flusso del magnete permanente e definendo i flussi concatenati con le singole fasi attraverso le seguenti equazioni:

$$\lambda_{a,mg} = \Lambda_{mg} \cos(\theta_m)$$

$$\lambda_{b,mg} = \Lambda_{mg} \cos(\theta_m - \frac{2\pi}{3})$$

$$\lambda_{c,mg} = \Lambda_{mg} \cos(\theta_m - \frac{4\pi}{3})$$

si possono ricavare le seguenti espressioni:

$$u_s^s = R i_s^s + L_s \frac{d i_s^s}{dt} + e_s^s$$

$$e_s^s = j\omega_{me} \lambda_{mg}^s = j\omega_{me} (\lambda_{\alpha,mg} + \lambda_{\beta,mg})$$

dove l'apice  $s$  sta ad indicare che le equazioni valgono in un sistema di riferimento stazionario, dotato di assi cartesiani  $\alpha$  e  $\beta$ ;  $u_s^s$  indica la tensione di statore, mentre  $e_s^s$  indica la forza contro-elettromotrice.

A questo punto, essendo in presenza di un sistema di equazioni sinusoidali, al fine di poter controllare il motore in maniera piú semplice, consideriamo un sistema di riferimento, di assi cartesiani  $d$  e  $q$ , che ruota con velocità  $\omega_{me}$  pari alla velocità del vettore  $i_s^s$ ; tale vettore, pertanto, risulterà fermo nel nuovo sistema di riferimento.

Attraverso una serie di passaggi algebrici si possono ricavare le espressioni della tensione di statore riportata ai due assi cartesiani  $d$  e  $q$  del nuovo sistema di riferimento:

$$u_d = Ri_d + L_s \frac{di_d}{dt} - \omega_{me} L_s i_q$$

$$u_q = Ri_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \omega_{me} L_s i_d + \omega_{me} \lambda_{mg}$$

dove le correnti  $i_d$  e  $i_q$  sono ottenute riportando la corrente di statore sugli assi cartesiani del nuovo sistema di riferimento.

In conclusione, quindi, indicando con  $p$  il numero di poli ed attuando un metodo basato sul bilancio energetico, si può definire l'espressione generale della coppia che caratterizza i motori brushless:

$$\tau = \frac{3}{2} p \Lambda_{mg} i_q$$

## 4.2 Sensori

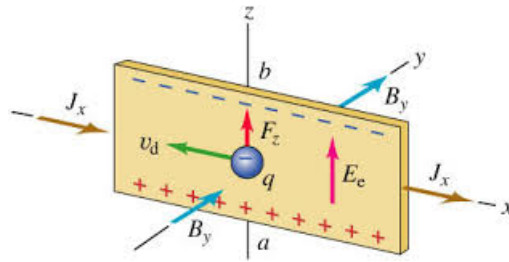
Avendo quindi concluso la panoramica riguardante il motore che caratterizza i cicli a pedalata assistita, si procede con l'analisi dei vari sensori presenti in una pedelec.

In primo luogo, consideriamo il sensore che risulta essere parte integrante del motore brushless, in quanto necessario per attuare poi il controllo del motore stesso: il sensore ad effetto Hall.

- **Sensore ad effetto Hall**

Prima di introdurre il funzionamento di tale sensore, si introduce una breve spiegazione riguardante l'effetto Hall.

Sostanzialmente, tale fenomeno consiste nella formazione di una differenza di potenziale, detto "potenziale di Hall", sulle facce opposte di un conduttore elettrico, dovuta ad un campo magnetico perpendicolare alla corrente elettrica che scorre in esso.



**Figura 4.8:** Schema semplificato dell'effetto Hall.

Nella Figura 4.8 sono indicati:

- il singolo elettrone, tramite la lettera  $q$ ;
- l'elemento di Hall;
- il campo magnetico  $B_y$ , prodotto dal magnete;
- la corrente  $J_x$ , immessa nell'elemento di Hall tramite un'apposita batteria;
- il campo elettrico  $E_c$ .

Normalmente, l'elemento di Hall risulta essere formato da una striscia di materiale che può condurre elettricità, solitamente un metallo conduttore o un semiconduttore. Si utilizza una striscia in quanto essa può essere identificata solo tramite due grandezze dimensionali, visto che lo spessore viene ad essere trascurabile rispetto alle altre due.

Applicando una batteria ai capi di tale materiale, in esso viene fatta scorrere una corrente, in cui gli elettroni si muovono dal polo negativo a quello positivo della batteria. Il magnete genera un campo magnetico il cui verso va dal polo Nord al polo Sud dello stesso magnete; l'elemento di Hall risulta, quindi, essere immerso in questo campo magnetico.

Gli elettroni, pertanto, si muovono all'interno dei conduttori ed, in seguito all'azione del campo magnetico, su di loro viene ad agire la forza di Lorentz:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

dove con  $q$  si indica la carica dell'elettrone, pari a  $-1.6 \times 10^{-19}$  C, con  $v$  si identifica la velocità dell'elettrone, mentre con  $B$  si definisce il campo magnetico.

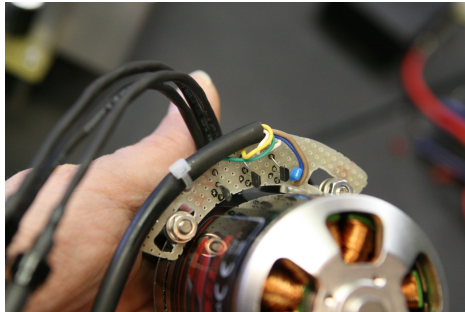
Visto che tale prodotto risulta essere un prodotto vettoriale,  $F$ ,  $v$  e  $B$  formano una terna destrorsa fra di loro; gli elettroni, pertanto, subiscono una forza di Lorentz (diretta verso l'alto) che porterá alla nascita di un addensamento di cariche negative nella parte superiore dell'elemento di Hall e, per la neutralitá totale dell'elemento stesso, un addensamento di cariche positive nella parte inferiore; la differenza di potenziale misurata fra la parte alta e quella bassa si definisce tensione di Hall.

In conclusione, quindi, quando tutte le variazioni diventano trascurabili (ossia a regime), si viene a creare un equilibrio di forze fra il campo elettrico longitudinale, quello che genera la tensione di Hall, e la forza di Lorentz. Ovvero:

$$qE = qv_d B$$

dove  $q$  indica la carica dell'elettrone,  $E$  indica il modulo del campo elettrico longitudinale,  $B$  definisce il modulo del campo magnetico, mentre  $v_d$  identifica la velocitá degli elettroni, detta "velocitá di drift" (o di deriva).

Avendo quindi introdotto l'effetto Hall, si prosegue con la descrizione del funzionamento del sensore ad effetto Hall.

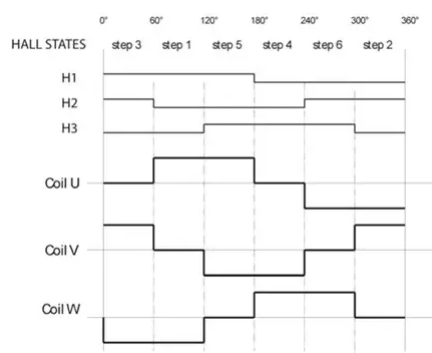


**Figura 4.9:** *Sensori ad effetto Hall presenti in un generico motore brushless.*

Tale sensore risulta essere composto da un elemento sensibile accoppiato ad un magnete, contenuto in un contenitore ermetico, che rileva la variazione del flusso di campo magnetico quando un corpo in materiale ferromagnetico si avvicina e si allontana. Il dispositivo puó lavorare idealmente da frequenza zero fino a qualche KHz. Questa tipologia di sensori risulta particolarmente robusta: presenta la possibilitá di lavorare in ambienti ostili, quindi in presenza di polveri e sporco, alte temperature, in contatto con fluidi in pressione ed, inoltre, risulta essere in grado di accettare ampi range di tensione di alimentazione; infatti,

a conferma di tale robustezza, una delle piú importanti caratteristiche di questo sensore risulta essere l'elevata resistenza agli shock meccanici. Questi sensori forniscono, inoltre, un segnale molto preciso, ripetibile e veloce (microsecondi), adatto ad essere usato con un microprocessore od un PLC.

Solitamente, il motore utilizza tre sensori ad effetto Hall per indicare la posizione del rotore. Se si indicano con  $U$ ,  $V$  e  $W$  le tre bobine che caratterizzano un generico motore brushless, per capire maggiormente il ruolo del sensore ad effetto Hall si può considerare il seguente schema:



**Figura 4.10:** *Schema riguardante il funzionamento dei tre sensori ad effetto Hall in relazione alle tre bobine di un generico motore brushless.*

Avendo indicato con  $H1$ ,  $H2$  ed  $H3$  i tre sensori ad effetto Hall e con *coil U*, *coil V* e *coil W* le omonime bobine, dalla Figura 4.10 si può facilmente dedurre che solo una coppia di sensori determina quando il microcontrollore deve eccitare una bobina. In questo esempio, i sensori  $H1$  ed  $H2$  determinano la commutazione della bobina  $U$ . Quando  $H2$  rileva un polo magnetico  $N$ , la bobina  $U$  viene eccitata positivamente; quando  $H1$  rileva un polo magnetico  $N$ , la bobina  $U$  viene commutata su aperta; quando  $H2$  rileva un polo magnetico  $S$ , la bobina  $U$  viene commutata su negativa e, infine, quando  $H1$  rileva un polo magnetico  $S$ , la bobina viene commutata nuovamente su aperta. In modo analogo, i sensori  $H2$  ed  $H3$  determinano l'eccitazione della bobina  $V$ , mentre  $H1$  ed  $H3$  si occupano della bobina  $W$ .

In conclusione, quindi, i sensori ad effetto Hall, oltre a trovare applicazione nella misurazione della posizione del motore, vengono utilizzati anche per la misurazione della velocità dello stesso; tale utilizzo, ricopre infatti un'elevata importanza per quanto riguarda il mondo delle pedelecs, in quanto, come già accennato precedentemente, questi cicli,

per essere definiti tali, devono presentare un motore, il cui ausilio sia attivo durante la pedalata dell'utilizzatore, fino alla velocità massima di 25 km/h.

- **Sensore P. A. S. (Pedal Assist System)**



**Figura 4.11:** *Generico sensore P. A. S. per pedelec.*

Innanzitutto, si ricorda che la bicicletta a pedalata assistita, per potersi definire tale, in ottemperanza della Direttiva Europea 2002/24/CE, deve essere *“dotata di un motore elettrico ausiliario avente potenza nominale continua massima di 0.25 kW, la cui alimentazione è progressivamente ridotta e infine interrotta quando viene raggiunta la velocità di 25 km/h o prima, se il ciclista smette di pedalare”*. Affinché si possa realizzare ciò, è necessaria la presenza di un sistema di sensori che rilevi il movimento e trasmetta al motore il segnale di consenso per il suo avviamento.

Il sensore P. A. S. risulta essere il dispositivo più semplice, e anche il più diffuso in Italia, per poter attuare ciò, e consiste nella presenza di un sensore magnetico che rileva semplicemente il movimento dei pedali, consentendo l'azionamento del motore indipendentemente dalla pressione (e quindi dallo sforzo) che si esercita su di essi. Il funzionamento di tale sensore si basa sulla rotazione di un disco, la cosiddetta “ruota fonica”, fissato in modo solidale con i pedali e recante lungo la circonferenza alcuni piccoli magneti orientati. Attraverso il movimento, tali magneti transitano davanti ad un sensore ad effetto Hall, il quale rileva la variazione di flusso del campo magnetico e, di conseguenza, genera un impulso che, inviato alla centralina elettronica, provvede all'avviamento del motore.

Una volta attivato il motore, tale tipo di sensore permette la cosiddetta “pedalata simbolica”: è possibile, in pratica, limitarsi a far girare i pedali, senza svolgere alcuna reale fatica, facendosi trasportare interamente dal motore; tuttavia, affidarsi solamente all'ausilio elettrico

comporta ad una diminuzione notevole dell'autonomia del mezzo. Pertanto, decidendo di pedalare con una certa intensità, ne trarrà beneficio anche l'autonomia stessa.

Tale tipologia di sensori, oltre a presentare elevata affidabilità e semplicità di realizzazione, presenta il vantaggio di essere particolarmente robusta e di poter quindi lavorare in presenza di polvere, sporco e a contatto con liquidi.

Per contro, presenta un certo ritardo alla partenza nell'avvio del motore, in quanto il segnale necessita solitamente di almeno un mezzo giro di pedali prima di essere attivato (allineamento del primo magnete con il sensore); la sensazione di guida, pertanto, risulta spesso poco omogenea. Infatti, mentre sui terreni pianeggianti la frequenza di pedalata consente di raggiungere con relativa facilità e senza sforzo la velocità voluta (oltre che una buona fluidità di marcia), tale svantaggio lo si incontra soprattutto nei tragitti dotati di una certa pendenza, dove la mancanza di un'assistenza più pronta può rivelarsi davvero un punto di debolezza.

Occorre, comunque, aggiungere che più i magneti risultano numerosi e stretti tra loro, più reattivo verrà ad essere il mezzo elettrico. Infatti, le case costruttrici che hanno deciso di adottare, sui loro prodotti, la filosofia del Pedal Assist System, hanno sviluppato soluzioni proprietarie di grande affidabilità; ne è un esempio il sistema Pass TC Mobility, brevettato da Frisbee, adottato sul modello Dolomites e posizionato sull'asse posteriore. Tale sistema agisce con sensore a ruota fonica, con ben 12 magneti lamellari, i quali rilevano il numero di giri di rotazione della ruota per una regolazione di velocità di alta precisione; in tal modo vengono rese possibili partenze in spazi ristretti con qualsiasi rapporto di cambio, definendo vincente tale tipologia proprio nei tratti di salita.

- **Sensore di coppia**

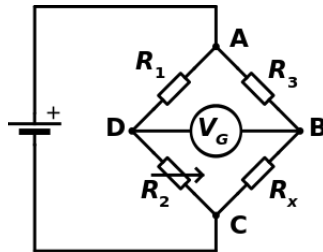


**Figura 4.12:** *Generico sensore di coppia per pedelec.*

L'alternativa ai sensori P. A. S. é rappresentata dai sensori di coppia o di sforzo, i quali, tramite il ponte di Wheatstone, misurano la coppia esercitata sui pedali dall'utilizzatore ed, in funzione di essa, con l'aiuto di specifici software, gestiscono l'erogazione della potenza e dell'assistenza del motore elettrico.

Tale tipo di sensore contribuisce a determinare uno stile piú naturale di pedalata: infatti, il motore si attiva immediatamente in partenza, non appena viene rilevata la pressione del piede sul pedale. Quando si pedala con poca intensitá, anche il motore assiste poco; quando si pedala piú intensamente (in salita, o perché si vuole aumentare la velocitá) anche il motore fornisce maggiore potenza. Pertanto, con tale tipologia di sensore, risulta sempre necessario pedalare veramente: la "pedalata simbolica" non é possibile. Anche per questo motivo, l'autonomia che caratterizza tali pedelecs viene ad essere normalmente maggiore rispetto a quella relativa alle tipologie di bici che adottano il semplice sensore di pedalata. In questo modo, risulta possibile impostare il livello di aiuto necessario alla singola persona, in relazione alle sue necessitá individuali.

Il prossimo passo é quindi la definizione, in linea di massima, dei principi di funzionamento che lo caratterizzano. Prima di procedere nel dettaglio, risulta doveroso spiegare brevemente in cosa consiste il ponte di Wheatstone.



**Figura 4.13:** *Schema elettrico del ponte di Wheatstone.*

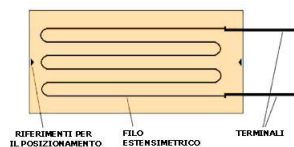
Come si puó vedere in Figura 4.13, quest'ultimo risulta essere formato da quattro resistenze connesse in modo da realizzare una maglia con quattro lati e quattro vertici. Tra due vertici opposti viene collegata una sorgente di alimentazione in corrente continua, mentre tra gli altri due viene inserito un galvanometro. Uno qualsiasi dei quattro lati é costituito dal resistore di resistenza incognita  $R_x$ , mentre gli altri tre lati sono costituiti da resistori le cui resistenze assumono valori noti. Almeno una delle resistenze note deve essere anche variabile (indicata

nella Figura 4.13 con la resistenza  $R_2$ ). Il ponte risulta in equilibrio quando la corrente che attraversa la diagonale di rivelazione é nulla, condizione che, tramite l'utilizzo delle leggi di Kirchhoff, viene ad essere soddisfatta dalla seguente equazione:

$$R_1 R_x = R_3 R_2$$

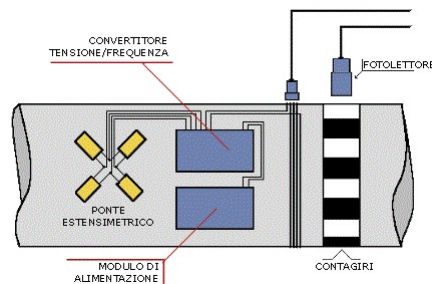
Il prodotto delle resistenze dei due lati opposti eguaglia il prodotto delle altre due.

Pertanto, il sensore di coppia, sostanzialmente, prevede la presenza di un particolare tipo di estensimetro, detto “a ponte intero”, formato da quattro griglie sensibili indipendenti (estensimetri elettrici), orientate secondo le diagonali di un quadrato. Come si può vedere dalla Figura 4.15, le quattro griglie, oltre ad essere posizionate sulla superficie del perno, ossia sull'asse che ruota all'interno della scatola del movimento e sul quale vengono calettate le pedivelle, risultano elettricamente collegate in modo da costituire un ponte di Wheatstone; i quattro vertici, o nodi, del ponte sono portati poi all'esterno tramite quattro terminali.



**Figura 4.14:** *Schema di un estensimetro elettrico.*

In seguito al peso esercitato sui pedali dall'utilizzatore, il perno si deforma localmente; visto che il filo di ciascun estensimetro segue le deformazioni della superficie su cui é incollato, allungandosi ed accorciandosi insieme ad essa, queste variazioni dimensionali causano una variazione della resistenza elettrica del filo. Tali variazioni, essendo connesse all'entità della deformazione, permettono di risalire, in primo luogo, al valore della forza applicata sulle pedivelle e, in secondo luogo, conoscendo la distanza del ponte di Wheatstone dall'estremità del perno, al valore della coppia applicata. Quest'ultimo viene infine inviato alla centralina elettronica di controllo, la quale provvede non solo all'avviamento del motore ma, in funzione dei valori riscontrati, identifica il livello di assistenza da erogare in proporzione allo sforzo esercitato.



**Figura 4.15:** *Schema semplificato di un sensore di coppia.*

Solamente a titolo informativo, risulta utile sottolineare che recentemente sono stati introdotti sul mercato sensori di coppia che, per poter monitorare il valore di coppia, non sfruttano il principio derivante dal ponte di Wheatstone, ma si avvalgono di una serie di proprietà derivanti dall'utilizzo di materiali magneto-elastici. Innanzitutto, risulta doveroso indicare con *effetto magnetostrittivo*, la tendenza di un materiale a deformarsi lungo la direzione di magnetizzazione, in funzione del campo magnetico applicato e, con *effetto piezomagnetico*, il fenomeno (generalmente inverso rispetto alla magnetostrizione) di generazione di campi d'induzione magnetica conseguentemente all'applicazione di sollecitazioni meccaniche, per effetto di una variazione di suscettività magnetica del materiale. Tale tipo di torsionometro, sostanzialmente, prevede la presenza di un componente costruito con materiale magneto-elastico (solitamente risulta essere una lega di titanio e nickel), il quale subisce il peso esercitato sui pedali dall'utilizzatore; per effetto piezomagnetico, la deformazione del materiale genera un campo magnetico differente dalla situazione a riposo. Specifici sensori, anch'essi magnetici, rilevano tale variazione di campo, la quale, essendo connessa all'entità della deformazione, permette di risalire alla forza, e quindi alla coppia applicata. Tuttavia, attualmente, tali sensori vengono utilizzati per lo più in ambito automotive.

Tornando quindi al sensore di coppia caratterizzante le pedelecs, il principale vantaggio derivante dall'utilizzo di tale sistema consiste nella naturalezza della pedalata che accompagna la fatica dell'utilizzatore, interpretando al meglio il concetto di "pedalata assistita". Consente, inoltre, partenze immediate, in quanto è sufficiente toccare anche leggermente i pedali per avviare il motore, portando ad indubbi vantaggi soprattutto in salita; per contro, risulta necessario esercitare sempre un certo sforzo per poter arrivare alla velocità massima.

I sensori di coppia vengono utilizzati soprattutto nei cicli a pedalata assistita caratterizzati dall'utilizzo della tipologia a motore centrale; tuttavia, non mancano esempi di utilizzo di tali sensori nelle pedelecs dotate di motore al mozzo.

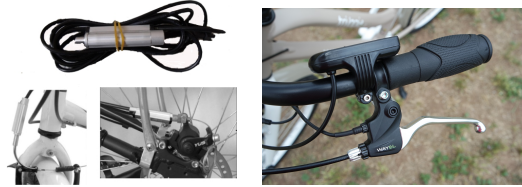
Tra le varie applicazioni reali, un esempio é dato da Italwin, il quale ha sviluppato il sistema *iTorq* che prevede un nuovo sensore senza manutenzione e parti in movimento, caratterizzato da particolare sensibilità e capacità di lavorare con una centralina programmabile in modo parametrico, in maniera tale da poter usufruire di quattro profili che si adattano ad esigenze tra loro diversificate, che vanno dalla sportività richiesta dai piú giovani alla prudenza della clientela piú matura; un altro pregio evidente, inoltre, risulta essere la mancanza dell'effetto on-off tra una pedalata e l'altra, anche se la pedalata non é proprio "rotonda" come quella di un professionista. É stato quindi realizzato un sistema che consente, a seconda del profilo scelto, di poter avere sia la massima assistenza (anche con uno sforzo sui pedali relativo) sia un contributo del motore elettrico piú proporzionale all'effettiva spinta. Tale precisissimo sensore risulta incorporato nel telaio e, pertanto, vi é assoluta libertá nella scelta di pedivelle e movimento centrale.

Risulta doveroso aggiungere che molte aziende interessate al mondo dei cicli a pedalata assistita, tra cui la tedesca Bosch, hanno deciso di adottare, accanto al sensore di sforzo, anche un sensore di velocità di rotazione dei pedali ed uno di velocità della bicicletta, in modo da garantire una pedalata che risulti il piú naturale possibile ed, allo stesso tempo, poter fornire all'utilizzatore informazioni aggiuntive, compresa la quantità di calorie bruciate. Tuttavia, solo a titolo informativo, fino ad oggi solamente l'azienda Methode Electronics, leader nello sviluppo di prodotti personalizzati e progettati per applicazioni specifiche, é riuscita a sviluppare un unico dispositivo di rilevamento (vedi Figura 4.16) in grado di misurare coppia, velocità e direzione.



**Figura 4.16:** *Dispositivo di rilevamento coppia, velocità e direzione, prodotto da Methode Electronics.*

- Sensore cut-off



**Figura 4.17:** *Sensore cut-off.*

La funzione del sensore cut-off consiste nel permettere il disinserimento immediato del motore, non appena si aziona la leva freno a cui lo stesso è stato collegato. Tali dispositivi sono sostanzialmente dei microinterruttori, magnetici oppure meccanici, molto importanti, in quanto permettono di interrompere in maniera repentina l'erogazione di corrente al motore nel momento in cui vengono azionate le leve dei freni, senza aspettare l'input del sensore di pedalata. In tal modo si può essere sempre certi di non avere ritardi sull'interruzione della corrente, a vantaggio quindi della sicurezza.

Risulta doveroso ricordare che il Codice della Strada non prevede espressamente l'obbligo di presenza del sensore cut-off; infatti, esso fa riferimento solamente agli spazi d'arresto del mezzo a pedalata assistita. Ovviamente tale sensore permette, azionando la leva freno, di interrompere immediatamente l'assistenza e, di conseguenza, accorciare sensibilmente gli spazi d'arresto. Anche nelle manovre da fermo la presenza del sensore aiuta notevolmente il ciclista ad evitare brusche ripartenze del mezzo elettrico dovute a cause accidentali, come il movimento involontario dei pedali. Se, ad esempio, si fosse in possesso di una bici elettrica priva di sensore cut-off, esso lo si può montare direttamente sul filo del freno stesso, senza bisogno di cambiare le leve freno che il mezzo possiede già.

Infine, risulta doveroso porre particolare attenzione alla posizione del cavo freno; infatti, se non viene ad essere ben allineato, esso può causare malfunzionamenti del sensore stesso, con conseguente blocco di tutto il sistema, rendendo quindi la bici elettrica non funzionante. Tale problema lo si può risolvere facilmente adoperando il cosiddetto Tubetto V-brake flessibile con gommino (vedi Figura 4.18), il quale permette di mantenere il cavo freno ben allineato col sensore, garantendo quindi un miglior funzionamento dello stesso.



**Figura 4.18:** *Tubetto V-brake flessibile con gommino.*

# Capitolo 5

## Problematiche da risolvere

### 5.1 Carica delle batterie

Il desiderio di qualsiasi persona in possesso di una pedelec consisterebbe nell'averne una batteria che presenti un'autonomia pressoché illimitata oppure una velocità di ricarica istantanea. Almeno per il momento, tali fattori non risultano essere raggiungibili; tuttavia, si affronteranno ora in maniera approfondita questi due aspetti caratterizzanti le batterie dei cicli a pedalata assistita, sottolineando anche le innovazioni che le varie aziende hanno apportato in questo settore, con i conseguenti miglioramenti che ne sono derivati.

Innanzitutto, si prosegue con l'operare una panoramica generale sulla batteria: essa rappresenta il dispositivo che fornisce energia al motore, e costituisce il singolo componente più costoso di una bici elettrica. Solitamente, le batterie per cicli a pedalata assistita presentano una tensione che può variare dai 12 V ai 48 V e presentano un amperaggio che solitamente ricade tra gli 8 Ah e i 16 Ah. Ne esistono di diverse tipologie; generalmente, quelle a basso prezzo risultano più pesanti e presentano poca autonomia, mentre all'aumentare del prezzo diminuisce il peso e aumenta l'autonomia. Una batteria di qualità durerà anche di più nel tempo, e sarà necessario sostituirla più raramente.

Le batterie destinate alle pedelecs possono essere divise in tre grandi gruppi, a seconda della loro composizione chimica:

- **Batterie al piombo (Pb):** tale tipologia rappresenta la tecnologia più vecchia, ancora in uso per le batterie ricaricabili. Il rapporto peso/autonomia viene ad essere sfavorevole, nel senso che sono molto pesanti per l'autonomia che riescono ad offrire (circa 30 Wh per Kg). I tempi di ricarica sono molto lunghi, richiedendo in genere 8 o più ore;

quindi, sono particolarmente indicate per chi prevede di usare la bici elettrica per percorsi brevi.

- **Batterie al nichel-metallo-idruro (NiMH):** migliori di quelle al piombo ma non ancora al top dell'efficienza (hanno una capacità di circa 75 Wh per Kg). Presentano lo svantaggio di soffrire maggiormente dell'effetto di autoscarica, ossia tendono a scaricarsi anche quando non vengono utilizzate, e presentano il cosiddetto "effetto memoria", che consiste nella notevole riduzione della capacità in caso di cariche e scariche parziali. Tuttavia, sono pochi i modelli di cicli a pedalata assistita che montano tale tipologia di batteria.
- **Batterie al litio:** tale tipologia risulta essere attualmente la tecnologia migliore fra quelle usate per produrre batterie di bici elettriche. Sono molto più piccole e leggere delle altre, con una capacità media di circa 160 Wh per Kg: tale caratteristica la si può tradurre in un ridotto peso a parità di capacità, oppure in una maggiore capacità a parità di peso, aumentando di conseguenza l'autonomia della bici. Inoltre, le batterie al litio non soffrono dell' "effetto memoria", e pertanto non risulta necessario aspettare che siano quasi completamente scariche per ricaricarle. Il lato negativo è rappresentato dal fatto che hanno un prezzo maggiore degli altri tipi, dovuto anche al più complesso sistema elettronico di gestione della batteria. Esistono diversi tipi di batterie al litio. Il tipo presente da più anni sul mercato è quello basato sugli ioni di litio (Li-Ion); una variante diffusa è rappresentata dalle batterie ai polimeri di litio (Li-Po), con una maggiore densità energetica (circa il 20 % in più); ancora poco diffuse invece le batterie litio-ferro-fosfato (LiFePO<sub>4</sub>), molto interessanti per la loro maggiore sicurezza e soprattutto per la maggiore durata nel lungo periodo (più di 1000 cicli di ricarica se gestite bene). A volte i produttori offrono la stessa bici in due o più varianti, che montano batterie di diversa qualità; ad esempio, tra una bici con batteria al piombo ed una identica ma con batteria al litio possono esserci anche 250 - 300 euro di differenza.

Pertanto, nella scelta di una bici elettrica, oltre ad osservare la tipologia di batteria presente, risulta necessario confrontarne anche la sua capacità. La capacità si misura in Watt-ora (Wh); intuitivamente, maggiore è il valore di Watt-ora (Wh) della batteria, più essa durerà, aiutandoci a compiere un maggior numero di chilometri, o ad affrontare dislivelli maggiori.

Come già accennato, attualmente le batterie più evolute sono al litio, o Li-Ion, che in pratica consiste nello stesso standard adottato sui dispositivi

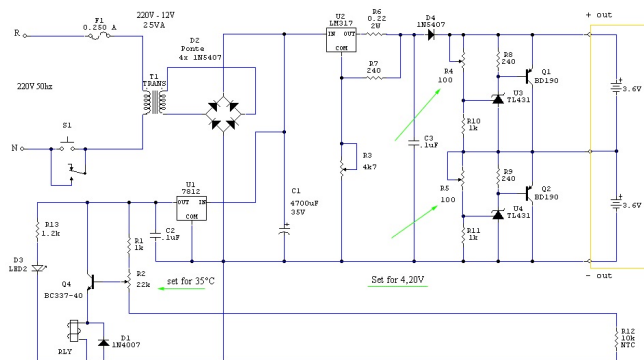
mobile, come smartphone e tablet, e computer portatili. Come indicato precedentemente, le batterie al litio impiegate su tali mezzi elettrici presentano una tensione che, solitamente, va dai 12 V ai 48 V, tuttavia la maggior parte di esse sono da 36 V. Il tempo di ricarica medio é intorno alle cinque ore (dalle quattro alle sei ore, secondo l'efficienza del modello), mentre il peso é intorno ai due chilogrammi. Tali moderne batterie Li-Ion presentano un ciclo di vita relativamente ampio, supportando mediamente mille cicli di ricarica (da 800 a 1200, secondo la qualità del modello) e mantenendo costante la capacità totale. Le pedelec sono, inoltre, generalmente costituite da batterie rimovibili dal telaio della bicicletta e risultano, pertanto, provviste di uno speciale caricabatteria che può essere collegato ad ogni presa di corrente; si prosegue ora con il definirne le caratteristiche.



**Figura 5.1:** *Generico caricabatteria per pedelec.*

Sostanzialmente, un caricabatteria é un dispositivo utilizzato per fornire energia ad una cella secondaria (o batteria) ricaricabile, forzando una corrente elettrica attraverso la stessa; la carica di corrente dipende dalla tecnologia e dalla capacità della batteria che viene ricaricata.

Per comprendere maggiormente il funzionamento di tale dispositivo, si considera un generico circuito di un caricabatteria per batterie agli ioni di litio:



**Figura 5.2:** *Schema semplificato del circuito relativo ad un generico caricabatteria per batterie agli ioni di litio.*

Dallo schema in Figura 5.2 si può dedurre l'alimentazione con ingresso 220 V 50 Hz, seguita dal trasformatore *T1*. Il secondario del trasformatore deve essere dimensionato in base a quante celle si vogliono caricare; per due celle è sufficiente un'uscita da 12 V, per 3-4 celle è necessario un secondario da 18-24 V. La corrente assorbita è di circa 1.5 ampère. Un ponte a diodi *D2* raddrizza l'alternata, mentre il condensatore *C1* presenta il compito di livellare.

Il pulsante *S1* serve a dare alimentazione. Se le condizioni di temperatura della batteria sono inferiori ai  $30^{\circ}\text{C}$ , il relé si chiude e dá alimentazione al circuito di ricarica, mentre, se la batteria è calda, il sistema si spegne o non viene alimentato; questo rappresenta il primo sistema di sicurezza per la ricarica delle ioni-litio. Chiaramente il termistore *R12* deve essere posizionato sotto le batterie in ricarica, o meglio dentro al pacco, e collegato al connettore di ricarica.

Il circuito di protezione termica prende alimentazione dall'uscita del ponte raddrizzante e attraverso il dispositivo *7812* si ottiene la tensione di 12 V necessaria a comandare il relé. Durante il funzionamento, il dispositivo *RLY2* è normalmente chiuso. Il trimmer *R2* deve essere tarato per fare aprire il relé per temperature superiori ai  $30^{\circ} - 40^{\circ}\text{C}$ , da misurare sul corpo batteria.

L'integrato *LM317* ha il compito di fornire la tensione necessaria alla ricarica degli elementi e va tarato tramite la resistenza *R3* per 8.40 V per 2 celle, 12.60 V per 3 celle e 16.80 V per 4 celle; la *R6*, situata in corrispondenza dell'uscita dell'integrato stesso, permette di ottenere un abbassamento della tensione di uscita, sfruttando la regola, derivante dall'elettrotecnica, relativa al partitore di tensione; tale abbassamento di tensione si traduce, attraverso la legge di Ohm, in una limitazione della corrente di carica.

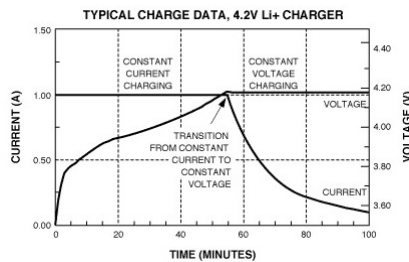
Il circuito di limitazione carica, composto dal *TL431* e dal *BD190*, ha il compito di limitare la tensione di carica a 4.20 V, il quale rappresenta il valore limite di tensione dei caricabatterie agli ioni di litio. Sostanzialmente, il dispositivo *BD190* rappresenta un transistor pnp, il cui emettitore è indicato dalla freccia in Figura 5.2; essendo polarizzato inversamente, finché la tensione  $V_{BE}$  tra base ed emettitore risulta minore della tensione di soglia, tale dispositivo viene a trovarsi nella sua regione di saturazione (equivalente ad un interruttore chiuso), operando quindi come amplificatore. A mano a mano che il valore di tale tensione aumenta, il dispositivo transita dalla regione di saturazione a quella di interdizione (equivalente ad un interruttore aperto), permettendo quindi la limitazione della tensione di carica, relativa ad ogni cella. Il dispositivo *TL431*, essendo un diodo Zener, interviene tempestivamente in quest'ultima situazione, permettendo che la corrente del transistor transiti attraverso di esso ed evitando, quindi, aumenti repentini di tensione sul collettore, i quali porterebbero a danneggiare irreversibilmente il transi-

stor stesso. Il diodo Zener rappresenta, pertanto, un sistema di sicurezza per l'incolumità del transistor. Bisogna avere un circuito di limitazione per ogni elemento-batteria collegato; con 4 celle saranno, quindi, necessari 4 circuiti in serie sull'uscita.

Quando le batterie sono cariche, iniziano a scaldare, pertanto il sensore termico ( $R12$ ) deve essere posizionato sotto al pacco batterie; se la temperatura supera la soglia di taratura, il caricabatteria si spegne automaticamente. Il diodo  $D3$  da 3 ampère evita che la tensione di batteria ritorni dentro al dispositivo  $LM317$ , danneggiandolo.

Avendo descritto in dettaglio la struttura di un caricabatteria, si passa ora all'analisi vera e propria del processo di ricarica di una batteria agli ioni di litio.

Le prestazioni e la longevità delle batterie dipendono fondamentalmente dalla qualità del caricabatteria utilizzato. Tra le varie tipologie di ricarica, in primo luogo troviamo il *trickle charging*, che rappresenta la strategia più semplice, prevedendo di sottoporre la batteria ad una corrente costante di lieve entità per un lungo periodo di tempo. Si tratta, quindi, di applicare una carica fissa pari a circa un decimo della sua capacità, per tutto il tempo in cui la batteria è connessa in carica. Tuttavia, la strategia di carica a corrente costante *trickle* ha bisogno di lunghissimi tempi di carica, mediamente attorno alle 8 ore, e pertanto risulta inadatta alle specifiche di velocità riguardanti i caricabatterie oggi giorno. Pertanto, la tipologia che caratterizza la quasi totalità dei caricabatterie per batterie agli ioni di litio è rappresentata dal cosiddetto metodo di carica  $CC-CV$ , diviso in due fasi principali distinte: la prima a corrente costante, mentre la seconda fase a tensione costante ( $CC-CV = Constant Current - Constant Voltage$ ), come si può vedere dalla Figura 5.3.



**Figura 5.3:** Diagramma relativo al metodo di carica  $CC-CV$ .

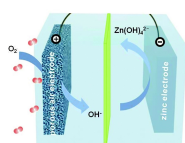
Secondo questa strategia, in primo luogo viene applicata alla batteria una corrente costante che induce un innalzamento della tensione di batteria, fino al raggiungimento di una tensione prestabilita, ovvero la tensione nominale di

batteria. Dopo aver raggiunto tale tensione predefinita, essa viene mantenuta costante e la corrente di carica viene progressivamente ridotta. Quando la corrente di carica raggiunge il valore pari a circa il 3% della corrente nominale, la batteria viene ad essere completamente carica; tale strategia di carica aumenta notevolmente la velocità di carica delle batterie agli ioni di litio. Inoltre, risulta doveroso aggiungere che tale tipologia di batterie, lavorando solitamente a 4.20 V/cella, presenta una tolleranza di circa +/- 50mV/cella. Tuttavia, visto che la chimica delle batterie Li-Ion non é sicura come le altre, una batteria Li-Ion può esplodere se surriscaldata o caricata eccessivamente; infatti, il litio rappresenta un metallo pericoloso in quanto, reagendo con l'acqua, produce molecole di idrogeno, il quale, com'è noto, risulta essere una sostanza infiammabile. Un accumulatore agli ioni di litio richiede, quindi, diversi sistemi di sicurezza obbligatori al suo interno; come già accennato precedentemente, questi includono, ad esempio, un interruttore termico, per prevenire il surriscaldamento in caso di sovraccarico, ed una linguetta di sicurezza con valvola di sfiato, per controllare la pressione interna.

In conclusione si presentano, quindi, gli studi attuali che si stanno svolgendo per poter incrementare tale velocità di carica. Vi sono sostanzialmente tre tipologie di batterie che risultano essere in fase di progettazione e sono:

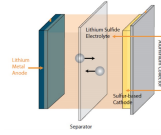
- **Celle zinco - aria:** utilizzano un catodo a ossigeno atmosferico (che riceve elettroni, riducendosi) e un anodo di zinco (che cede elettroni, ossidandosi), dove lo zinco é il combustibile e l'ossigeno é il comburente. La scarica é ottenuta dall'ossidazione dello zinco a opera dell'ossigeno dell'aria, con conseguente formazione di ossido di zinco sulle superfici degli elettrodi di zinco metallico. Raggiunta la scarica completa, la ricarica della batteria non può essere svolta dall'utente stesso, ma deve essere effettuata in un'industria o in una stazione di servizio apposita, la quale provvederá, tramite una procedura elettrochimica, alla rigenerazione dell'ossido di zinco, ottenendo nuovamente zinco metallico; per poter attuare tale processo inverso, risulta necessario l'utilizzo di un catalizzatore. Tra i vari vantaggi che ne derivano, rispetto alle altre tipologie di batterie presenti sul mercato, si ricorda che tale accumulatore presenta alte densità di energia (150-200 Wh per Kg), non presenta metalli pesanti tossici da dover smaltire in discarica, non risulta caratterizzato dall'effetto memoria, presenta maggiore durata (soprattutto ad alte temperature) e maggiore sicurezza (non vi é pericolo di incendio) ed, infine, risulta essere una soluzione notevolmente economica. Per quanto riguarda gli svantaggi, invece, si ricorda che tale tipologia di batterie risente molto delle condizioni ambientali, in particolare risulta essere influenzata da bassa temperatura, umidità

ed inquinamento, i quali portano ad una conseguente riduzione della reattività dell'ossigeno atmosferico. Infatti, in condizioni ideali, come luoghi caldi e desertici, si nota un aumento della potenza massima e dell'autonomia del veicolo, mentre esattamente il contrario avviene ad alta quota (dove cala la pressione parziale dell'ossigeno) ed in climi freddi ed umidi, come in caso di pioggia, dove si vede ridursi sia la potenza massima che l'autonomia del veicolo. Un ulteriore svantaggio che caratterizza le batterie zinco-aria è rappresentato dal fatto che, come accennato precedentemente, la ricarica non può essere effettuata dall'utente stesso;



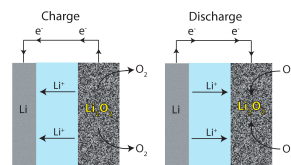
**Figura 5.4:** *Cella zinco-aria*

- **Celle litio - zolfo:** tali batterie utilizzano un catodo contenente zolfo ed un anodo contenente litio; tra i vari vantaggi che derivano dal loro utilizzo si ricorda che esse promettono elevata densità energetica, fino a 5 volte maggiore rispetto alle batterie agli ioni di litio, non utilizzano materiali rari, come nickel e cobalto, i quali risultano sostituiti dallo zolfo ed, inoltre, non presentano l'effetto memoria. Come la tipologia di accumulatori precedentemente definita, le batterie litio-zolfo presentano maggiore sicurezza, in quanto non sono caratterizzate da rischio d'incendio. Per quanto riguarda gli svantaggi, invece, si sottolinea che, rispetto agli altri tipi di accumulatori presenti attualmente, tali batterie presentano un ciclo di vita inferiore, dovuto al problema della distruzione del litio nell'elettrolita; infatti, il catodo (elettrodo positivo) della batteria tende lentamente a disintegrarsi, formando molecole di zolfo che si dissolvono nel liquido elettrolitico della batteria. Di conseguenza, tali molecole tendono a sviluppare una sottile pellicola di zolfo sull'anodo (elettrodo negativo), fino a rendere inutilizzabile la batteria stessa. La maggior parte delle ricerche, finora svolte, si sono concentrate nel bloccare la perdita di zolfo dal catodo, ottenendo però risultati poco convincenti; alcune aziende, tuttavia, stanno attualmente cercando di focalizzare la loro attenzione sul lato opposto, ovvero cercando di aggiungere uno "scudo protettivo", composto di grafite, all'anodo, impedendo in questo modo la distruzione dello stesso;



**Figura 5.5:** *Cella litio-zolfo*

- **Celle litio - aria:** tali accumulatori risultano essere costituiti da un anodo a base di metallo e da un catodo-aria, il quale estrae costantemente ossigeno dall'ambiente; tra i principali vantaggi che derivano dal loro utilizzo, si sottolinea che esse sono caratterizzate da una densità energetica elevatissima, fino a 10 volte maggiore rispetto a quella delle batterie agli ioni di litio, presentano una velocità di carica inferiore ed il loro costo risulta particolarmente contenuto. Per quanto riguarda gli svantaggi, invece, le batterie litio-aria presentano un ciclo di vita piuttosto ridotto, solitamente attorno ai 150 cicli; recentemente, solamente, il prototipo progettato dall'Università di Cambridge é riuscito a raggiungere un ciclo di vita superiore (circa 2000 cicli), obiettivo reso possibile grazie all'impiego di un elettrodo di grafene molto poroso e sfruttando l'idrossido di litio al posto del perossido. É doveroso aggiungere, tuttavia, che tali accumulatori risultano essere ancora in fase di sperimentazione per la ricerca di una membrana che risulti permeabile all'ossigeno, ma non all'acqua.



**Figura 5.6:** *Cella litio-aria.*

Infine, un accenno deve essere riservato alla Facoltà di Ingegneria dell'Università di Tokyo, in collaborazione con l'Università di Kyoto e del National Institute for Material Science giapponese, i quali avrebbero trovato un nuovo possibile elettrolita che potrebbe essere integrato all'interno della miscela di ogni singola cella delle batterie.

Sebbene gli studiosi non abbiano fornito indicazioni riguardanti la composizione chimica della nuova sostanza elettrolitica, quest'ultima presenta valori di reattività e resistenza al degrado molto elevati, assieme a proprietà accessorie che potrebbero considerevolmente aumentare il rendimento globale

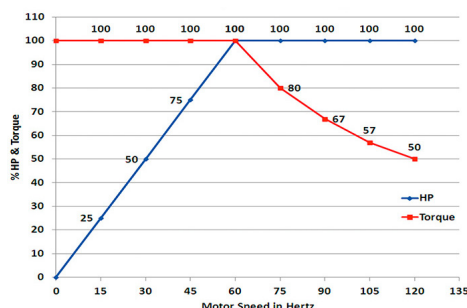
delle attuali batterie agli ioni di litio. La nuova miscela elettrolitica, infatti, utilizza un solvente quattro volte piú concentrato rispetto alle sostanze solitamente utilizzate nelle tecnologie agli ioni di litio attuali, come ad esempio il carbonato di etilene. Le proprietá fisiche della miscela, in base alle parole enunciate delle organizzazioni coinvolte nella ricerca, permetteranno la possibilitá di sviluppare batterie agli ioni di litio in grado di essere ricaricate piú velocemente, giungendo fino ad un terzo rispetto alle tempistiche richieste dalle tecnologie attuali ed aumentando il voltaggio nominale della cella standard agli ioni di litio fino a 5 volt.

## 5.2 Autonomia delle batterie

Risulta utile precisare, fin dal principio, che fornire dei dati generali riguardanti l'autonomia delle pedelecs non rappresenta un fatto per niente facile, in quanto il numero di chilometri percorribili, prima che la batteria si esaurisca, é determinato da una quantitá piuttosto alta di fattori. Per avere un'idea piú chiara di come l'autonomia viene influenzata, di seguito verranno elencati brevemente:

- **Capacitá della batteria:** come giá detto precedentemente, la capacitá di una batteria si misura in watt-ora (Wh); maggiore é la capacitá di tale dispositivo, maggiore sará l'autonomia del mezzo.
- **Tipologia di percorso (pianura, salita, discesa):** logicamente, in salita una bicicletta consuma maggiormente che in pianura, in quanto il mezzo elettrico deve vincere il lavoro, contrario al moto, dato dal contributo della forza di gravitá, contributo che risulta nullo nel caso pianeggiante; é per questo che tutti i dati che vengono dichiarati dalle aziende sono sempre riferiti al caso in pianura, in quanto tale situazione viene ad essere la condizione piú naturale per la misura dell'autonomia.
- **Prestazione muscolare dell'utilizzatore:** piú una persona risulta allenata, minore sará l'ausilio derivante dal motore elettrico, con conseguente risparmio energetico della batteria, portando cosí ad un aumento dell'autonomia totale.
- **Peso:** per poter aumentare l'autonomia bisogna minimizzare la massa, riducendo quindi al minimo il peso complessivo della bicicletta e del bagaglio; un valore ottimale si ha quando il peso aggiuntivo, oltre a quello della bici, risulta minore di 70 kg.

- **Tipologia di assistenza richiesta al motore:** la maggior parte dei motori in commercio dispone di vari livelli di assistenza e ciò che li differenzia é rappresentato dalla quantità di coppia erogata; maggiore é la coppia erogata, maggiore sará il consumo di energia della batteria.
- **Condizioni atmosferiche:** in particolare, si considerano gli effetti che vento e temperatura causano sull'autonomia di un ciclo a pedalata assistita. Per quanto concerne la temperatura, quando essa scende, il rendimento della batteria diminuisce a causa dell'aumento della resistenza elettrica; pertanto, solitamente d'inverno l'autonomia di una pedelec risulta di conseguenza ridotta. Come si vedrá in seguito, la temperatura ambientale si puó definire ottimale quando essa presenta un valore che si aggira attorno ai  $20^{\circ}C$ .
- **Condizione del manto stradale:** un manto stradale liscio ed in perfette condizioni permette di percorrere piú chilometri, ottenendo quindi una maggiore autonomia, rispetto ad un manto stradale dissestato o addirittura sterrato; quest'ultima tipologia di manto, infatti, puó essere causa di un moto non continuo del motore, il quale, soggetto quindi ad un maggior numero di fermate e ripartenze, provocherá una riduzione dell'autonomia del mezzo.
- **Pressione degli pneumatici:** la resistenza al rotolamento puó essere minimizzata con la corretta pressione delle gomme; solitamente, per ridurre tale resistenza, si opta di pedalare sempre con la pressione massima consentita per le gomme, che, generalmente, si aggira attorno ai 5 bar, per quanto concerne le pedelecs.
- **Frequenza di pedalata:** una pedalata molto lenta normalmente consuma molta energia; infatti, visto che potenza e coppia sono legate dalla relazione  $P = \tau\omega$ , dove  $P$  indica la potenza erogata,  $\tau$  indica la coppia applicata e  $\omega$  indica la velocità di rotazione del rotore (legata alla frequenza di pedalata dalla relazione  $\omega = 2\pi f$ ), la coppia e la frequenza di pedalata vengono ad essere inversamente proporzionali, a potenza costante. Pertanto, una frequenza di pedalata maggiore permette di erogare una coppia inferiore, mentre una quantità minore di giri al minuto delle pedivelle necessita un'erogazione di coppia maggiore, con conseguente diminuzione dell'autonomia del mezzo elettrico. Indicativamente, si cerca di adottare una frequenza di pedalata superiore ai 50-60 giri al minuto (R.P.M.), in modo da ottimizzare l'efficienza dell'unità motrice, come si puó vedere dal grafico in Figura 5.7.

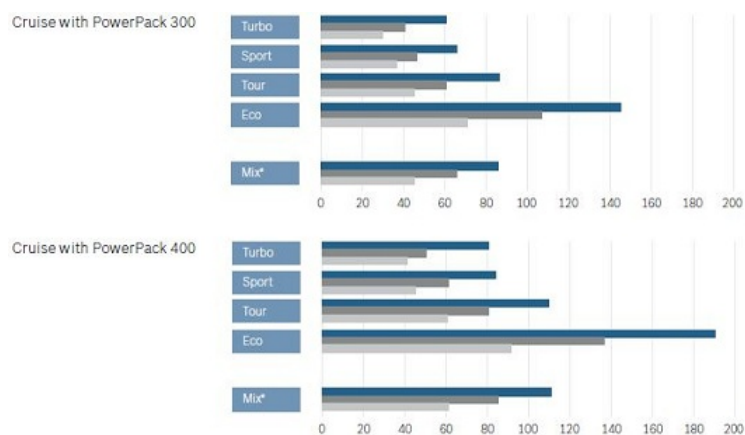


**Figura 5.7:** *Diagramma relativo alla coppia e alla potenza erogate, in funzione della velocità di rotazione del rotore, espressa in Hertz.*

- **Utilizzo dei cambi meccanici:** il corretto cambio delle marce rende le pedelecs piú efficienti; infatti, nelle partenze e nelle salite, ad esempio, si dovrebbero usare le marce basse; le marce piú alte andrebbero utilizzate solo se il percorso e la velocità lo consentono.
- **Partenze e fermate:** frequenti partenze e fermate (“stop and go”) sono fonte di maggiore consumo rispetto a lunghi percorsi ad una velocità possibilmente costante; infatti, nei primissimi istanti di avvio del motore, quest’ultimo, per poter mettere in moto il rotore, si trova a dover vincere un quantitativo di attrito statico che generalmente, in condizioni dinamiche, risulta essere nullo. Pertanto, a causa di ciò, in questi istanti iniziali di avvio, il motore richiede una maggiore quantità di energia, rispetto alla situazione a regime, provocando di conseguenza una riduzione dell’autonomia del mezzo. Maggiore sarà il numero di partenze e fermate, maggiori saranno le occasioni in cui il motore deve richiedere piú energia e minore sarà, quindi, l’autonomia della pedelec.

Visto che, come si é appena accennato, l’autonomia dipende anche dalla tipologia di percorso (evidentemente, in salita una bicicletta consuma maggiormente rispetto al caso in pianura), tutte le case produttrici di pedelecs forniscono i dati relativi all’autonomia del mezzo riferendoli a “condizioni ottimali” di esercizio, ossia riferendoli sempre al caso in pianura, in quanto rappresenta la condizione piú naturale per la misura della stessa.

Si veda di definire in modo migliore tali “condizioni ottimali”; una definizione piuttosto esauriente viene fornita dall’azienda Bosch. Come é noto, Bosch non produce bici elettriche complete, ma offre i propri sistemi (motore + batteria + sensore di pedalata + computer di bordo) ai produttori di bici, che decidono poi di montarli sui propri modelli.



**Figura 5.8:** *Diagramma, fornito da Bosch, raffigurante l'autonomia di ciascun motore in funzione del livello di assistenza e delle condizioni in cui esso si trova ad operare.*

Come si può vedere dalla Figura 5.8, tale azienda offre ai possibili acquirenti quattro distinti livelli di assistenza, così definiti:

- *Turbo*: il motore fornisce una potenza pari al 250% di quella fornita dal ciclista.
- *Sport*: il valore di assistenza scende al 180%
- *Tour*: il valore di assistenza scende al 100%, raddoppiando quindi la potenza del ciclista
- *Eco*: il motore fornisce una potenza pari al 30% di quella fornita dal ciclista

Bosch, pertanto, in corrispondenza di ciascun motore elettrico da essa progettato, provvede ad informare gli acquirenti riguardo l'autonomia del dispositivo stesso, riportando un grafico che comprende, per ciascun livello di assistenza, tre valori di autonomia definiti in base a tre condizioni di esercizio:

- **Condizioni ottimali:** terreno pianeggiante; velocità media di 20 km/h; nessun vento contrario; temperatura ambientale di 20°C; componenti meccanici della bici di alta qualità; pneumatici da strada gonfiati alla pressione ottimale; ciclista esperto che cambia marcia al momento giusto; peso aggiuntivo (oltre a quello della bici) minore di 70 kg.

- **Condizioni favorevoli:** terreno leggermente collinare; velocità media di 25 km/h; leggero vento contrario; temperatura ambientale fra i 10°C e i 20°C; componenti meccanici della bici di media qualità; pneumatici con una resistenza al rotolamento nella media; cadenza di pedalata corretta, con il ciclista che cambia marcia correttamente, la maggior parte delle volte; peso aggiuntivo (oltre a quello della bici) fra i 70 e gli 80 kg.
- **Condizioni difficili:** terreno con alcune salite lunghe e ripide; velocità media di 25 km/h; vento contrario anche forte; temperatura ambientale minore di 10°C; componenti meccanici della bici in condizioni di efficienza scarsa; pneumatici con una resistenza al rotolamento medio-alta; errata scelta della cadenza e del rapporto di pedalata; peso aggiuntivo (oltre a quello della bici) superiore agli 85 kg.

Come si può vedere chiaramente dal diagramma, per ogni livello di assistenza di ciascun motore, il passaggio da condizioni ottimali a condizioni difficili di esercizio provoca una riduzione dell'autonomia pari circa al 50%.

Risulta doveroso aggiungere che, alcuni rivenditori, nelle schede tecniche relative ai vari cicli a pedalata assistita, in corrispondenza della voce “Autonomia”, riportano un range di valori indicante il limite inferiore e superiore dell'autonomia del mezzo (ad esempio: 60 - 145 km), sempre in condizioni ottimali di esercizio; in tali casi, il valore minimo (pari a 60 km nell'esempio) coincide con la massima assistenza del motore elettrico, mentre il valore massimo di autonomia (pari a 145 km nell'esempio) coincide con l'assistenza minima dello stesso. Solamente in alcuni casi sporadici, si può notare che il rivenditore di pedelecs pone, sempre in corrispondenza della voce “Autonomia”, un range di valori con accanto il livello di assistenza del motore (ad esempio: 50 - 100 km (mod. 1)); se, come in questo caso, viene specificato il livello di assistenza, allora il valore minimo del range (pari a 50 km nell'esempio) indica l'autonomia in condizioni difficili, mentre il valore massimo (pari a 100 km nell'esempio) indica la stessa in condizioni ottimali, entrambi riferiti a quel dato livello di assistenza.

Solamente a titolo informativo, risulta utile ricordare che vi sono alcuni studi in atto con lo scopo di aumentare l'autonomia di tali mezzi, tra cui:

- **“Pedalando”:** vi sono alcuni modelli di biciclette elettriche sul mercato che permettono di ricaricare le batterie direttamente durante la pedalata. Si pedala e l'energia generata viene inviata nuovamente alle batterie; tuttavia, mentre la batteria si carica, la pedalata può diventare più difficile, in quanto il generatore crea una maggiore resistenza.

- **“Procedendo a ruota libera”**: alcune pedelecs (tra cui, ad esempio, alcuni cicli a pedalata assistita offerti dall’azienda ciclistica Rayvolt ed il modello Bike+ all-in-one presentato dalla casa costruttrice Zehus) presentano sistemi in grado di ricaricare la batteria mentre si va avanti per inerzia.
- **“Frenando a recupero”**: questo metodo immagazzina, nella batteria, l’energia data dalla frenata, convertendo una quota parte di quella che normalmente si dissipa sotto forma di calore ed adottando, pertanto, un sistema simile al kers della Formula 1. Tra le biciclette elettriche dotate di sistema di recupero a frenata rigenerativa, risulta doveroso menzionare il nome di alcune delle attuali case costruttrici che adottano tale tecnologia; si ricordano, ad esempio, Bioplanet, Polaris, Ohm (con il modello SPORT XS750) e Smart (con il modello eBike).

Tuttavia, tali casi, per il momento, risultano poco efficienti in quanto il primo, come già accennato, porterebbe ad una pedalata più difficile, mentre gli ultimi due necessiterebbero di un dislivello consistente per poter ricaricare la batteria in modo efficiente.

In conclusione, quindi, attualmente per poter aumentare l’autonomia di una pedelec, oltre ad aumentare la capacità della batteria, risulta necessario lavorare su tutti gli aspetti sopra elencati che la influenzano, cercando quindi di giungere al miglior trade-off possibile.

### 5.3 Peso

Come già accennato precedentemente, il peso possiede un’importanza davvero rilevante in quanto, in primo luogo, una sua riduzione comporterebbe un aumento di autonomia del ciclo a pedalata assistita, a parità di tutti gli altri parametri; in secondo luogo, gli acquirenti di pedelecs (soprattutto quelli residenti in grandi e caotiche città) stanno dimostrando un continuo e crescente interesse nella diminuzione di peso del mezzo stesso. Infatti, tali persone spesso vivono all’interno di grandi condomini e il dover trasportare a mano la bici elettrica, da un piano ad un altro, risulterebbe di gran lunga agevolato con un peso ridotto. Il prossimo passo sarà, quindi, considerare i pesi che caratterizzano i componenti di un ciclo a pedalata assistita, indicando di conseguenza le possibili soluzioni da adottare per poter ridurre il peso complessivo del mezzo elettrico.

Innanzitutto, si considera la batteria; presupposto che oggi giorno la maggior parte dei cicli a pedalata assistita presenta batterie agli ioni di litio,

si veda di confrontare la densità energetica di ciascuna tipologia di batteria disponibile sul mercato:

1. Densità energetica media **batteria al piombo** = 30 Wh/kg
2. Densità energetica media **batteria al Ni-Cd** = 50 Wh/kg
3. Densità energetica media **batteria agli idruri metallici (NiMH)**  
= 75 Wh/kg
4. Densità energetica media **batteria al litio-ferro-fosfato (LiFePO4)**  
= 95 Wh/kg
5. Densità energetica media **batteria agli ioni di litio** = 160 Wh/kg

Come si evince da tale elenco, la batteria agli ioni di litio presenta la densità energetica media più elevata; infatti, considerando, ad esempio, di voler avere a disposizione una capacità energetica di 300 Wh, si otterrebbero i seguenti pesi:

1. Peso **batteria al piombo** = 10 kg
2. Peso **batteria al Ni-Cd** = 6 kg
3. Peso **batteria agli idruri metallici (NiMh)** = 4 kg
4. Peso **batteria al litio-ferro-fosfato (LiFePO4)** = 3.16 kg
5. Peso **batteria agli ioni di litio** = 1.9 kg

Si può facilmente dedurre, da tale esempio, che utilizzare una batteria agli ioni di litio, rispetto una batteria al piombo, riduce notevolmente il peso complessivo del mezzo elettrico; solitamente, il peso di una batteria agli ioni di litio, che si trova in una generica pedelec, si aggira attorno ai 2.5 kg.

Per quanto riguarda il motore, normalmente il suo peso medio presenta un valore di circa 4.5 kg. Vi sono solo pochi casi particolari in cui si possono trovare pedelecs che montano motori elettrici caratterizzati da un peso minore, a parità di potenza (250 W); tra questi casi vi è, ad esempio, il sistema Bosch Performance, che presenta un motore di 4 kg, oppure il sistema Yamaha PW series, il quale possiede invece un motore di soli 3.5 kg. Solo a titolo informativo, un'innovazione piuttosto rilevante in tale settore è data dal motore Vivax Assist; esso rappresenta uno dei più piccoli motori esistenti sul mercato e, a differenza di altri, risulta completamente invisibile. Tale motore da 200 W è silenzioso, viene posizionato all'interno del tubo verticale

in modo da essere completamente nascosto e va ad agire sul movimento centrale tramite un ingranaggio; esso presenta un diametro di circa 31 mm ed é lungo appena 22 cm, arrivando quindi a pesare solamente 1 kg. Assieme alla particolare batteria agli ioni di litio dedicata a tale motore, il sistema complessivo raggiunge il piccolo peso di 1.8 kg; tuttavia, attualmente, Vivax Assist viene utilizzato solamente come sistema per trasformare una generica bici standard in elettrica.

Si passa ora all'analisi del peso dello scheletro di un ciclo a pedalata assistita: il telaio.

La maggior parte delle bici elettriche che si trovano in mercato oggi giorno presenta un telaio in alluminio, in quanto tale materiale permette di ottenere il miglior trade-off tra densità specifica e rigidità elastica. L'alluminio, infatti, presenta una densità specifica di  $2.7 \text{ kg/dm}^3$ , pari alla metà di quella del titanio e ad un terzo di quella dell'acciaio; il suo modulo di Young, o modulo elastico, risulta essere di 70 GPa, un valore relativamente basso rispetto a quello degli altri due materiali citati. Si ricorda che il modulo di Young é una grandezza caratteristica di ciascun materiale ed indica il rapporto tra il valore di tensione (indicata con la lettera  $\sigma$ ) agente sul materiale ed il valore di deformazione (indicata con la lettera  $\epsilon$ ) che deriva dall'applicazione di tale carico esterno, con il presupposto di operare in campo elastico. Pertanto, nel diagramma ingegneristico tensioni-deformazioni (diagramma  $\sigma-\epsilon$ ), il modulo di Young rappresenta la pendenza locale del grafico relativo al materiale in esame. Tornando all'analisi dei materiali utilizzati, si può notare che il peso complessivo del telaio non rispecchia la stessa proporzione esistente tra le densità dei tre materiali sopra citati proprio per il semplice motivo che, mentre la rigidità elastica aumenta proporzionalmente con la terza potenza rispetto alla variazione di diametro, il peso risulta essere funzione quadratica della variazione di diametro stessa; infatti, indicando con  $\rho$  la densità del materiale, con  $d$  il diametro tubolare del telaio, con  $l$  la lunghezza del tratto di telaio preso in esame, con  $W_f$  il suo modulo di resistenza a flessione, con  $P$  il suo peso e con  $V$  il suo quantitativo di volume, si possono scrivere le seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} W_f &= \frac{\pi}{32}d^3 \\ P &= \rho V = \rho \frac{\pi}{4}d^2l \end{aligned}$$

Osservando tali espressioni, si notano chiaramente, come accennato precedentemente, la dipendenza quadratica del peso e la dipendenza cubica della rigidità elastica, entrambe in funzione del diametro  $d$ . Questi motivi, affiancati al costo contenuto dell'alluminio, hanno permesso di rendere tale materiale come il più utilizzato in ambito telaistico, relativo alle biciclette.

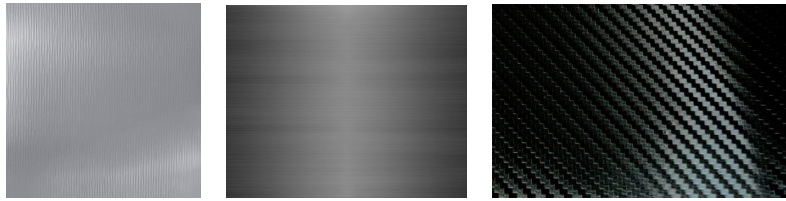
Il peso complessivo di un telaio in alluminio risulta difficile da definire con rigorosità, in quanto esso dipende dalle dimensioni assolute del ciclo a pedalata assistita; queste, infatti, possono variare in base al fatto che il mezzo elettrico sia destinato ad un soggetto maschile oppure ad uno femminile. Si può, tuttavia, affermare che il peso complessivo di un telaio in alluminio di una pedelec generica normalmente si aggira attorno ai 20 kg, comprendendo anche il peso del motore.

Avendo analizzato le caratteristiche relative all'alluminio, e quindi al telaio che da esso ne deriva, ora si analizzano brevemente le altre tipologie di materiali che possono rappresentare la matrice fondamentale di un telaio per pedelecs.

In primo luogo, l'acciaio presenta una densità di  $7.8 \text{ kg/dm}^3$  ed un modulo di Young di circa 210 GPa; esso presenta un prezzo piuttosto economico ed, inoltre, la sua facilità alla saldatura permette di ottenere telai anch'essi economici. Infatti, mentre l'alluminio possiede un prezzo di circa 1.50 euro/kg, l'acciaio presenta un costo di circa 1 euro/kg; tuttavia, anche se relativamente più economico, l'acciaio è stato quasi completamente soppiantato dall'alluminio per quanto riguarda la costruzione di telai ciclistici.

In secondo luogo, la fibra di carbonio, essendo un materiale composito formato da filamenti di carbonio legati tra loro con resina epossidica, risulta essere un materiale leggero, con elevata resistenza alle sollecitazioni e buoni smorzamenti delle vibrazioni. Esso presenta una densità di  $2.67 \text{ kg/dm}^3$  ed un modulo elastico longitudinale che varia dai 250 ai 500 GPa; tuttavia, il principale svantaggio che deriva da tale tipologia di materiale risulta essere proprio il costo, che in parte è dovuto anche alla difficoltà di lavorazione dello stesso. I telai di questo tipo si trovano maggiormente in ambito agonistico.

In terzo luogo, il titanio presenta ottima resistenza a fatica, possiede una densità di  $4.5 \text{ kg/dm}^3$  ed un modulo di Young di 105 GPa. Il termine "fatica" indica il fenomeno meccanico attraverso il quale un materiale risulta sottoposto a carichi ciclici, variabili nel tempo (la cui ampiezza può essere costante oppure variabile); si parla di "rottura a fatica" quando il materiale in esame giunge a cedimento in seguito a tale applicazione ciclica di carico, anche se si ha sempre operato nel limite di elasticità, ossia utilizzando carichi la cui intensità si è sempre mantenuta sensibilmente al di sotto della tensione di snervamento statico del materiale stesso. Pertanto, la resistenza a fatica indica il valore di tensione massima che può essere sopportato dal campione di materiale preso in esame, per un definito numero di cicli, senza giungere a rottura. In aggiunta, la difficoltà di lavorazione del titanio ed il suo prezzo intrinsecamente elevato, rendono i telai, ottenuti con questo materiale, particolarmente costosi ed adatti ad attività agonistiche oppure a persone veramente appassionate di ciclismo.



**Figura 5.9:** *A sinistra: alluminio. Al centro: acciaio. A destra: carbonio.*

Sono in fase di studio anche telai che adottano materiali alternativi, come i materiali compositi in bambú oppure leghe di magnesio. Per quanto riguarda il bambú, esso é un materiale che presenta una densità di  $0.57 - 0.85 \text{ kg/dm}^3$  ed un modulo elastico di  $20 \text{ GPa}$ . Dall'utilizzo di tale materiale, si possono ottenere sostanzialmente due tipi di telaio: telaio in fibra di bambú e telaio in canne di bambú.

Nella prima tipologia enunciata, le fibre vengono orientate in maniera tale da poter conferire forza e spessore al telaio, esattamente dove serve, evitando di appesantirlo inutilmente; incorporando in seguito una certa quantità di boro (elemento non metallico che si estrae dai minerali) si ottiene una struttura con elevato modulo di Young, bassa densità di materiale ed elevate prestazioni in termini di duttilità agli sforzi flessionali ed assiali. I vantaggi che derivano dall'utilizzo di questo telaio sono sostanzialmente: capacità di trasferire le forze di tensione in modo efficiente, durezza, resistenza agli impatti e allo stress, che si traduce in ottima resistenza a fatica. Le verifiche progettuali svolte al riguardo hanno, infatti, evidenziato che le fibre di bambú sono preferibili a quelle di carbonio in quanto, essendo più lunghe, consentono di realizzare telai dalle forme più libere (non condizionate da sagome e stampi), ottenendo un ottimo compromesso tra leggerezza e robustezza. Altro aspetto tecnico positivo é dato dal fatto che le fibre lunghe consentono di ridurre i punti di discontinuità strutturale, garantendo in tal modo migliori prestazioni del telaio. Tuttavia, risulta doveroso aggiungere che, per ottenere tali elevati livelli di resistenza, le fibre di bambú, durante la lavorazione, vengono immerse in resina epossidica. Visto che il peso complessivo medio di un telaio composito in fibre di bambú non supera i  $1750 \text{ g}$ , si può affermare che tale materiale risulta caratterizzato dal più elevato rapporto robustezza/peso conseguibile oggi nel mercato.

Nella seconda tipologia enunciata, invece, ossia quella riguardante il telaio in canne di bambú, queste ultime vengono previamente stagionate in modo da rilasciare l'eventuale acqua presente, e successivamente vengono riscaldate per prevenire spaccature indesiderate, mediante il processo di plasticizzazione delle fibre. La finitura della superficie viene realizzata con poliuretano satinato, in modo da renderla impermeabile; infine, durante il processo di

assemblaggio del telaio, le canne che formano i tubi del telaio della bicicletta vengono unite tra di loro attraverso giunzioni in vari materiali, tra i quali i piú utilizzati sono la fibra di carbonio e l'alluminio.

Pertanto, i vantaggi che caratterizzano un telaio in bambú possono essere cosí sintetizzati:

- bassa impronta ecologica del processo di coltivazione, in quanto non necessita di antiparassiti o fertilizzanti;
- bassa impronta ecologica del processo di lavorazione, in quanto non richiede alte temperature (circa  $200^{\circ}C$ );
- capacità di trasferire le forze in modo efficiente;
- elevata durata nel tempo, in quanto i telai sono garantiti oltre 10 anni;
- resistenza alla fatica;
- elevato rapporto robustezza/peso.

Per quanto concerne gli svantaggi, invece, l'unico vero inconveniente é rappresentato dal prezzo elevato di mercato, dovuto sia al processo di lavorazione (difficile e caratterizzato da vari processi) sia all'obbligo di importazione, in quanto l'Europa risulta sprovvista di piantagioni di bambú.



**Figura 5.10:** *A sinistra: telaio in fibra di bambú. A destra: telaio in canne di bambú.*

Affrontati i vantaggi e gli svantaggi relativi ai telai in bambú, si passa ora alla descrizione dell'altra tipologia di telaio in fase di studio, ossia quella realizzata in lega di magnesio. Quest'ultimo presenta una densità specifica di  $1.74 \text{ kg/dm}^3$  ed un modulo elastico di  $44 \text{ GPa}$ ; tra i vantaggi che derivano dal suo impiego in ambito telaistico, si deve sottolineare che esso offre eccezionali doti di leggerezza, caratteristiche meccaniche di grande resistenza ed una buona capacità di assorbimento delle vibrazioni. Inoltre, un dettaglio di non poco valore é rappresentato dal fatto che questo materiale presenta una

possibilità di riciclo sostanzialmente pari al 100%. Per quanto riguarda gli svantaggi, invece, i suoi punti deboli sono la predisposizione alla corrosione, il costo elevato di acquisto e la cautela richiesta nei trattamenti termici sia per proteggere il magnesio fuso dal contatto diretto dell'ossigeno sia per l'alta tendenza, che esso presenta, ad incendiarsi se portato allo stato liquido.



**Figura 5.11:** *Telaio in lega di magnesio.*

In conclusione, quindi, tornando alle casistiche più comuni, per poter ottenere una riduzione di peso riguardante la scelta del telaio, solitamente si predilige un telaio in alluminio, in quanto, per i motivi suddetti, viene a risultare più leggero.

Solo a titolo informativo, le biciclette elettriche più leggere, disponibili sul mercato italiano, sono le pedelecs Fulgur, in particolare i due modelli denominati Aria e Terra. Tali mezzi elettrici presentano un range di prezzo che va dai 2.000 fino ai 5.900 euro. Entrambi i modelli possiedono il telaio in alluminio e le forcelle in carbonio; il peso complessivo viene ad essere di soli 15.8 kg per il modello Aria, mentre per la variante Terra si raggiungono i 16.4 kg, valori comunque molto più bassi rispetto alla media di mercato.

## 5.4 Ricarica Wireless Power Transfer (WPT)

Avendo approfondito dettagliatamente ogni aspetto caratterizzante i cicli a pedalata assistita, si conclude questo elaborato presentando l'argomento che sempre più concretamente, oggigiorno, risulta essere oggetto di studio e di ricerca: la ricarica Wireless Power Transfer (WPT).

Introdotta per la prima volta dal fisico serbo-americano Nikola Tesla alla fine del diciannovesimo secolo, tale tipologia di carica, detta anche ricarica induttiva, consiste nel trasferire potenza elettrica da un dispositivo ad un altro, senza l'utilizzo di conduttori per il collegamento, rendendo in tal modo più sicuro il trasferimento; per poter operare ciò, si utilizzano sostanzialmente una bobina sorgente ed una ricevente, ove la prima, alimentata da una corrente elettrica alternata, induce una tensione nella ricevente.

Si prosegue esplicando in maniera piú approfondita tale funzionamento. Innanzitutto, attraverso la legge di Faraday-Lenz definita dalla seguente espressione:

$$f.e.m. = -\frac{d\phi}{dt}$$

quando una bobina viene attraversata da una corrente elettrica variabile nel tempo, si ha generazione di un flusso di campo magnetico, anch'esso variabile nel tempo, il quale, interagendo con una seconda bobina posta nelle vicinanze, provoca la formazione di una tensione (*f.e.m.*) nella bobina investita da tale flusso magnetico ( $\phi$ ), con conseguente circolazione di corrente.

Tale accoppiamento tra due bobine forma quello che comunemente viene definito "trasformatore", il quale, data una generica tensione al primo avvolgimento, permette di ottenere una tensione di differente ampiezza al secondo avvolgimento; il concetto di ricarica wireless risulta, pertanto, molto simile al concetto di trasformatore.

In secondo luogo, il fattore chiave nella trasmissione wireless di energia é rappresentato dall'efficienza: per poter definire efficace un sistema, una grande porzione dell'energia trasmessa dal generatore deve arrivare al dispositivo di ricezione. La frequenza di risonanza, il rapporto tra le dimensioni della bobina di trasmissione e quella di ricezione, il fattore di accoppiamento, l'impedenza di avvolgimento, l'effetto pelle e le correnti parassite della bobina sono tutti fattori che hanno un grande impatto sull'efficienza di trasmissione dell'energia. Tuttavia, i fattori che maggiormente influiscono sull'efficienza sono la distanza relativa tra le bobine e l'angolo relativo di inclinazione tra le stesse; man mano che aumentano le distanze lungo i tre assi  $x$ ,  $y$  e  $z$  e man mano che aumenta l'angolo di disallineamento tra le bobine di trasmissione e di ricezione, le perdite e l'efficienza ne saranno notevolmente influenzate. A questo punto, i due tipi di processo di accoppiamento induttivo che possono essere adoperati per il trasferimento wireless, in campo vicino, sono l'accoppiamento induttivo standard e l'accoppiamento induttivo risonante; si procede ora con l'analisi delle caratteristiche peculiari di queste due tipologie.

L'accoppiamento induttivo standard presenta due conduttori accoppiati induttivamente in modo reciproco, in modo da poter sfruttare il principio dell'induzione elettromagnetica, definito pocanzi; il livello di accoppiamento indotto fra le due bobine é rappresentato dalla loro mutua induttanza.

Lo svantaggio principale di tale tipologia é rappresentato dal fatto che essa risulta efficace solamente per le sorgenti di energia a bassa frequenza e a corto raggio, ossia raggiunge le prestazioni piú elevate in presenza di bassa potenza e piccole dimensioni; infatti, le sorgenti ad alta frequenza non risultano essere efficienti in quanto, in tali condizioni, si ha una notevole diminuzione della lunghezza d'onda della corrente, e quindi il flusso magnetico

che deriva da essa viene a smorzarsi piú rapidamente. La specifica Wireless Power Consortium (WPC), ad esempio, considera come dispositivi a bassa potenza quelli in grado di trasmettere un range potenziale non superiore ai 5 watt, e con una frequenza normalmente compresa tra i 110 KHz e i 205 KHz; in questa specifica si trovano, inoltre, determinati requisiti per il posizionamento della bobina di ricezione sul trasmettitore, che tengono conto dell'efficienza ottenibile.

Generalmente, quindi, si può affermare che l'accoppiamento induttivo standard risulta poco efficiente e praticabile ad una distanza di comunicazione relativamente breve, in quanto la maggior parte del flusso magnetico non é collegato fra le bobine e i campi magnetici, pertanto, decadono velocemente.

Prima di affrontare la tipologia di ricarica induttiva a risonanza magnetica, vediamo di definire cosa si intende per "risonante". Dall'elettrotecnica é noto che una rete elettrica si trova in condizioni di risonanza quando la parte immaginaria della sua impedenza complessiva risulta essere pari a zero. A questo punto, affinché tale parte immaginaria si annulli, é necessario che la generica rete elettrica presa in considerazione operi ad una determinata frequenza, la quale prenderá il nome di "frequenza risonante"; quest'ultima viene selezionata in base all'impedenza di carico presente. Per esempio, considerando un generico circuito RLC serie, si può ricavare il valore della frequenza di risonanza tramite la seguente formula:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

dove  $L$  indica l'induttanza del circuito, mentre  $C$  indica la capacità dello stesso.

Considerati tali concetti, l'accoppiamento induttivo risonante sfrutta appunto il principio della risonanza, tramite il quale risulta possibile aumentare la distanza a cui può essere effettuato un trasferimento di energia efficiente. Tale tipologia, in modo analogo a quella standard, utilizza una struttura a due bobine; tuttavia, in questo caso, le bobine vengono "sintonizzate" in modo da risonare alla stessa frequenza; l'energia viene quindi trasmessa fra le due bobine risonanti. Infatti, se non si operasse in condizioni di risonanza, a causa del grande traferro esistente tra i due avvolgimenti, si otterrebbero una grande induttanza di dispersione ed una piccola mutua induttanza, ottenendo così un coefficiente di accoppiamento relativamente piccolo (pari circa a 0.1), rispetto a quello che caratterizza gli accoppiamenti induttivi standard (solitamente pari a 0.95 - 0.98). A giudicare da questo aspetto, quindi, la tecnologia risulterebbe impraticabile se non fosse per il fatto che, operando alla frequenza di risonanza, il coefficiente di accoppiamento aumenta fino a valori compresi tra 0.7 - 0.9. Visto che il flusso magnetico  $\phi(t)$  generato dal

passaggio di una corrente variabile  $i(t)$  attraverso una bobina di induttanza  $L$  risulta essere pari a:

$$\phi(t) = Li(t)$$

si può facilmente dedurre che il passaggio di una corrente oscillante in un avvolgimento genera un flusso magnetico, anch'esso oscillante. Dato che in tali condizioni la bobina risulta altamente risonante, l'energia prodotta si smorza abbastanza lentamente e, collocando quindi una seconda bobina in prossimità della prima, la maggior parte dell'energia viene trasferita al secondo avvolgimento, prima di esaurirsi completamente. Tale fenomeno avviene anche se le bobine sono collocate ad una certa distanza. Ciò che permette di quantificare tale aspetto è rappresentato dal fattore di merito  $Q$ ; infatti, prendendo in considerazione un generico circuito RLC serie, la relazione che permette di ricavare il valore di questo fattore risulta essere la seguente:

$$Q = 2\pi f_0 \frac{L}{R} = \frac{1}{2\pi f_0 CR}$$

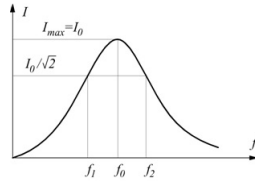
$Q$  rappresenta, quindi, un parametro che definisce la purezza di un circuito risonante in relazione alle componenti parassite; quanto più è alto il fattore  $Q$ , tanto più viene ad essere trascurabile la sua componente parassita e, quindi, tanto più a lungo dureranno le oscillazioni, prima di smorzarsi completamente. L'energia totale  $U_{tot}$  disponibile alla bobina ricevente è espressa dalla seguente equazione:

$$U_{tot}(t) = \frac{1}{2}Cv(t)^2 + \frac{1}{2}Li(t)^2$$

dove  $L$  indica il valore dell'induttanza,  $C$  indica quello della capacità,  $v(t)$  indica la tensione presente ai capi del condensatore in un dato istante e  $i(t)$  indica la corrente che scorre tramite la bobina trasmittente in un dato istante; tale energia, per effetto dell'elevato fattore di merito  $Q$  caratterizzante i circuiti risonanti, si smorzerà più lentamente, permettendo quindi alla bobina del secondario di assorbire maggiore energia, come accennato precedentemente.

L'accoppiamento induttivo risonante offre, quindi, una maggiore efficienza (fino a circa il 95 %) e funziona anche a distanze relativamente lunghe. Tali motivazioni hanno permesso a questa tipologia di accoppiamento induttivo di ricoprire il ruolo di miglior aspirante per la realizzazione dei sistemi a ricarica wireless, relativi ai cicli a pedalata assistita; infatti, oltre ai vantaggi sopra elencati, esso presenta:

- controllo efficace della potenza trasmessa, variando la frequenza; infatti, la potenza trasmessa risulta direttamente proporzionale alla corrente e quest'ultima, come si può vedere dalla Figura 5.12, presenta una proporzionalità di tipo gaussiana con la frequenza.



**Figura 5.12:** Grafico corrente-frequenza.

- controllo della corrente di magnetizzazione nella bobina trasmittente; essa, infatti, risulta essere inversamente proporzionale alla frequenza e, visto che questa corrente è responsabile di una quota parte del surriscaldamento dell'avvolgimento al primario, una sua diminuzione permette di ridurre possibili perdite nel circuito induttivo;
- eliminazione delle armoniche ad elevata frequenza prodotte dal generatore, grazie alla risposta in frequenza del generico circuito induttivo, tipica di un filtro passa-banda;
- frequenza di lavoro dell'ordine dei kilohertz.

Dall'altra parte, per quanto riguarda gli svantaggi, i principali problemi riguardanti i sistemi che utilizzano l'accoppiamento induttivo risonante consistono nella difficoltà di realizzare trasformatori risonanti che lavorino ad alte frequenze di commutazione (attorno ai 100 KHz), assicurando allo stesso tempo efficienze maggiori del 90 %, e che trasferiscano potenze dell'ordine di centinaia di watt, avendo al contempo parecchi centimetri di distanza tra le due bobine; tuttavia, grazie all'utilizzo di tecnologie adoperanti semiconduttori in silicio, e grazie all'impiego di materiali ferromagnetici, caratterizzati da bassi livelli di perdite, tali problematiche sono state drasticamente ridotte.

L'accoppiamento induttivo standard viene indicato spesso con l'acronimo *IPT*, ossia *Inductive Power Transfer*, mentre quello induttivo risonante viene identificato con la sigla *RIPT*, ossia *Resonant Inductive Power Transfer*.

In conclusione si introducono brevemente i progetti attuali di ricarica wireless che si stanno affrontando nel campo delle pedelecs.

Prima di tutto, si analizza il progetto denominato “*Eco-Project*”, portato avanti dall'Università di Napoli e riguardante l'implementazione di una stazione di bike-sharing munita di ricarica wireless. Inizialmente, per poter

testare la funzionalità di questo progetto, la stazione sarà resa disponibile solo agli studenti e allo staff universitari.

Il sistema di ricarica wireless risulta alimentato direttamente da rete, attraverso l'utilizzo di un convertitore modulare; quest'ultimo permette di gestire simultaneamente sia la ricarica induttiva risonante sia il flusso di energia derivante dal pannello fotovoltaico posto in corrispondenza di tale stazione.

Un altro progetto riguardante la ricarica wireless per cicli a pedalata assistita riguarda la società francese Arcade Cycles; rivolgendosi prevalentemente non a singoli consumatori, bensì a società di noleggio, amministrazioni pubbliche (per i servizi di bike sharing, ad esempio), hotel o aziende, i loro mezzi elettrici sono spesso usati da molte persone, e tale fattore può rendere più difficoltosa la ricarica delle batterie. Per questo motivo Arcade, insieme all'azienda tedesca Sew Usocome, ha sviluppato un sistema di ricarica senza fili delle batterie. Il funzionamento del sistema è molto semplice: è sufficiente che l'utente, al momento di restituire la bici, abbassi il cavalletto e lo ponga precisamente su una piastra metallica a terra. Il peso della bici permette di attivare un generatore di campo magnetico; di conseguenza, quest'ultimo, tramite la nota legge di Faraday-Lenz, permetterà di ricaricare per induzione la batteria.

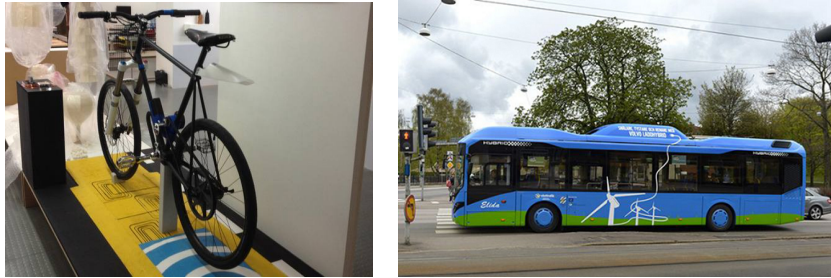


**Figura 5.13:** Progetto di ricarica wireless ideato dalla società francese Arcade Cycles, in collaborazione con l'azienda tedesca Sew Usocome.

Infine, un ulteriore progetto che prevede la ricarica senza fili per i cicli a pedalata assistita riguarda uno studente del Royal College of Art di Londra, il signor Offer Canfi. Visto che ciò che blocca molte persone nell'acquisto di una bici elettrica è rappresentato dalla necessità di doverla ricaricare frequentemente, tale studente ha pensato che, per ovviare il problema, sarebbe necessaria l'implementazione di una pista ciclabile ad induzione (denominata da lui stesso con il nome "*Flux*"), la quale possa trasmettere energia elettrica alle biciclette al loro passaggio, in modalità wireless. Data la facilità e la frequenza di ricarica che si avrebbero in una città con numerose corsie

elettriche, le bici potrebbero utilizzare dei condensatori per immagazzinare l'energia, al posto delle normali batterie; tali condensatori, presentando una capacità di circa 2.3 kWh ed un peso minore di 2 kg, permetterebbero di ottenere quindi enormi vantaggi sia in termini di peso sia di inquinamento.

Nel progetto di Canfi, oltre alla presenza di bobine sotto il manto stradale, che permetterebbero quindi la ricarica di tali condensatori, le piste *Flux* verrebbero affiancate, sul ciglio della strada, anche da pannelli solari, con l'obiettivo di fornire l'energia sufficiente per l'alimentazione delle pedelecs. Anche se fino ad ora non é stata costruita alcuna pista *Flux*, sistemi di questo tipo risultano essere già attualmente testati per la ricarica di batterie di autobus ibridi, usati per il trasporto pubblico in Svezia e in Corea, dove sono stati raggiunti valori di efficienza attorno al 75 %.



**Figura 5.14:** *A sinistra: pedelec posizionata su un breve tratto prototipale di pista Flux, per poter attuare le opportune verifiche progettuali. A destra: autobus Volvo ibridi plug-in attualmente in servizio a Goteborg (Svezia).*

# Capitolo 6

## Conclusioni

Il lavoro di tesi svolto ha permesso, quindi, di comporre una panoramica completa dei sempre piú attuali cicli a pedalata assistita; infatti, in seguito ad una breve introduzione generica, si sono affrontati sia gli aspetti normativi sia gli aspetti tecnici legati a tali mezzi elettrici, analizzando le problematiche che affliggono maggiormente il mondo delle pedelecs, e presentando infine le possibili soluzioni al riguardo.

Come ultimo argomento é stato affrontato il metodo di ricarica Wireless Power Transfer, interessante tema di ricerca che ricopre elevata importanza sia per quanto riguarda i cicli a pedalata assistita sia per il settore automotive, visto il continuo incremento di veicoli elettrici immessi nel mercato mondiale.

L'analisi di tali tematiche ha permesso, quindi, l'acquisizione di conoscenze fondamentali per applicazioni in ambito meccatronico, affrontando argomenti del tutto attuali che facilmente potranno essere riproposti in ambito magistrale o lavorativo.

Il presente lavoro di tesi rappresenta dunque il passo iniziale verso studi piú approfonditi nello specifico settore delle pedelecs, in particolare per quanto attiene alla ricarica senza fili e al controllo efficiente dei motori elettrici.

# Bibliografia

- [1] Prof. Ing. Mauro Zigliotto, appunti di *Fondamenti di macchine ed azionamenti elettrici*, A.A. 2014-2015
- [2] Al Volante, sito automobilistico italiano in cui é stato possibile reperire informazioni riguardanti il bike-sharing lanciato dall'ateneo Luiss, <http://www.alvolante.it/news/luiss-mette-l-e-sharing-un-app-347520>, data ultima consultazione: 30 luglio 2016
- [3] ArchitetturaEcosostenibile.it, soluzioni architettoniche per la riduzione dei consumi energetici, <https://www.architetturaecosostenibile.it>, data ultima consultazione: 5 settembre 2016
- [4] Bertorelle M., Prof. Dughiero F., “*Determinazione dei parametri fondamentali di un sistema di ricarica di auto elettriche while driving*”, Tesi di Laurea, Università di Padova, A.A. 2013-2014
- [5] Bici Elettriche, portale di informazioni riguardo i cicli a pedalata assistita, comprendente informazioni di base, approfondimenti tecnici, test e recensioni, <http://www.bicielettriche.bikeitalia.it>, data ultima consultazione: 1 agosto 2016
- [6] Bike Europe, il sito per il business mondiale della bicicletta, <http://www.bike-eu.com/home/nieuws/2012/4/e-bikes-are-turning-dutch-market-upside-down-1012080>, data ultima consultazione: 30 luglio 2016
- [7] Bike Italia, sito contenente informazioni riguardanti i cicli a pedalata assistita, <http://www.bikeitalia.it>, data ultima consultazione: 1 agosto 2016
- [8] BikeMi, il sito Internet che gestisce il bike-sharing comunale di Milano, <https://www.bikemi.com>, data ultima consultazione: 24 luglio 2016

- [9] Ciclismo.it, quotidiano di informazione, <http://www.ciclismo.it/dati-vendite-biciclette-2014-ancma-ciclismo-28183>, data ultima consultazione: 30 luglio 2016
- [10] DigiKey electronics, la piú vasta selezione mondiale di componenti elettronici in pronta consegna, <http://www.digikey.it/it/articles/techzone/2013/mar/an-introduction-to-brushless-dc-motor-control>, data ultima consultazione: 30 luglio 2016
- [11] Ebike Mag, il magazine della bici elettrica, <http://ebikemag.com>, data ultima consultazione: 1 agosto 2016
- [12] Electric Bikes, negozio specializzato nella ricerca e vendita dei migliori marchi nazionale ed esteri di biciclette elettriche, certificati CE, [http://www.electricbikes.it/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=1683](http://www.electricbikes.it/index.php?main_page=product_info&products_id=1683), data ultima consultazione: 30 luglio 2016
- [13] Elettronica News, sito Internet contenente notizie di elettronica professionale, <http://www.elettronicanews.it/verso-la-ricarica-wireless/>, data ultima consultazione: 1 agosto 2016
- [14] Elettronica Plus, portale di news e articoli di elettronica professionale, [http://elettronica-plus.it/wp-content/uploads/sites/2/2013/05/EO\\_427\\_030-035.pdf?34fe02](http://elettronica-plus.it/wp-content/uploads/sites/2/2013/05/EO_427_030-035.pdf?34fe02), data ultima consultazione: 1 agosto 2016
- [15] Hardware Upgrade, il sito italiano sulla tecnologia, utilizzato per reperire informazioni riguardanti il caricabatteria, [http://pro.hwupgrade.it/news/scienza-tecnologia/velocita-di-ricarica-delle-batterie-al-litio-triplicata-grazie-ad-una-nuova-ricerca\\_51639.html](http://pro.hwupgrade.it/news/scienza-tecnologia/velocita-di-ricarica-delle-batterie-al-litio-triplicata-grazie-ad-una-nuova-ricerca_51639.html), data ultima consultazione: 1 agosto 2016
- [16] Iannuzzi D., D'Ostilio R., “*Inductive charging station for Ebike Clever Mobility: A research project*”, AEIT Annual Conference - From Research to Industry: The Need for a More Effective Technology Transfer (AEIT), Trieste, 2014
- [17] Il Corriere della Sera, quotidiano italiano di notizie e approfondimenti di cronaca, politica, economia e sport, [http://www.corriere.it/ambiente/14\\_settembre\\_01/flux-pista-ciclabile-che-ricarica-bici-elettriche-loro-passaggio-6a07fd3c-31e2-11e4-a94c-7f68b8e9ffd.shtml](http://www.corriere.it/ambiente/14_settembre_01/flux-pista-ciclabile-che-ricarica-bici-elettriche-loro-passaggio-6a07fd3c-31e2-11e4-a94c-7f68b8e9ffd.shtml), data ultima consultazione: 1 agosto 2016

- [18] Il Mondo delle Telecomunicazione, sito divulgativo su tutti gli attuali sistemi di telecomunicazioni, [http://www.ilmondodelletelecomunicazioni.it/argomento.php?id\\_lezione=14&id\\_capitolo=44](http://www.ilmondodelletelecomunicazioni.it/argomento.php?id_lezione=14&id_capitolo=44), data ultima consultazione: 30 luglio 2016
- [19] Italwin, azienda italiana specializzata nelle biciclette elettriche a pedalata assistita, <http://www.italwin.it/it/itorq>, data ultima consultazione: 30 luglio 2016
- [20] Methode Electronics, azienda leader nello sviluppo di prodotti e soluzioni che utilizzano le piú recenti tecnologie, <http://it.methode.com/about/case-studies/sensorswitches5.html>, data ultima consultazione: 30 luglio 2016
- [21] MondoElettrico, sito Internet dedito all'informazione e alla formazione per il settore elettrico, <http://mondoelettrico.blogspot.it/2014/12/batterie-al-litio-ad-altissima-densita.html>, data ultima consultazione: 1 agosto 2016
- [22] MondoEnergia, sito operante nel campo di energie rinnovabili, risparmio energetico ed efficienza energetica, <http://www.mondoenergia.net/it/curiosita>, data ultima consultazione: 1 agosto 2016
- [23] Moro D., Prof. Rossetto L., *“Il caricabatterie a PLL”*, Tesi di Laurea, Università di Padova, A.A. 2010-2011
- [24] Quotidiano Enti Locali & Pa, il giornale online dedicato ai protagonisti delle Autonomie locali e della Pubblica amministrazione, <http://www.quotidianoentilocali.ilsole24ore.com>, data ultima consultazione: 30 luglio 2016
- [25] Radio-Electronics.com, Resources and analysis for electronics engineers, <http://www.radio-electronics.com>, data ultima consultazione: 5 settembre 2016
- [26] Rinnovabili.it, il quotidiano sulla sostenibilità ambientale, <http://www.rinnovabili.it>, data ultima consultazione: 5 settembre 2016
- [27] Statista, uno dei piú grandi portali mondiali di statistiche, <http://www.statista.com/statistics/>, data ultima consultazione: 22 luglio 2016

- [28] Stem “Sensors for Life”, sito web dell’azienda Stem S.r.l., leader di mercato nella costruzione di sensori magnetici di prossimità per industria ed ascensori, nonché di sistemi di sicurezza magnetici e moduli di controllo, [http://www.stemsrl.it/documents/cataloghi/STEM\\_Hall\\_Effects\\_2013.pdf](http://www.stemsrl.it/documents/cataloghi/STEM_Hall_Effects_2013.pdf), data ultima consultazione: 30 luglio 2016
- [29] Veicoli Elettrici News, sito dedicato alla mobilità elettrica e alla diffusione di veicoli ad emissione zero, <http://www.veicolielettricinews.it>, data ultima consultazione: 30 luglio 2016