

**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA**

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova  
Sede Consorziata: Università degli Studi di Trieste

Dipartimento di Ingegneria Elettrotecnica

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE  
INDIRIZZO ELETTRICA  
CICLO: XXIII

**AZIONAMENTI ELETTRICI  
PER I SISTEMI DI PROPULSIONE DI VEICOLI LEGGERI**

**Direttore della Scuola:** Ch.mo Prof. Paolo F. Bariani

**Coordinatore d'indirizzo:** Ch.mo Prof. Giovanni Martinelli

**Supervisore:** Ch.mo Prof. Roberto Menis

**Dottorando:** Mauro Favot

31 gennaio 2011

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 Propulsione elettrica per trasporti.</b>	<b>5</b>
Introduzione.	5
1.1 Un po' di storia.	5
1.2 Veicolo elettrico o Sistemi elettrici per veicoli.	6
<b>2 Generazione ed accumulo dell'energia elettrica.</b>	<b>11</b>
Introduzione.	11
2.1 Celle a combustibile.	11
Introduzione.	11
2.1.1 Principio di funzionamento standard.	12
2.1.2 Tipi di celle a combustibile.	15
2.1.3 Caratteristiche delle FC.	24
2.1.4 L'Idrogeno.	27
2.2 Accumulatori elettrici.	31
Introduzione.	31
2.2.1 Caratteristiche elettriche degli accumulatori.	32
2.2.2 Tecnologia degli accumulatori.	42
2.2.3 Sistema di gestione delle batterie (BMS).	52
2.2.4 Carica batterie.	54
2.3 Supercondensatori.	57
Introduzione.	57
2.3.1 I supercondensatori.	57
2.3.2 Struttura di un supercondensatore.	59
2.3.3 Applicazioni dei supercondensatori.	62
2.4 Accumulatori meccanici.	63
<b>3 Azionamento di propulsione.</b>	<b>65</b>
Introduzione	65
3.1 Azionamenti con motore asincrono.	65
3.2 Azionamenti con motori brushless DC.	66
3.3 Azionamenti con motori brushless AC.	67
3.4 Azionamenti con motori a riluttanza commutata.	68
3.5 Scelta del tipo di motore per la propulsione dell'imbarcazione.	69
Conclusione.	73
<b>4 I componenti utilizzati nel sistema di propulsione.</b>	<b>75</b>
Introduzione.	75
4.1 Cella a combustibile.	75

4.2	Accumulatori. . . . .	76
4.3	Fuoribordo elettrico. . . . .	76
4.3.1	Determinazione dei parametri del motore a magneti permanenti. . . . .	76
<b>5</b>	<b>Simulazioni in ambiente congiunto Matlab-Psim.</b>	<b>85</b>
	Introduzione. . . . .	85
5.1	Convertitore a tre vie. . . . .	85
5.1.1	Implementazione della simulazione. . . . .	85
5.1.2	Risultati delle simulazioni. . . . .	88
5.1.3	Considerazioni sul convertitore a tre vie. . . . .	89
5.2	Convertitore singolo. . . . .	89
5.2.1	Implementazione della simulazione. . . . .	89
5.2.2	Risultati della simulazione. . . . .	92
5.2.3	Considerazioni sul convertitore singolo. . . . .	93
<b>6</b>	<b>Realizzazione sperimentale.</b>	<b>95</b>
	Introduzione. . . . .	95
6.1	Convertitore DC-DC. . . . .	95
6.2	Alimentatore per le schede di controllo e sonde di misura. . . . .	101
<b>7</b>	<b>Tolleranza ai guasti.</b>	<b>103</b>
	Introduzione. . . . .	103
7.1	Identificazione del guasto. . . . .	103
7.2	Controllo di due fasi in regime di guasto. . . . .	106
7.3	Risultati sperimentali. . . . .	108
<b>8</b>	<b>Conclusioni.</b>	<b>111</b>
8.1	Sviluppi futuri. . . . .	112

## Sommario

L'attività di ricerca si è incentrata sullo studio dei sistemi di propulsione elettrici di mezzi di trasporto leggeri. Particolare attenzione è stata posta sulle sorgenti e sugli azionamenti elettrici innovativi utilizzati nei veicoli leggeri adibiti al trasporto di persone e/o cose.

In un'ottica applicativa si è concretizzata la possibilità di sperimentare le soluzioni che verranno via via elaborate su una piccola imbarcazione adibita al trasporto di persone. E' una scelta giustificata dal sempre maggiore interesse suscitato dalle piccole imbarcazioni destinate ad essere utilizzate all'interno di oasi marine o di ambienti particolari molto sensibili all'inquinamento prodotto dai tradizionali sistemi di propulsione con motore endotermico nonché al loro elevato livello di rumorosità acustica.

Il lavoro è iniziato con lo studio del sistema di generazione ed accumulo dell'energia adatto all'alimentazione del motore di propulsione e capace di garantire una adeguata autonomia. Tra le varie tipologie di sorgenti disponibili la cella a combustibile ha suscitato un particolare interesse anche applicativo. Nell'ambito dei mezzi di trasporto leggeri sono risultate più idonee le celle di tipo PEM (Proton Exchange Membrane) o DMFC (Direct Methanol Fuel Cell), principalmente per la loro bassa temperatura di esercizio e per la loro efficienza. Tra le due la scelta è infine caduta sulle celle di tipo PEM anche perché queste sono disponibili presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Trieste con il quale si è instaurato un rapporto di collaborazione per lo sviluppo di un sistema di propulsione per piccole imbarcazioni. Al momento si dispone di una cella PEM da 1,2kW a 25V.

Per le sue caratteristiche, la cella a combustibile necessita di un idoneo sistema di accumulo. Si sono considerate soluzioni con batterie di accumulatori. L'analisi del tipo di batterie da utilizzare ha messo in evidenza la superiorità, nell'ambito della propulsione terrestre, delle batterie al litio, per la loro elevata energia specifica. Nell'ambito di questo lavoro si è invece optato per le tradizionali batterie al piombo utilizzate per l'avviamento dei motori endotermici, particolarmente adatte anche per il ruolo di fonte energetica secondaria ed inoltre commercialmente molto diffuse ed economiche.

L'attività è proseguita con un'analisi comparativa dei tipi di motori presumibilmente utilizzabili in questo ambito. Il confronto è stato condotto in base alle prestazioni, ai pregi ed ai difetti considerando anche, come elemento di confronto, il tipo di convertitore che alimenta ciascun motore. Si sono presi in esame i motori asincroni, i motori sincroni brushless a magneti permanenti sia di tipo sinusoidale che trapezoidale e i motori sincroni a riluttanza commutata. Tra tutti, maggiormente idonei per le loro peculiarità prestazionali in rapporto all'applicazione, sono risultati i motori brushless: di tipo sinusoidale o trapezoidale a seconda della taglia e dello specifico mezzo di trasporto in cui viene installato l'azionamento. Su questi ultimi è stato focalizzato lo studio. In particolare è stato realizzato sperimentalmente un controllo con microcontrollore di un motore brushless di tipo trapezoidale. Sono state analizzate, sempre sperimentalmente, le prestazioni di soluzioni con e senza controllo di corrente in varie condizioni operative di velocità e carico. A causa di sopraggiunte difficoltà nella realizzazione della parte meccanica del propulsore da installare sull'imbarcazione è stato deciso di optare per una soluzione commerciale del propulsore. La ricerca di mercato ha coinvolto vari tipi di propulsori: thruster, fuoribordo con motori in cc o asincroni e soluzioni con motore brushless. Il prodotto maggiormente promettente ai fini applicativi immediati ma aperto a soluzioni innovative è risultato un fuoribordo elettrico fornito da Electric Motorsports il quale è costituito da un motore brushless a magneti permanenti sinusoidale avente una potenza di 2kW provvisto di convertitore e controllo ed alimentato a 48V in continua.

Un'attività complementare a quella principale è sorta dalla constatazione che nelle imbarcazioni

allo studio il sistema di propulsione è unico (se si esclude la forza muscolare umana) ed è quindi evidente la necessità di garantire per quanto possibile la presenza della propulsione anche in caso di qualche guasto al sistema stesso. A questo scopo è stata anche considerata l'opportunità di dotare il sistema di propulsione della capacità di tollerare i guasti. In questo ambito è stato approfondito lo studio di tecniche di tolleranza ai guasti per i convertitori le quali non comportino eccessivo aumento della complessità e quindi del costo a motivo del loro impatto economico sull'intero sistema.

Rimaneva da determinare lo schema circuitale più conveniente per collegare le fonti di energia al propulsore. Partendo da soluzioni previste per l'ambito veicolistico terrestre (maggiormente diffuse rispetto a quelle per l'ambito navale) la scelta è stata guidata da considerazioni di semplicità, economicità e diffusione commerciale dei componenti. Sono stati analizzati in dettaglio due schemi, entrambi comprendenti una cella a combustibile e un sistema di accumulo che attraverso uno o più convertitori dc-dc alimentano un BUS a c.c. (DC-link) dal quale il motore di propulsione preleva l'energia attraverso il suo convertitore. Il primo prevede di collegare sia la cella a combustibile sia il sistema di accumulo al DC-link attraverso un unico convertitore dc-dc il quale ha quindi due ingressi e una uscita. È la tipologia più completa e più costosa, ha il vantaggio di facilitare il controllo dei flussi di energia tra le fonti e l'utilizzatore ed inoltre garantisce una tensione, ai capi del propulsore, praticamente costante. Il secondo, simile al primo, comprende ancora un unico convertitore per adattare l'alimentazione proveniente dalla cella a combustibile ma in questo caso il sistema di accumulo è collegato direttamente al DC-link. In questo caso il valore della tensione sul DC-link dipende dalla carica della batteria stessa e con essa fluttua. La gestione dei flussi di energia viene fatta attraverso il controllo del motore e del convertitore dc-dc della cella a combustibile. Il convertitore dc-dc della seconda configurazione è stato progettato e costruito con l'ausilio di una ditta del settore operante presso l'Area di Ricerca di Trieste. Si prevede di completare l'attività sperimentale con l'allestimento dell'intero sistema di propulsione e le prove in mare appena disponibile una adeguata imbarcazione.

In conclusione, per l'impegno profuso, le competenze acquisite ed i risultati ottenuti durante il corso di Dottorato, l'ing. Mauro Favot ha pienamente dimostrato le sue attitudini alla ricerca, unite a doti di flessibilità e sintesi con una menzione particolare per la capacità di svolgere in maniera efficace e concreta il lavoro di sperimentazione. Egli ha svolto un'attività estremamente proficua ed ha acquisito un elevato grado di autonomia operativa e di maturità scientifica.

## Abstract

The research activity was focused on the study of electric propulsion systems of light transport. Particular attention was paid to novel sources and electric drives employed in light vehicles used for transport of people and/or stuff.

From an applicative point of view it was given concrete form to the possibility to experiment solutions which will be gradually developed on a small boat for people transport. It is a choice justified by greater and greater interest aroused by small boats to be used inside sea oasis or particular environments very sensible to pollution produced by traditional combustion engine propulsion systems as well to their high level of acoustic noise.

The work started with the study of the energy generation and storage system suited for propulsion motor supply and able to guarantee an appropriate autonomy. Among the different kinds of available sources fuel cell has aroused a special interest. In the field of light transport, PEM (Proton Exchange Membrane) or DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) cells resulted to be more suitable, mainly for their efficiency and low operational temperature. Between the two, PEM cells were finally chosen, also because they are available in the Department of Mechanical Engineering of the University of Trieste, with which it has been established a cooperation relationship for the development of a propulsion system for small boats. By now a 1.2kW 5V PEM cell is available.

According to its features fuel cell needs a suitable storage system. Solutions with storage batteries were examined. Analysis of the kind of batteries to be employed highlight the superiority, in the field land propulsion, of lithium batteries for their high specific energy. However in this work traditional lead acid batteries used for combustion engine start were chosen, because they are particularly suited also for the role of secondary energy source and moreover they are very diffused in the market and inexpensive.

The activity continued with a comparative analysis of the kind of motors which presumably could be used in this field. The comparison was carried out based on the performances, strengths and weaknesses taking into account also, as comparison element, the kind of converter supplying each motor. Induction motors, permanent magnet AC and DC brushless motors and the switched reluctance synchronous motors. Among all, for their performance features in relation to the application, brushless motors resulted to be the most suitable. They can be AC or DC depending on the rating and the specific means of transport in which the electric drive will be installed. The study was focused on the latter. In particular a control system for a brushless DC motor was experimentally implemented by a microcontroller. The performances of solutions with and without current control in different speed and load conditions were experimentally analyzed. Owing to arisen difficulties in the realization of the mechanical part of the propeller to be installed on board the boat it was decided to chose a propeller present in the market. The market research involved different kind of propellers: thrusters, outboards with DC or induction motor and solutions with brushless motor. The most promising product for application purposes but also open to innovative solutions was found to be an electric outboard motor provided by Electric Motorsports. The outboard is constituted by a 2kW permanent magnet synchronous motor endowed with power converter and control system and to be supplied with a 48V DC source.

An activity complementary to the main one arose from the observation that in the studied boats there is a single propulsion system (excluding the human muscle power). Therefore it is evident the need to ensure as far as possible propulsion operation also in the case of a system fault. For this purpose it was considered also the possibility to provide the propulsion system with fault tolerant ability. In this area fault tolerant techniques for power converters were investigated. The requirement was established that such techniques do not involve an excessive increasing of

complexity and therefore cost, owing to their economic impact on the whole system. It had already to be determined the most convenient circuit layout to connect the power sources to the propeller. Starting from solutions provided for land transport (more diffused than the marine ones) the choice was guided by considerations of simplicity, economy and market spread of the components. Two schemes were analyzed in detail, both including a fuel cell and an energy storage system which, by one or more DC-DC power converters, supply a DC-link from which the propulsion motor gets power by its converter. The first one contemplates the connection of both the fuel cell and the storage system to the DC-link by a single DC-DC converter, which then has two input and one output. It is the most complete and most expensive typology, it has the advantage to help the control of energy flow between the sources and the user and moreover it ensures a practically constant input voltage for the propeller. The second scheme, similar to the first one, still includes a single power converter to adapt the power supply from the fuel cell, but the storage system is directly connected to the DC-link. In this case the value of the DC-link voltage depends from the battery charge and fluctuates with it. Management of energy flows is performed by control of the motor and the DC-DC converter of the fuel cell. The DC-DC converter of the second layout has been designed and built with the help of a company in the electronics industry located at Area Science Park in Trieste. It is planned to complete the experimental work with the building of the entire propulsion system and the sea trials as soon as a suited boat will be available.

In conclusion, for his zeal, the acquired expertise and the results obtained during the Ph.D. course, Eng. Mauro Favot has fully demonstrated his research attitudes, combined with qualities of flexibility and summary, with a special mention for his ability to carry out the experimental work in an effective and concrete way. He carried out a very profitable activity and acquired a high level of working autonomy and scientific maturity.

## Introduzione.

A partire dai primi anni del 1900 tutti i tecnici si sono concentrati sul tema energia, con l'obiettivo di sostituire l'uomo con le macchine nelle attività maggiormente debilitanti, senza alcuna preoccupazione delle conseguenze sull'ambiente, l'aumento tumultuoso negli ultimi decenni del consumo di energia e lo sfruttamento indiscriminato delle relative sorgenti hanno prodotto l'aumento dell'inquinamento in tutti i suoi aspetti ed un degrado della qualità di vita sul pianeta. La tecnologia, ed i relativi interessi economici, corrono più veloci della consapevolezza delle conseguenze dell'introduzione di nuovi prodotti e processi produttivi.

Soltanto negli ultimi venti anni, sotto la spinta di un maggior interesse per queste problematiche da parte dell'opinione pubblica, dei tecnici e dei politici, si è cambiata strategia, cercando materiali e tecnologie a ridotto impatto ambientale. Si sono concentrati gli sforzi sulla ricerca di fonti di energia, introducibili a breve-medio termine, in grado di attenuare l'effetto serra, come ad esempio quelle basate sull'idrogeno, per promuovere lo sviluppo di nuove tecnologie che favoriscano l'utilizzo di fonti energetiche tuttora imprevedibili (nuovo nucleare, ecc.). La dipendenza dai combustibili fossili è un problema da affrontare proponendo soluzioni atte a limitare l'uso di tali combustibili ed i relativi effetti negativi sull'ambiente. Una delle strade più promettenti è quella della diffusione su scala mondiale della propulsione elettrica per i mezzi di trasporto.

Le recenti ricerche nell'ambito dell'accumulo dell'energia, l'affermarsi delle celle a combustibile ed i problemi conseguenti all'aumento del costo del petrolio e all'inquinamento ambientale hanno prodotto nell'ultimo decennio un rinnovato e vivo interesse per l'uso di propulsori elettrici nei mezzi destinati sia al trasporto di persone che di materiali. Nell'ambito del trasporto terrestre l'auto elettrica nasce a metà dell'Ottocento, un po' prima dell'auto a benzina ed un po' dopo le carrozze a vapore. Se alla fine del secolo, invece di grandi giacimenti di petrolio si fosse scoperto un modo efficiente per immagazzinare l'energia elettrica, oggi forse viaggeremmo tutti su veicoli elettrici e magari si parlerebbe del motore a combustione interna come possibile, ma difficile alternativa. Nel caso della locomozione meccanica ci furono vari elementi (la scoperta dei giacimenti di petrolio, l'invenzione della gomma vulcanizzata e naturalmente la messa a punto del motore a combustione interna) con i quali fu possibile costruire e perfezionare l'automobile quale noi la conosciamo oggi. All'inizio il motore a combustione era sporco, rumoroso, difficile da far funzionare e con un rendimento basso; non può dunque stupire il fatto che la trazione elettrica (assieme a quella a vapore) sia stata competitiva almeno fino ai primi anni di questo secolo. Già a partire dal 1837 l'americano Davenport brevettò un primo veicolo a trazione elettrica e già allora erano evidenti gli effetti benefici sull'ambiente che tale propulsione comporta. La tecnologia di fine Ottocento permise al belga Camille Jenatton di superare per primo il traguardo dei 100 Km/h con un veicolo elettrico, ma come ci si rese conto dopo pochi anni di sviluppo, era stato raggiunto un limite: quello della capacità energetica degli accumulatori. Tanto è vero che le successive sperimentazioni di veicoli elettrici stradali, continuate ancora negli anni Venti, non diedero i frutti sperati per quanto riguarda le automobili private. Tuttavia, la trazione elettrica con alimentazione ad accumulatori è stata (ed è) utilizzata sempre e comunque laddove non interessano autonomia e velocità, ma invece silenziosità ed assenza di gas di scarico. Il salto tecnologico dell'elettronica ha permesso di migliorare nell'ultimo decennio sia i record di velocità che quelli di autonomia. Ma l'autonomia non è ancora sufficiente, perchè il problema fondamentale non ancora risolto consiste nel disporre di un accumulatore con capacità di immagazzinare energia in quantità non dissimile da quella dei combustibili liquidi. Tentativi di produrre automobili elettriche non sono mai mancati, ma solo i veicoli elettrici per uso industriale hanno continuato a prosperare per impieghi particolari, è ben noto, infatti, come i carrelli per il movimento nelle stazioni ferroviarie, i carrelli elevatori, le piccole auto per i campi da golf ed i veicoli per i servizi porta a porta che abbiano trazione elettrica.

All'inizio degli anni '90 due soli erano i tipi di batteria utilizzabili sulle auto elettriche e cioè il

tipo al piombo/acido (con i miglioramenti dettati dalla ricerca tecnica quale ad esempio l'acido gelificato) e quello al nichel/cadmio. Altri dispositivi di accumulo chimico di energia erano e sono allo studio, così come l'accumulo meccanico (volano) e quello con supercondensatori. I limiti di questi sistemi sono noti (autonomia reale intorno ai 100 Km, con prestazioni buone per l'uso urbano e suburbano e tempi di ricarica piuttosto lunghi se paragonati a quelli necessari all'approvvigionamento dei combustibili liquidi). La soluzione interlocutoria cui si tende sembra essere quella della propulsione ibrida che offre una ridotta autonomia a zero emissioni per le zone veramente critiche sotto l'aspetto dell'inquinamento, per passare al motore a combustione e naturalmente autonomia illimitata appena fuori dalle aree anzidette. O meglio ancora, la tendenza attuale sembra prediligere la propulsione esclusivamente elettrica per i veicoli a corto raggio d'azione e la soluzione ibrida per veicoli con più ampio raggio d'azione. Si tratta di un compromesso naturalmente, ma forse l'unico praticabile almeno fino a quando non sarà stato sviluppato l'accumulatore elettrico ideale.

Ancora oggi, come un tempo, l'aspetto più critico dei veicoli a propulsione elettrica, rispetto a quelli dotati di motore a combustione interna, è l'immagazzinamento di una quantità di energia sufficiente a bordo. Si è consolidata la convinzione che la ricerca in questo settore deve coinvolgere il sistema di propulsione nella sua interezza, in cui l'azionamento costituisce uno degli elementi fondamentali.

Nell'ambito dei trasporti, la propulsione elettrica è tradizionalmente ed ampiamente diffusa nel settore dei trasporti ferroviari. Negli ultimi decenni è stata introdotta anche in ambito navale estendendo la tecnologia dei sottomarini alle navi militari e ultimamente anche alle navi mercantili.

Un aiuto molto importante alla trazione elettrica è stato dato dallo sviluppo delle celle a combustibile che riescono a fornire al veicolo una autonomia maggiore. Si tratta, infatti, di un generatore elettrochimico alimentato da un combustibile (soprattutto idrogeno) che può essere immagazzinato all'interno di serbatoi di diverse tipologie che possono essere trasportati all'interno del veicolo.

In questo elaborato si propone l'utilizzo di un propulsore elettrico anche per le piccole imbarcazioni da diporto, con la modifica sia della tipologia dell'azionamento sia della generazione dell'energia a bordo, rispetto alle grosse navi. L'idea trova terreno fertile in molteplici applicazioni, che vanno dalle imbarcazioni adibite a trasporto turistico nelle oasi o laghi, ai porti in cui è vietato l'ingresso ad imbarcazioni con motori particolarmente inquinanti.

Nel primo capitolo verrà brevemente descritto il sistema nelle sue parti principali e verranno presentate le metodologie di controllo che si intende adottare. E' previsto l'utilizzo di una cella a combustibile come generatore di energia primario e l'inserzione di batterie tampone per sopperire ai picchi improvvisi di carico.

Il secondo capitolo presenta una panoramica generale, ma allo stesso tempo sufficientemente esaustiva, sui dispositivi per la generazione e l'accumulo dell'energia (celle a combustibile, accumulatori, supercondensatori, ecc.).

Nel terzo capitolo verranno analizzati i vari azionamenti per propulsione elettrica, con particolare attenzione sul motore di propulsione. Quelli oggi maggiormente usati nel settore veicolistico sono il motore asincrono ed il motore sincrono a magneti permanenti; grandi potenzialità applicative ha anche il motore a riluttanza variabile. L'azionamento con motore asincrono può vantare la tecnologia più consolidata ed affidabile. Gli azionamenti con motore brushless hanno innegabili vantaggi rispetto al precedente ma la loro applicazione nel settore veicolistico è più recente. In particolare essi hanno registrato negli ultimi anni un notevole impulso applicativo in quanto, rispetto ad altri motori, essi sono in grado di produrre una coppia maggiore a parità di corrente e migliori prestazioni in quanto a densità di potenza e rendimento.

Nel quarto capitolo verranno presentati i dispositivi commerciali usati per questo lavoro, iniziando dalla cella a combustibile, agli accumulatori, per arrivare al fuoribordo elettrico, che rappresenta

l'unico sistema di propulsione previsto per questa applicazione.

Il quinto capitolo presenta i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate, che hanno permesso di valutare quale era la soluzione migliore per alimentare il fuoribordo elettrico tramite la cella a combustibile, ottenendo un sistema in grado di funzionare in una piccola imbarcazione.

Il sesto capitolo descrive lo sviluppo e la costruzione del convertitore per adattare i livelli di tensione dei vari componenti.

Nel settimo capitolo viene presentata una soluzione da adottare in caso di guasto al sistema di propulsione. Considerato che in queste imbarcazioni il sistema di propulsione è unico (se si esclude la forza muscolare umana) è ben evidente la necessità di garantire il più possibile la presenza della propulsione anche in caso di qualche guasto al sistema stesso. Per questo motivo si ritiene opportuno dotare il convertitore che alimenta il motore di propulsione della capacità di tolleranza ai guasti.



# Capitolo 1

## Propulsione elettrica per trasporti.

### Introduzione.

Nell'ambito dei trasporti per veicolo elettrico s'intende un mezzo di trasporto avente la propulsione elettrica. Generalmente è rivolto ai mezzi di trasporto terrestre ma, anche se meno frequentemente, può indicare anche un mezzo di trasporto circolante sull'acqua o nell'acqua (nautante) o nell'aria (aereomobile).

Con questa definizione, il sistema "veicolo elettrico" (electric vehicle, EV) può includere soltanto una batteria (battery electric vehicles, BEVs), può essere ibrido elettrico-meccanico (Hybrid electric vehicles, HEVs) ed infine ottenere energia da una cella a combustibile (fuel cell electric vehicles, FCEVs) [3].

Oggi i BEVs, gli HEVs ed i FCEVs sono in differenti stadi di sviluppo, in quanto ognuno di questi tipi di veicoli ha i suoi pregi ed i suoi difetti. Le batterie risultano essere l'aspetto più critico dei BEVs, che di solito sono piccoli veicoli piuttosto lenti ed a corto raggio d'azione (taglia della batteria ridotta). I veicoli HEVs rappresentano la naturale evoluzione dei motori a combustione interna, affiancano alle classiche prestazioni di un motore endotermico, i vantaggi di una propulsione elettrica di breve durata. I FCEVs sono i potenziali veicoli del futuro. Possiedono la tecnologia più giovane e meno evoluta ed affiancano i vantaggi derivanti da una propulsione elettrica alla maggior autonomia garantita dalle fuel cell. Naturalmente non basandosi su una tecnologia consolidata e matura, i costi dei veicoli FCEVs sono nettamente superiori agli altri due tipi [3].

### 1.1 Un po' di storia.

Il primo veicolo elettrico fu inventato nel 1818 ÷ 34 e naturalmente ottenne un discreto successo, dato che già alla fine del 19° secolo molte compagnie producevano veicoli elettrici negli Stati Uniti, Regno Unito e Francia [3].

Purtroppo con lo sviluppo del motore a combustione interna e tenuto conto delle limitazioni associate alle batterie ed alla bassa velocità raggiungibile, il veicolo elettrico fu abbandonato fino agli anni '70. In questi anni, sulla spinta dalla crisi energetica, alcune compagnie decisero di reinvestire sulla propulsione elettrica, lanciando il veicolo ibrido che di fatto aggiustava il problema legato alle batterie [3].

Ad oggi i progressi sono stati immensi, possiamo contare su metodi di immagazzinamento dell'energia più efficienti (batterie al litio, supercondensatori, ecc.), inoltre lo sviluppo dell'elettronica e dei materiali ha permesso di ridurre gli ingombri ed il peso degli accumulatori e del sistema di propulsione [3]. Tutto questo sviluppo ha ridato nuova vita al veicolo elettrico, considerato tuttora una delle risposte al problema dell'inquinamento mondiale.

## 1.2 Veicolo elettrico o Sistemi elettrici per veicoli.

Il veicolo elettrico è un sistema che coinvolge diversi settori tecnologici ed il suo studio ha caratteristica altamente multidisciplinare e comprende aspetti complessi quali la generazione, l'accumulo e l'utilizzo dell'energia. Può, quindi, essere diviso in tre parti principali: la fonte energetica primaria, l'accumulo dell'energia o fonte energetica secondaria ed infine la propulsione [3].

La parte di propulsione è assolutamente necessaria, delle altre due (generazione ed accumulo), alle volte, ne basta una sola, se c'è solo la parte di accumulo si parla di BEVs, se è presente anche la fonte energetica primaria si parla di HEVs e FCEVs. Ci potrebbe essere soltanto la fonte primaria e la propulsione, ma viene usata una configurazione simile soltanto quando la fonte energetica primaria è in grado di alimentare il carico in ogni situazione, cosa che in pratica non avviene sempre.

In Figura 1.1 viene mostrata una delle tante tipologie usata per i veicoli alimentati con batterie.

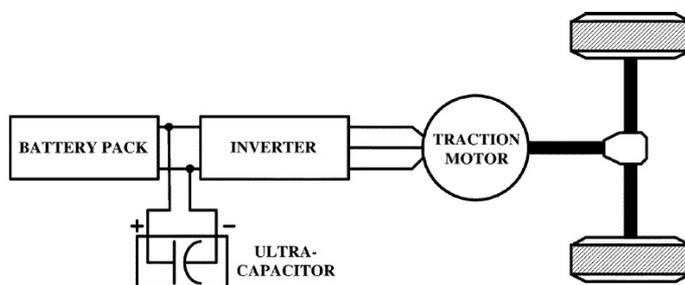
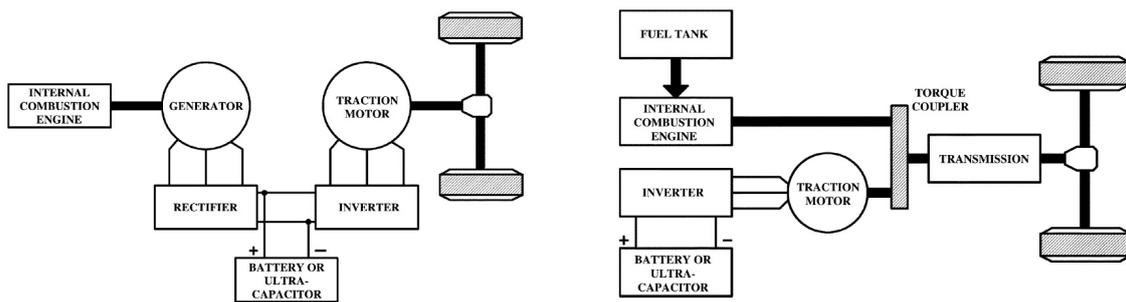


Figura 1.1: **Connessioni interne di un sistema per veicoli elettrici alimentato da batterie.**

In questo caso la batteria diventa la fonte energetica primaria, quella secondaria sono i supercondensatori. Naturalmente questo sistema soffre delle problematiche relative alla durata delle batterie, per migliorare le prestazioni si sono utilizzati schemi diversi, sfruttando le proprietà dei motori a combustione interna. Si arriva quindi alla propulsione ibrida (Figura 1.2), in cui



(a) **Schema di una propulsione ibrida serie.**

(b) **Schema di una propulsione ibrida parallelo.**

Figura 1.2: **Principali schemi della propulsione ibrida.**

si affianca ad un motore a combustione interna (sorgente principale) un pacco batterie o dei supercondensatori (sorgente secondaria). Il motore a combustione interna può essere collegato direttamente all'asse meccanico, in questo caso si parla di connessione in parallelo, visibile in Figura 1.2(b). E' la connessione maggiormente usata nelle autovetture ibride, in cui il motore elettrico aiuta la trazione solo per brevi periodo di tempo e può recuperare energia durante la

frenatura. Esiste un'altra connessione possibile (Figura 1.2(a)) ed è quella che prevede l'utilizzo del motore a combustione interna per generare energia elettrica, in questo caso la propulsione è affidata ad uno o più motori elettrici ed il sistema di accumulazione sopperisce esclusivamente ai picchi di corrente o per il recupero energetico [10].

La propulsione per l'imbarcazione che si è deciso di allestire, sarà interamente elettrica e quindi saremo nel caso di Figura 1.2(a).

Naturalmente, all'interno del sistema, possono essere presenti diversi livelli di tensione, più o meno costanti, come mostrato in Figura 1.3. Questa architettura prevede l'utilizzo di converti-

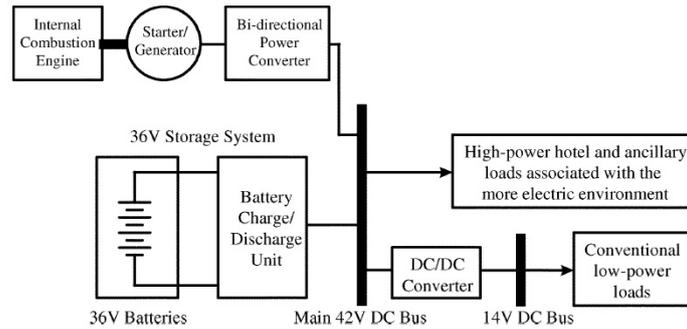


Figura 1.3: **Architettura con più livelli di tensione.**

tori DC-DC per adattare i vari livelli di tensione, ad esempio in Figura 1.3 i 36V delle batterie vengono adattati ai 42V del DC-link ed a loro volta questi ultimi ai 14V per alimentare i carichi a bassa potenza.

Un'altra importante specifica per il sistema è quella delle silenziosità, mettere un motore endotermico per generare energia elettrica non è sicuramente la soluzione ottimale, meglio utilizzare una cella a combustibile. In Figura 1.4 si può vedere una realizzazione in cui al posto del motore

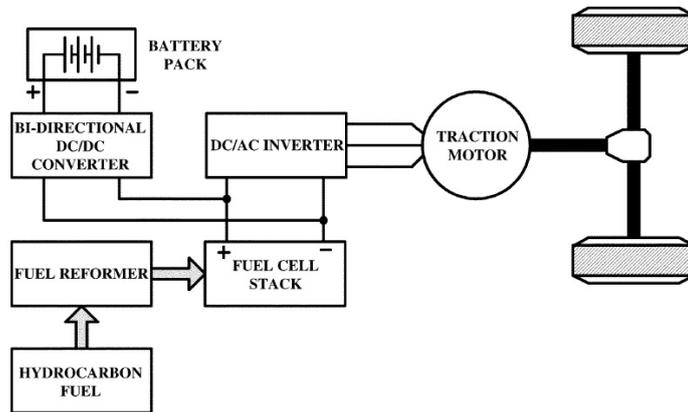


Figura 1.4: **Architettura con cella a combustibile.**

a combustione interna viene utilizzata una cella a combustibile. Vengono utilizzati due convertitori, uno tra la cella e l'azionamento per l'adattamento delle tensioni ed il secondo per gestire i flussi tra la batteria e la cella, in quanto la cella ha il problema che passando a pieno carico la sua tensione cala in modo non trascurabile.

L'architettura del sistema di Figura 1.4 ha però il problema che nel convertitore posto appena a monte dell'azionamento deve passare tutta l'energia del sistema, mentre in quello per le batterie ne passa una parte, che poi a sua volta deve rifluire nell'interno dell'altro. In quanto a efficienza

ed ingombro, il sistema può essere migliorato.

Innanzitutto è meglio dividere i convertitori e metterne uno dedicato esclusivamente alla cella ed uno dedicato alle batterie (Figura 1.5). Il sistema è completamente controllato e permette di

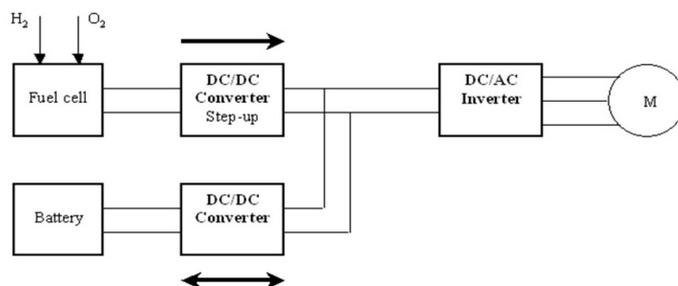


Figura 1.5: **Sistema di propulsione alimentato con cella a combustibile, con gruppo batterie e con due convertitori DC-DC indipendenti.**

perseguire il duplice vantaggio di avere una tensione sul DC-link perfettamente costante e nello stesso tempo gestire in maniera appropriata i flussi di energia dalla cella alle batterie ed al carico. Il sistema di Figura 1.5 è comunque costoso, si hanno due soluzioni. La prima prevede l'utilizzo di un unico convertitore a tre vie che collega le celle alle batterie ed al DC-link, la seconda più economica ancora sfrutta la capacità dell'azionamento di tollerare delle oscillazioni di tensione ai suoi capi, togliendo il convertitore dedicato all'accumulatore e collegando quest'ultimo direttamente sul DC-link. Si rinuncia, però, alla possibilità di avere una tensione perfettamente costante. Lo schema di principio diventa quello di Figura 1.6, la gestione dei flussi di energia

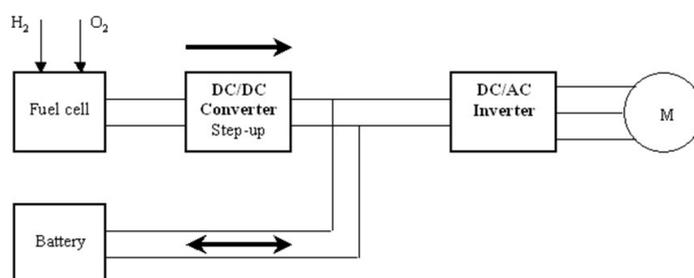


Figura 1.6: **Sistema di propulsione alimentato con cella a combustibile, con gruppo batterie e con singolo convertitore DC-DC.**

verrà fatta variando opportunamente la tensione sul DC-link per variare la corrente sulle batterie (sia in carica che in scarica). Se le batterie fossero in grado di fornire una buona corrente di spunto, in caso di carico improvviso, assorbiranno loro stesse la variazione di corrente senza che la tensione sul DC-link vari molto. Il controllo del convertitore DC-DC deve agire in modo da imporre alla cella la variazione di carico gradualmente fino al raggiungimento della corrente nominale. Se questo avviene e l'accumulatore risulta carico, a regime la cella deve alimentare tutto il carico e la corrente sull'accumulatore risulterà nulla. Se l'accumulatore, invece dovesse essere scarico, la cella deve anche ricaricare quest'ultimo con la massima corrente possibile in quel momento.

La tensione sul DC-link risulta quindi variabile e dipendente dal carico istantaneo e dalla carica delle batterie. Al posto dell'accumulatore potrebbero essere usati dei supercondensatori, ma oltre ad essere più costosi, necessiterebbero di un convertitore DC-DC proprio, in quanto, se

sprovvisi, una piccola variazione della tensione del DC-link comporterebbe una corrente elevata a causa della loro bassa resistenza interna. In più correnti troppo elevate rischiano di far esplodere i supercondensatori, mentre gli accumulatori, da questo punto di vista, risultano essere meno critici.

Esiste un sistema ancora più economico, ossia quello di rinunciare all'accumulatore e collegare direttamente la cella, con il suo convertitore, all'azionamento, come mostrato in Figura 1.7. Naturalmente se la cella non è in grado di erogare una corrente sufficiente per alimentare il por-

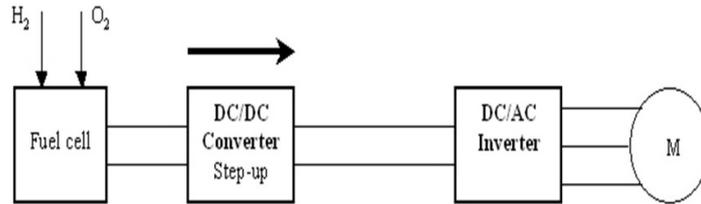


Figura 1.7: **Sistema di propulsione alimentato con cella a combustibile e con convertitore DC-DC.**

pulsore, il sistema collassa e si ferma e questo può succedere in presenza di picchi improvvisi di carico (presa di coppia o brusche accelerazioni) [8] e [9].

In particolare in questo lavoro ci si occupa di studiare, sviluppare e realizzare il sistema di propulsione per una piccola imbarcazione da diporto, avente per sorgente una cella a combustibile. L'imbarcazione deve essere spinta da un propulsore elettrico che andrà scelto opportunamente tra le varie opzioni commerciali, alimentato da una cella a combustibile, come sorgente primaria. La cella a combustibile è una PEM da 1,2KW, a vuoto fornisce 46V, mentre a carico si scende a 25V, questo salto di tensione tra vuoto e carico non si presta bene ad alimentare un azionamento, per risolvere il problema bisogna inserire tra la cella ed il carico un convertitore DC-DC unidirezionale, in quanto la cella non può recuperare energia elettrica. In Figura 1.7 è mostrato lo schema di principio di un azionamento alimentato da una sola cella a combustibile. Si nota il convertitore DC-DC, in modo da mantenere la tensione sul DC-link il più costante possibile. Questa tipologia, anche se molto economica e semplice, non garantisce un funzionamento ottimale, la cella è dimensionata per dare l'alimentazione base dell'azionamento, ma improvvisi picchi non sarebbero coperti. Per risolvere questo problema è necessario utilizzare delle batterie tampone, si sono scelti degli accumulatori al piombo per avviamento, molto utili per sopperire ai picchi appunto e le architetture potrebbero essere o quella di Figura 1.5 o quella di Figura 1.6.



## Capitolo 2

# Generazione ed accumulo dell'energia elettrica.

### Introduzione.

Come già mostrato nel capitolo 1, il sistema proposto necessita di alcuni dispositivi di generazione ed accumulo dell'energia, nel nostro caso elettrica. In letteratura ed in commercio si trovano parecchie tipologie di generatori ed accumulatori di energia (non solo elettrica), quindi si è ritenuto opportuno fare un'indagine ad ampio spettro per stabilire i pregi ed i difetti dei dispositivi principali per poi riuscire a scegliere quelli più consoni alla messa in opera nel sistema in esame.

### 2.1 Celle a combustibile.

#### Introduzione.

Le celle a combustibile (fuel cell, FC) sono delle sorgenti di energia nate da molti anni, ma solo in tempi recenti la tecnologia si è affinata tanto da avere buone prospettive di uso in molti settori, dai telefoni cellulari alle automobili. Offrono notevoli vantaggi rispetto ai tradizionali sistemi usati in queste applicazioni. Le celle sono efficienti, pulite, affidabili, non sono costituite da parti mobili e possiedono minima rumorosità, eccellente efficienza energetica ed una struttura modulare flessibile. Esse sono dei dispositivi statici che convertono direttamente l'energia chimica, contenuta nel combustibile, in energia elettrica per l'azionamento [4], [27].

La propulsione con FC è considerata una concreta alternativa a quella con motori a combustione interna. Un diretto confronto con gli altri sistemi mette in evidenza i seguenti vantaggi della propulsione con FC:

- *Zero emissioni:* una FC ha come unica emissione acqua, quando vengono utilizzati idrogeno ed ossigeno puri, altrimenti si ha anche l'emissione di altri prodotti ( $CO_2$ , ecc...). Il funzionamento è perfettamente silenzioso se si eccettua il rumore generato dagli ausiliari necessari al suo funzionamento (compressori, ventilatori, ecc...);
- *Piccolo numero di trasformazioni energetiche:* una propulsione con FC opera con lo stesso numero di trasformazioni energetiche di un processo a combustione interna, ma con efficienza maggiore, per cui non c'è un decremento di rendimento complessivo dovuto a trasformazioni energetiche aggiuntive;
- *Rapida risposta al carico:* una propulsione con FC ha una risposta molto rapida alle variazioni del carico, se paragonata ad una propulsione con motore a combustione interna, inoltre è in grado di autoregolarsi al variare delle richieste di carico, mantenendo sempre la massima efficienza;

- *Bassa temperatura operativa*: le FC di tipo PEM operano a temperatura attorno ai 70°C, molto più basse delle temperature operative del propulsore a combustione interna. Questo rende l'impianto ed il loro utilizzo sul veicolo molto più semplice;
- *Tempo di rifornimento*: un veicolo equipaggiato con fuel cell, contrariamente ai normali veicoli elettrici, ha tempi di rifornimento (ricarica) del tutto confrontabili con quelli dei veicoli endotermici tradizionali. Inoltre l'autonomia operativa non è limitata dalle dimensioni del pacco batterie, ma soltanto da quelle del serbatoio, esattamente come nei veicoli tradizionali;
- *Alta efficienza*: una propulsione elettrica a FC ha un'efficienza molto più alta di un normale motore a combustione interna, in quanto, non risentendo dei limiti dei cicli termici (Carnot) delle macchine termiche, ha un rendimento che non è limitato dalla massima temperatura raggiungibile. Questa caratteristica vale soprattutto ai carichi parziali, dove un motore endotermico ha difficoltà ad operare alla massima efficienza.

Tuttavia le FC presentano anche degli svantaggi:

- *Idrogeno*: uno degli svantaggi maggiori sta nel fatto che il processo per la produzione dell'idrogeno è ancora molto costoso, anche se è facile trovare soluzioni economiche di auto-produzione o produzione da fonti rinnovabili che, però, forniscono idrogeno di bassa qualità. Inoltre l'idrogeno è un gas potenzialmente pericoloso (altamente infiammabile) e necessita di particolari accorgimenti per lo stoccaggio a bordo di veicoli;
- *Impurezze*: allo stato attuale le FC risentono molto di eventuali impurezze presenti nel combustibile (per la presenza del catalizzatore), per cui è necessario utilizzare idrogeno sufficientemente puro, questo obbliga ad utilizzare idrogeno prodotto da elettrolisi dell'acqua o a depurarlo se prodotto tramite reforming;
- *Catalizzatore costoso*: attualmente il catalizzatore usato agli elettrodi è Platino, che è un metallo molto costoso e costituisce una delle voci di costo principali della fuel cell;
- *Ghiaccio*: per l'umidificazione delle membrane (che resta ancora uno dei punti più critici per il buon funzionamento delle FC ) si utilizza acqua pura, eventualmente sfruttando anche quella prodotta al catodo. Questo implica che a basse temperature ambiente sussista il rischio che si formi del ghiaccio all'interno della cella, danneggiandola;
- *Tecnologia recente*: l'affinamento della tecnologia delle FC è iniziato solo da pochi anni, pertanto è ancora allo stato iniziale, e perciò risulta essere (anche a causa della totale assenza di economie di scala) ancora molto costosa;
- *Assenza di infrastrutture*: un altro problema che frena lo sviluppo di veicoli con FC è l'assenza di un'infrastruttura per l'approvvigionamento del combustibile (idrogeno), che oggi risulta ancora difficile da realizzare a costi competitivi.

L'architettura del sistema di generazione a bordo può variare a seconda del combustibile utilizzato e della configurazione del sistema di propulsione. Ci sono sistemi in cui la potenza elettrica è fornita esclusivamente dalle FC, sistemi in cui la trazione è affidata ad un motore alimentato dalle FC a cui si affianca un pacco di accumulatori che forniscono l'energia necessaria in caso di forti accelerazioni e consente il recupero di energia. Nel caso la cella copra meno del 25% della potenza si parla di architettura "range extender".

In questo capitolo verrà presentata una panoramica dei principali tipi di celle con relativo principio di funzionamento.

### 2.1.1 Principio di funzionamento standard.

Le celle a combustibile sono dispositivi in grado di convertire l'energia elettro-chimica, contenuta nel carburante, direttamente in energia elettrica. Sono operativamente simili alle batterie convenzionali, trasformano energia chimica in energia elettrica in forma continua, con la differenza che le celle vengono alimentate con reagenti posti all'esterno (i più usati sono idrogeno ed

ossigeno), mentre le batterie hanno tutti i reagenti al loro interno. Nelle batterie è l'elettrodo stesso a venir consumato durante la scarica e quindi rigenerato durante la ricarica, la fuel cell continua a funzionare finchè viene fornito reagente agli elettrodi, che in questo caso non si consumano ma costituiscono soltanto il supporto sul quale avvengono le reazioni chimiche [4], [27]. Il primo scienziato a sperimentare una struttura primordiale di cella a combustibile fu William Robert Grove (1811-1896), il quale con la sua "batteria a gas voltaico" mostrò la possibilità di estrarre energia elettrica da due elettrodi (anodo e catodo), separati da un elettrolita in cui viene fatto circolare idrogeno ed ossigeno.

Nelle FC non avvengono cicli termici e ciò comporta il vantaggio di riuscire ad avvicinarsi ai rendimenti ideali.

Il combustibile è generalmente l'idrogeno mentre, per la reazione chimica, viene utilizzato come ossidante ossigeno puro o la percentuale di esso contenuto nell'aria (circa 21%). L'idrogeno e l'ossigeno danno luogo a reazioni chimiche che producono energia termica oppure elettrica, dando come scarti acqua e calore, che vengono asportati.

Una cella è costituita dagli elettrodi (anodo e catodo) e da un elettrolita (fig. 2.1(a)), al variare

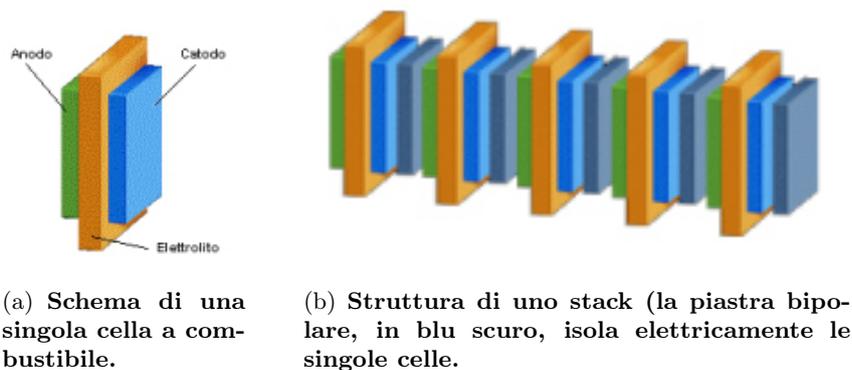


Figura 2.1: **Strutture costruttive delle celle.**

di quest'ultimo variano le caratteristiche e la vita della cella. I due reagenti non entrano in contatto direttamente, ma attraverso la mediazione dell'elettrolita. L'anodo ed il catodo rivestono un'importantissimo ruolo nella generazione della corrente elettrica: oltre al fatto che fanno da catalizzatori per le reazioni, una bassa superficie di contatto tra il combustibile, l'elettrodo e l'elettrolita porta ad avere una bassa corrente elettrica. Per superare questo problema si usa costruire gli elettrodi piatti con interposto uno strato sottile di elettrolita (Figura 2.1(a)), in modo da ridurre la resistenza elettrica di quest'ultimo e facilitare il passaggio degli ioni. Inoltre si rende l'elettrodo poroso, così che sia l'elettrolita (da un lato) che il combustibile (dall'altro lato) possano penetrarlo. In questo modo si ottiene il massimo contatto possibile tra l'elettrodo, l'elettrolita ed il combustibile aumentando la superficie di contatto [2].

Il principio di funzionamento è relativamente semplice e può essere compreso facilmente separando le reazioni che interessano ogni elettrodo. Le celle si dividono in due classi principali, a seconda del tipo di elettrolita, acido o alcalino (basico).

Per le celle con elettrolita acido, all'anodo<sup>1</sup>, viene fornito idrogeno gassoso, il quale per mezzo di

<sup>1</sup>Nei sistemi elettrochimici, l'anodo è l'elettrodo sul quale avviene una reazione di ossidazione, nel caso di una pila e di un accumulatore in scarica l'ossidazione avviene spontaneamente e produce elettroni quindi l'anodo è il polo negativo, nel caso di un accumulatore in carica, la corrente è entrante, l'anodo è l'elettrodo positivo. Nel caso di una cella elettrolitica l'ossidazione viene forzata sottraendo elettroni, quindi l'anodo è ancora il polo positivo. Nei dispositivi elettronici, l'anodo è sempre il polo positivo, infatti da lì entra la corrente, la definizione in questo caso è legata al verso della corrente e non al segno della tensione [15].

un catalizzatore (platino), ionizza e rilascia elettroni, creando gli ioni  $H^+$  (o protoni):



questa reazione rilascia energia. Mentre i protoni migrano verso il catodo attraverso l'elettrolita, gli elettroni, non potendolo attraversare, arrivano al catodo attraverso un circuito esterno, generando una corrente elettrica. Contemporaneamente al catodo, l'ossigeno gassoso reagisce, sempre con l'aiuto di un catalizzatore (platino), con gli elettroni dell'elettrodo e con gli ioni  $H^+$  dell'elettrolita per formare acqua:



perchè la reazione si mantenga gli elettroni devono passare (attraverso il circuito elettrico) dall'anodo al catodo ed anche gli ioni  $H^+$  devono fare la stessa cosa attraverso l'elettrolita, qui supposto un acido [2]. Nelle equazioni 2.1 ed 2.2 si nota che per ogni molecola di ossigeno ne occorrono due di idrogeno affinché il sistema sia mantenuto in equilibrio ed inoltre l'elettrolita deve far passare soltanto gli ioni  $H^+$  altrimenti, gli elettroni che lo attraversano sarebbero persi, andando a diminuire l'efficienza delle celle [2].

Nelle celle con elettrolita alcalino la reazione complessiva è la stessa, ma le singole reazioni agli elettrodi sono diverse, infatti in questo caso sono gli ioni  $OH^-$  ad essere mobili ed a poter passare attraverso l'elettrolita. All'anodo, questi reagiscono con idrogeno, mentre rilasciano energia ed elettroni, producendo acqua:



Al catodo, l'ossigeno reagisce con gli elettroni presi dall'elettrodo e con parte dell'acqua prodotta, si producono nuovi ioni  $OH^-$  che, passando attraverso l'elettrolita arrivano all'anodo:



Si possono fare le stesse considerazioni come per le celle ad elettrolita acido, con l'unica differenza che in questo caso sono gli ioni  $OH^-$  a passare attraverso l'elettrolita [2].

Da una cella si ottengono circa  $0,6 \div 0,7$  V, quindi bisogna collegare più celle in serie al fine di ottenere il valore di tensione necessaria (si collega il catodo all'anodo della cella successiva ottenendo uno stack). Per poter garantire un adeguato collegamento ed una omogenea irrorazione del combustibile sulla superficie degli elettrodi, si posizionano tra due elettrodi di celle diverse un piatto in grafite od acciaio opportunamente lavorato. Questi piatti vengono collegati assieme con dei distanziatori a molla, come mostrato in figura 2.2 [2].

La lavorazione del piatto incide sull'efficienza della cella, infatti i piatti devono essere il più sottili possibili per limitare le dimensioni della struttura, ma al contempo devono essere sufficientemente larghi per permettere al combustibile di arrivare agli elettrodi, inoltre devono permettere al calore di essere trasportato all'esterno e devono prevedere un sistema di raffreddamento. Un esempio di piatto è riportato in figura 2.3, in cui si vedono quattro piatti opportunamente lavorati, con canali e fori. In questo caso il calore è smaltito attraverso un fluido refrigerante (di solito aria) fatto passare attraverso i fori. In figura 2.2, invece, la ventilazione era garantita dalle molle che tenevano in contatto i piatti e che allo stesso tempo creavano dei canali di ventilazione [2].

Il piatto bipolare è la parte più delicata in una cella, in quanto è abbastanza complesso da realizzare e la scelta del materiale con cui costruirlo è spesso difficile. La grafite è il materiale più usato, ma è anche di difficile lavorabilità (fragile), l'acciaio è un buon materiale ma non resiste alle corrosioni di alcune sostanze presenti in alcuni tipi di celle, infine, i materiali ceramici, molto costosi, sono usati nelle celle con temperature di funzionamento molto alte. Come si può immaginare il piatto bipolare dà un contributo notevole al costo di una cella a combustibile, anche perchè il materiale deve garantire la perfetta tenuta del combustibile (che di solito è un gas), deve permettere ad esso di giungere agli elettrodi in maniera omogenea e non deve presentare crepe dovute all'invecchiamento [2].

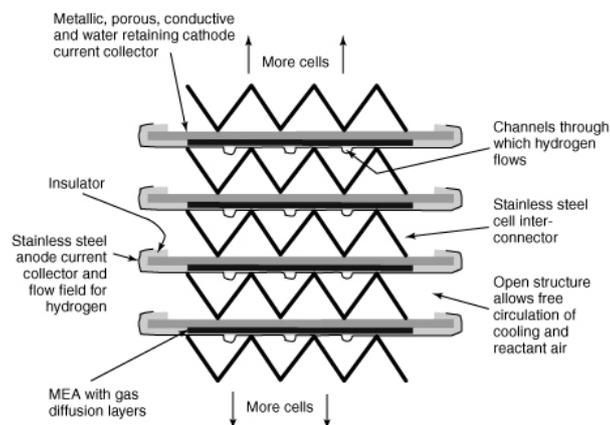


Figura 2.2: **Struttura longitudinale di celle a combustibile tipo PEM.**

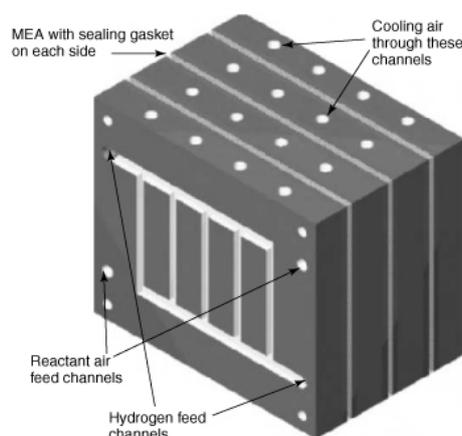


Figura 2.3: **Pila di tre celle, con piatti bipolari.**

### 2.1.2 Tipi di celle a combustibile.

Purtroppo l'idrogeno non è un combustibile sempre disponibile ed è questo il motivo principale per cui sono stati studiati e proposti numerosi tipi diversi di celle, i quali differiscono principalmente per l'elettrolita e il combustibile usati e per la temperatura di funzionamento. Le tipologie fondamentali di celle sono in tutto 6 [2].

#### Alcaline Fuel Cell (AFC).

Le **AFC** o celle a combustibile alcaline sono le celle più antiche e trovano ancora oggi impiego nella tecnologia spaziale e nei motori dei sottomarini. Sono le uniche che richiedono idrogeno e ossigeno puri per la trasformazione energetica, perchè anche minime impurità distruggono la cella. Lavorano ad una temperatura compresa tra i 70 ed i 120 °C. L'elettrolita è una soluzione acquosa alcalina (idrossido di potassio KOH), che circola liberamente nella cella o è contenuta in una matrice di asbesto.

Gli elettrodi sono costituiti da nichel, argento, metalli nobili e come catalizzatore, per il processo di ossidazione, si utilizza il platino.

Le reazioni che avvengono in queste celle sono le 2.3 e 2.4, mostrate nel paragrafo 2.1.1. In Figura 2.4, sono illustrate le reazioni che avvengono in una cella AFC. All'anodo l'idrogeno si ossida

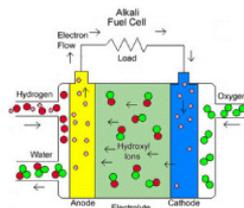


Figura 2.4: **Illustrazione delle reazioni di ossidoriduzione in una AFC.**

producendo elettroni che attraversando il circuito elettrico esterno raggiungono il catodo. Qui si ricombinano con l'ossigeno formando ioni, i quali, attraverso l'elettrolita, ritornano all'anodo dove si ricombinano con l'idrogeno producendo acqua che viene scaricata all'esterno assieme all'idrogeno in esubero.

Per l'uso normale, la cella AFC è poco appropriata, in quanto la necessaria purezza dei gas rende il sistema molto costoso e anche la durata di vita della cella è molto limitata a causa della perdita di tensione di  $15 \div 50$  mV ogni 1000 ore di funzionamento. Inoltre le AFC sono caratterizzate dalla necessità di avere complicate periferiche; i circuiti della cella, prima di ogni funzionamento, vengono puliti con una iniezione di azoto. In questa occasione tutte le singole celle devono essere portate a tensione nulla e per far ciò viene cortocircuitata l'uscita. Dopo tale procedimento può essere iniettato idrogeno nelle singole celle, che risultano così attivate ed ai loro capi si ottiene una tensione di circa 100 mV. La cella è quindi pronta per ospitare la reazione, che inizia con l'immissione di ossigeno al catodo. Inizialmente la cella non può essere portata a pieno carico, bisogna attendere che l'elettrolita raggiunga la temperatura di lavoro ( $70 \div 120$  °C). Questo è uno dei principali problemi che rende queste celle non utilizzabili nella trazione, anche se attualmente sono in fase di sviluppo delle AFC per questo tipo di applicazioni. Purtroppo hanno un altro grosso svantaggio che è quello di dover essere alimentate con ossigeno puro e non con l'aria, per ottenere rendimenti elevati (70%). Volendo usare l'aria si deve prima eliminare il biossido di carbonio ( $CO_2$ ) che "avvelena" l'elettrolita (con conseguente riduzione del rendimento e della vita dell'elettrolita stesso) e questa eliminazione richiede dispositivi tecnici supplementari quali filtri a carboni attivi, che hanno il compito di ridurre la concentrazione della ( $CO_2$ ) ad un valore di 5 ppm<sup>2</sup>. Se viene utilizzato dell'idrogeno non puro e dell'aria filtrata invece di ossigeno, si ha una riduzione del rendimento fino al 50%. Purtroppo raggiungere una concentrazione di 5 ppm richiede dei filtri costosi ed ingombranti, ma anche indispensabili.

Altro svantaggio è che la soluzione elettrolitica  $KOH$  è molto corrosiva.

Senza le celle a combustibile alcaline, i viaggi spaziali con equipaggio umano non sarebbero stati possibili. Sia nella missione Apollo e nel programma Apollo-Soyuz, sia nello Skylab e negli Space shuttle sono stati e sono ancora in uso celle a combustibile alcaline. Questo conferma che la tecnologia delle AFC è la migliore in assoluto, purtroppo la bassa tolleranza alle impurezze presenti nei combustibili ed il costo elevato ne hanno limitato la diffusione su scala commerciale.

### **Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM).**

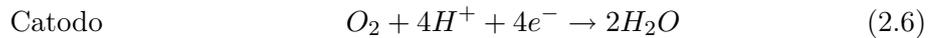
Le **PEM** (Proton Exchange Membrane) o **PEFC** (Polymer Electrolyte Fuel Cell), conosciute anche come celle ad elettrolita polimerico, lavorano a temperature piuttosto basse e vengono utilizzate più o meno ovunque, soprattutto per piccoli sistemi nel settore dei trasporti. Hanno il più alto coefficiente di produzione elettrica per unità di peso e volume rispetto alle altre celle in commercio [1]. Le loro prestazioni sono buone ed il loro funzionamento richiede come comburente solo l'ossigeno dell'aria. L'idrogeno può essere prodotto tramite processo di "reforming".

<sup>2</sup>A titolo informativo si ricorda che l'aria contiene una concentrazione di  $CO_2$  di 350 ppm, valore destinato a crescere se si continuerà con la mentalità del secolo scorso.

Sono celle semplici ed essenziali, sono composte da una membrana solida di polimero solforato (nafion) per lo scambio protonico, nella quale i protoni ( $H^+$ ) sono liberi di muoversi; il principio di funzionamento è lo stesso delle celle ad elettrolita acido. Gli elettrodi sono in carbone, su cui è depositato il catalizzatore (platino o sue leghe), necessario per aumentare la velocità delle reazioni, penalizzata dalla bassa temperatura di funzionamento. Anche se il catalizzatore è molto costoso, incide poco nel prezzo complessivo di una cella PEM in quanto è presente in piccole quantità [2].

Questo tipo di cella a combustibile è molto delicata e l'idrogeno deve essere purissimo al 99%; una quantità di  $CO_2$  superiore all'1% danneggerebbe in modo irreversibile il catalizzatore, bloccando le reazioni all'anodo e compromettendo le prestazioni della cella.

Le reazioni che avvengono agli elettrodi sono:



In figura 2.5 sono illustrate le reazioni 2.5 ed 2.6, che avvengono agli elettrodi di una cella PEM.

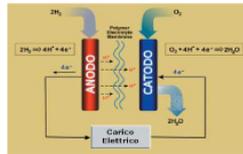


Figura 2.5: **Illustrazione delle reazioni di ossidoriduzione in una PEM.**

Come già ampiamente detto in precedenza in queste reazioni intervengono soltanto idrogeno (combustibile) ed ossigeno dell'aria (comburente).

La membrana polimerica permette il passaggio degli ioni  $H^+$  attraverso essa e costringe gli elettroni a passare attraverso il circuito esterno, per raggiungere il catodo essa viene realizzata mescolando dei polimeri con una polvere calibrata, la quale verrà aspirata in un secondo momento, ottenendo la porosità necessaria. Le membrane di uso commerciale, hanno le seguenti caratteristiche:

- assorbono facilmente l'acqua;
- sono impermeabili ai gas (è garantita la separazione tra idrogeno ed ossigeno);
- hanno spessore di circa  $50 \div 175 \mu\text{m}$ .

Al catodo gli elettroni e le cariche positive si ricombinano con l'ossigeno e si ha la reazione di riduzione. L'acqua prodotta viene espulsa, assieme all'ossigeno in eccesso, con tutte le problematiche relative, in quanto nelle celle PEM la membrana deve essere sempre umida e la temperatura deve essere mantenuta costante. Per evitare la disidratazione della membrana, tra gli apparati ausiliari, è previsto un compressore, accoppiato ad un sensore di umidità, che ha il compito di umidificare l'aria.

L'idrogeno con la purezza richiesta non è facilmente reperibile. Teoricamente per fronteggiare questo problema si può utilizzare metanolo direttamente con le celle PEM<sup>3</sup>, gas o liquido oppure estraendo l'idrogeno dal combustibile (se esso è metano si parla di reforming)[2].

Il processo di reforming del metanolo ( $CH_3OH$ ) è molto semplice (fig. 2.6), esso viene miscelato ad acqua pura e vaporizzato, entra nel reformer e si ottiene idrogeno ( $H_2$ ) ed anidride carbonica ( $CO_2$ ) [3]. L'idrogeno viene purificato dall'anidride carbonica e mandato, come combustibile, alla cella per ottenere elettricità ed acqua pura, che può essere riutilizzata per un nuovo processo di reforming. La purificazione è utile per togliere alcuni sottoprodotti indesiderabili come l'anidride carbonica, che potrebbe avvelenare il catalizzatore di alcuni tipi di celle. Anche se questa

<sup>3</sup>Le PEM fatte funzionare con metanolo prendono il nome di "Direct Methanol Fuel Cells" o DMFC, che verranno trattate in dettaglio al paragrafo 2.1.2.

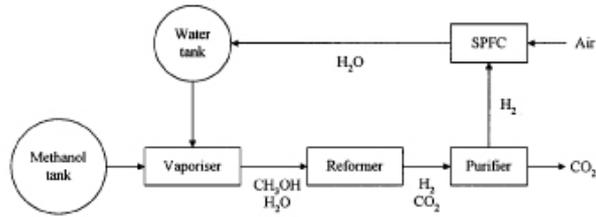


Figura 2.6: Sistema di reforming del metanolo.

tecnologia può sembrare in controtendenza rispetto all'obiettivo di zero-emissioni, in realtà è migliore dei motori a combustione interna, infatti non si hanno generazioni dannose di monossido di carbonio, ossidi di azoto ed idrocarburi [3].

Le PEM lavorano ad una temperatura compresa tra 60°C e 100°C; anche questa caratteristica ne facilita la diffusione rispetto alle altre tecnologie disponibili. Sperimentate per la prima volta durante i primi programmi spaziali negli anni 60, queste celle trovano applicazione nella trazione elettrica (auto ed autobus), grazie alla loro elevata densità di potenza, all'assenza di problematiche legate alla corrosione ed alla rapidità di transitorio di avviamento (meno di 1 minuto). Per contro, sfortunatamente le celle PEM hanno livelli di potenza molto bassi, per questo vengono utilizzate per alimentare equipaggiamenti elettronici portatili. Tali celle, si prevede verranno utilizzate per piccole potenze, in cui le applicazioni richiedano veloci variazioni di carico, infatti le PEM possono essere regolate molto rapidamente [2].

### Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC).

La cella ad acido fosforico **PAFC** (Phosphoric Acid Fuel Cell) è il tipo che ha raggiunto la maggior maturità tecnologica ed economica, è stata la prima ad essere prodotta in quantità industriali ed ad essere diffusa in tutto il mondo. Molti sistemi da 200 kW fabbricati dalla International Fuel Cells Corporation (l'attuale UTC Fuel Cells Inc.) sono installati negli Stati Uniti ed in Europa, grazie alla sua alta temperatura d'esercizio essa è ideale per l'applicazione in centrali di cogenerazione [2].

Gli elettrodi possono essere di oro, titanio o carbone, ricoperti di platino (catalizzatore), ha una temperatura di funzionamento di circa 220°C, ed è la più vecchia cella che opera ad alte temperature, con il problema che in uscita c'è vapore a circa 150°C. Sono celle più grandi e pesanti delle PEMFC, ma vengono tuttora usate nelle applicazioni in cui è richiesto un funzionamento affidabile a potenza continua [1]. L'elettrolita della cella è l'acido fosforico, altamente concentrato, incorporato in una matrice amorfa di carburo di silicio; uno svantaggio è che, a temperature sotto i 42°C, l'acido fosforico cristallizza e questo processo irreversibile rende la cella inutilizzabile. Inoltre l'elettrolita è altamente corrosivo e tende ad evaporare facilmente.

Le reazioni elettrodinamiche, illustrate in figura 2.7, che avvengono in questo tipo di cella sono:

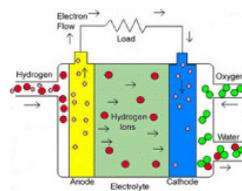
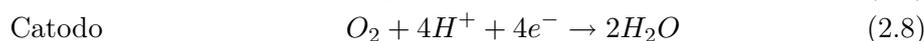


Figura 2.7: Illustrazione delle reazioni di ossidoriduzione in una PAFC.



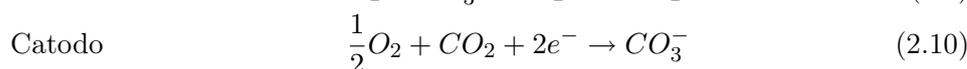
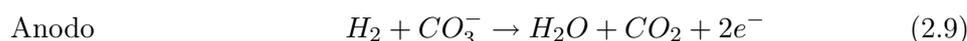
Come si può notare dalla 2.7 e dalla 2.8, nel processo partecipano soltanto idrogeno ed ossigeno. Nel caso venga utilizzato gas di sintesi si rende necessario il processo di "reforming" del gas naturale (soprattutto metano), che converte tutto l'ossido di carbonio in idrogeno ed anidride carbonica, dal momento che la presenza di  $CO$  comporta una riduzione del rendimento, nonché un avvelenamento del sito catalitico. Purtroppo l'attrezzatura necessaria al processo incrementa notevolmente il costo, la complessità e la taglia del sistema.

Le principali caratteristiche delle celle PAFC sono: la temperatura di esercizio compresa tra i  $150^\circ\text{C}$  ed i  $220^\circ\text{C}$ , l'efficienza attestata sul 40%, la possibilità di una cogenerazione, dovuta alle temperature di esercizio, soltanto per usi non industriali e l'alta tolleranza alla  $CO_2$ , per cui è possibile alimentare la cella con idrogeno non puro o con gas di reforming non purificati. Le PAFC vengono usate per la loro semplicità, affidabilità e facile manutenzione. Molti sistemi con celle PAFC funzionano in modo continuo da periodi di un anno o più, esclusivamente in impianti di cogenerazione (con potenza elettrica da 200KW e potenza termica da 220KW) [2]. Inoltre, grazie allo studio sui materiali, queste celle sono molto promettenti per l'uso in sistemi di media taglia alimentati da gas naturale. Infatti in questi sistemi, in cui oltre ad un'alta efficienza elettrica sia importante anche un basso impatto ambientale (edifici commerciali, grandi alberghi, ospedali ed impianti di telecomunicazione), la cella PAFC è attualmente la soluzione ottimale.

### Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC).

La cella da carbonati fusi **MCFC** (Molten Carbonate Fuel Cell) è una cella ad alta temperatura (tra  $580^\circ\text{C}$  e  $660^\circ\text{C}$ ). È il tipo di cella più pesante e più grande ed è lievemente più complessa delle altre, a causa del diossido di carbonio che viene pompato nella cella assieme all'idrogeno per mantenere funzionante l'elettrolita [1], [2]. Queste celle hanno il vantaggio di non richiedere la produzione di idrogeno, sono direttamente utilizzabili, senza reforming, gas naturale, biogas e GPL o gas di carbone ( $K_2$  e  $CO_2$ ).

Le reazioni elettrochimiche, illustrate in figura 2.8, che avvengono agli elettrodi sono:



L'elettrolita usato è una fusione calda e corrosiva di carbonati alcalini, normalmente carbonato

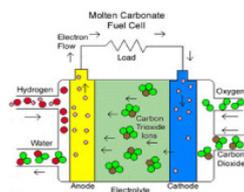


Figura 2.8: **Illustrazione delle reazioni di ossidoriduzione in una MCFC.**

di litio e carbonato di potassio ( $Li_2CO_3$  o  $K_2CO_3$ ), contenuta in una matrice ceramica porosa che forma anche la base elettrica dell'elettrodo [2]. Gli elettrodi sono a base di nichel: il catodo è in ossido di nichel litato e l'anodo è costituito da nichel con piccole percentuali di cromo.

Questo tipo di celle non necessitano di metalli preziosi come catalizzatori (grazie a reazioni cinematicamente più veloci), possono essere alimentate con una maggior tipologia di combustibili, in quanto la cella può essere alimentata direttamente con gas naturale o distillati leggeri (tutti i

derivati del petrolio) senza reforming esterni. Nel caso in cui il gas ricco di idrogeno sia ottenuto da processi di reforming di idrocarburi o gassificazione del carbone, le reazioni all'anodo coinvolgono sia l'idrogeno che il monossido di carbonio presente. In questo caso la  $CO$  reagisce con l'acqua che si forma producendo altro idrogeno. L'anidride carbonica in uscita all'anodo viene riciclata al catodo. A differenza delle altre celle, l'acqua viene prodotta all'anodo.

Le alte temperature di funzionamento (attorno ai  $650^{\circ}C$ ) offrono la possibilità di una cogenerazione, aspetto sfruttato nel settore industriale. L'efficienza raggiungibile si attesta attorno al 45% oppure  $60 \div 70\%$  in cicli combinati con turbina [1].

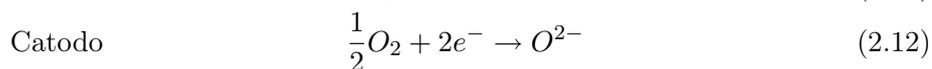
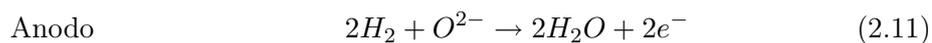
Come si può notare dalla tabella 2.1 il più piccolo sistema di celle MCFC è almeno tre volte un PEMFC di pari potenza, inoltre le celle MCFC peserebbero quattro volte quelle PEMFC. Per queste ragioni, per il fatto che l'elettrolita è una miscela altamente corrosiva di sale fuso, che potrebbe risultare pericoloso se fuoriuscisse, e per le alte temperature di esercizio, le celle MCFC sono una scelta non indicata per usi in imbarcazioni e/o veicoli, infatti vengono sviluppate per applicazioni fisse. I normali impianti hanno una potenza di 300KW, ma sono possibili anche potenze di alcuni Megawatt. Oltre a queste applicazioni fisse, sono in sviluppo anche celle MCFS per motori navali di grossa taglia, anche se nonostante i progressi compiuti negli ultimi anni, le MCFC incontrano ancora qualche difficoltà ad affermarsi.

### Solid Oxide Fuel Cell (SOFC).

La cella a combustibile da ossidi solidi ceramici **SOFC** (Solid Oxide Fuel Cell) è la più ricercata nel panorama della tecnologia Fuel Cell, utilizza l'ossigeno dell'aria e l'idrogeno. Lavora con una temperatura di funzionamento alta, è più grande e più pesante della PEM, ma risulta la metà in termini di taglia e peso della MCFC [1]. Opera a temperature comprese tra  $600$  e  $1000^{\circ}C$ , con il vantaggio di avere, all'interno della cella, un parziale reforming di gas naturale (o gas di carbone o tutti i derivati leggeri del petrolio) in idrogeno, senza il bisogno di un'unità separata. Le SOFC sfruttano, così, il pieno vantaggio derivante dal concetto di cella a combustibile [2].

L'elettrolita è una miscela solida di materiale ceramico (biossido di zirconio stabilizzato con ossido di ittrio) che non dà problemi di sicurezza (non ci sono perdite, problemi di corrosione, di evaporazione e di gestione dell'acqua) e nonostante le celle operino ad alte temperature, l'elettrolita resta sempre e comunque allo stato solido [1]. La maggior parte dei materiali ceramici sono sufficientemente conduttivi alle alte temperature di lavoro della cella e favoriscono così il raggiungimento di buone prestazioni. Gli elettroliti sostenuti da biossido di zirconio hanno dimostrato di essere stabili e di avere una ragionevole conduttività. Inoltre, per costruire componenti di cella che resistano alle alte temperature, sono necessari speciali materiali di metallo o ceramica. Per le applicazioni, dovrebbe essere vantaggioso usare temperature di lavoro più basse. A queste temperature, comunque, occorre considerare catodi migliori ed elettroliti più conduttivi. Elettroliti a base di ossido di cerio sono più conduttivi di quelli a base di ossido di ittrio e insieme all'acciaio inossidabile, possono fornire un modello di SOFC competitivo [6].

Le reazioni elettrochimiche, illustrate in figura 2.9, che avvengono agli elettrodi sono:



In figura 2.9 si può notare che le reazioni all'anodo coinvolgono sia l'idrogeno che il monossido di carbonio presente nel combustibile. Quest'ultimo reagisce sia con gli ioni di ossigeno per produrre anidride carbonica, sia con l'acqua per produrre idrogeno.

Le reazioni 2.11 e 2.12 mostrano che, per questo tipo di cella, sono gli ioni  $O^{2-}$  a migrare attraverso l'elettrolita solido (più precisamente attraverso le vacanze presenti nella struttura del cristallo) verso l'anodo.

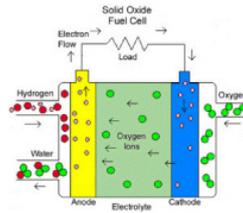


Figura 2.9: **Illustrazione delle reazioni di ossidazione ed ossidoriduzione in una SOFC.**

Agli inizi dello sviluppo delle SOFC, è stato osservato che elettrodi di  $LaSrMnO_3$  erano stabili alle condizioni di lavoro della cella e possedevano un'alta attività per la riduzione ad alte temperature dell'ossigeno. Tuttavia, a causa del basso coefficiente di diffusione che questo gas presenta al catodo, è più appropriato utilizzarne uno a due fasi, perché risulta avere un sovrapotenziale più basso per la riduzione dell'ossigeno. Pertanto, dal momento che erano stati condotti studi sul biossido di zirconio drogato con ittrio al fine di essere utilizzato come elettrolita, si è osservato che un catodo costituito da una miscela di  $LaSrMnO_3 / ZrO_2 - Y_2O_3$  forniva una migliore conduttività per gli ioni  $O^{2-}$  e possedeva una maggiore area attiva, migliorando così anche l'attività catalitica complessiva a temperature più basse. Altri materiali studiati per essere usati come catodo sono i perovskite [6].

Gli anodi di una SOFC sono di norma di "cermet" (composto di ceramica-metallo) stabilizzati con  $Ni$ . In genere, gli anodi a base di  $NiO$  sono un po' solubili nell'elettrolita  $ZrO_2 - Y_2O_3$ , ma stabilizzano la sua fase cubica. Mescolando polvere di  $NiO$  a  $ZrO_2 - Y_2O_3$  e resina legante è possibile produrre uno strato funzionale per l'anodo, sul quale può essere depositato e sinterizzato l'elettrolita  $ZrO_2 - Y_2O_3$ . Il catodo può essere poi spruzzato su questo strato, formando così una struttura planare di SOFC supportata dall'anodo. Quest'ultimo nelle SOFC può prender parte al processo di reforming interno o all'ossidazione diretta del combustibile. Gli elettrodi di rutenio, su supporto di  $TiO_2$  o  $LaCrO_3$ , invece, sono in grado di riformare localmente  $CH_4$  con il vapore prodotto dall'ossidazione dell'idrogeno che avviene all'anodo. Gli anodi di  $ZrO_2 - Y_2O_3$  drogati con ossido di cerio, infine, hanno mostrato di avere un'alta attività catalitica e una migliore attività ionica ed elettronica rispetto agli anodi a base di  $Ni$ . L'aggiunta di  $MnO_2$  a questo anodo aumenta l'adesione tra l'anodo e l'elettrolita di  $ZrO_2 - Y_2O_3$  ma diminuisce le performance dell'elettrodo [6].

Al fine di migliorare le performance della cella a combustibile, favorendo le reazioni all'interno di essa, sono stati sviluppati diversi modelli di SOFC. In base alla struttura è possibile suddividere le SOFC in due tipi differenti: a "substrate-supported" ed a "self-supporting". Nel primo caso è presente un substrato che sostiene elettrodo ed elettrolita fornendo alla cella ed allo stack la necessaria stabilità meccanica. Nel secondo caso l'anodo e il catodo vengono usati come struttura di supporto per gli altri componenti della cella e non viene usato alcun substrato. In quest'ultimo caso, inoltre, l'anodo ed il catodo devono essere più spessi di quelli presenti nella cella a "substrate-supported" per fornire una stabilità meccanica sufficientemente alta.

Per quanto riguarda la geometria, anche qui esistono due modelli: quello piano planare e quello tubolare.

La geometria tubolare, sviluppata da Westinghouse (ora Siemens-Westinghouse) è senza dubbio il miglior modello conosciuto. Di esso si possono distinguere due sistemi: quello in cui il flusso del gas è parallelo (Figura 2.10(a)) all'asse del tubo e quello in cui è perpendicolare (figura 2.10(b)). Tali celle semplificano le problematiche inerenti la diffusione e la tenuta dei gas ma presentano difficoltà per le elevate dimensioni dei componenti ceramici e per i contatti.

Il modello planare o piano, riportato in Figura 2.11, invece, è molto efficiente e più conveniente di quello tubolare, consente di realizzare contatti elettrici più efficaci ed è compatibile con il concetto di "impilaggio" proprio delle celle a combustibile. È comunque presente il problema di

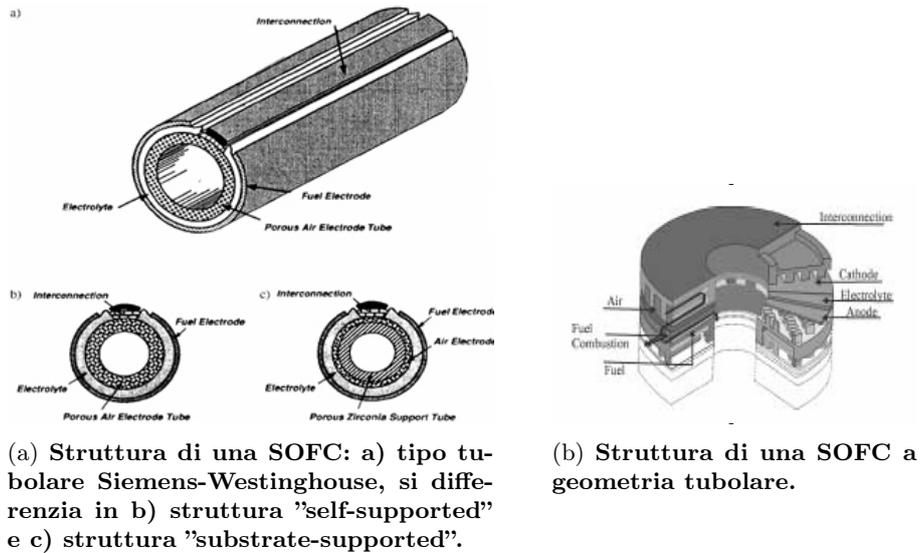


Figura 2.10: Principali strutture costruttive delle celle SOFC.

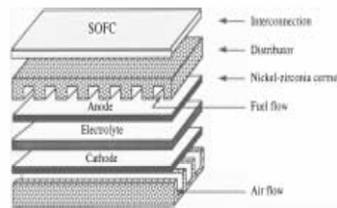


Figura 2.11: Struttura di una SOFC a geometria planare.

trovare buoni materiali di interconnessione, tra i quali, è stato osservato che a basse temperature l'acciaio inossidabile dà migliori performance. Alle alte temperature possono essere usati leghe di metallo o materiali in ossido di  $Cr - La$ . In un modello planare è possibile rimuovere calore usando un flusso di aria catodica oppure attraverso il reforming interno, dove il calore viene sfruttato per la conversione del combustibile in  $H_2$ .

La cella monolitica planare, mostrata in Figura 2.12 combina i vantaggi sia della configurazione

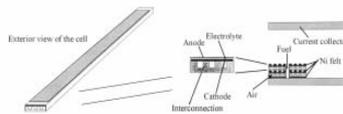


Figura 2.12: Struttura di una SOFC a geometria monolitica planare.

planare che di quella tubolare. Il corpo di appoggio è costituito dal catodo e da un materiale di interconnessione ed è modellato in modo da formare una lunga struttura planare. Su questa viene spruzzato l'elettrolita che, coprendo completamente il catodo, dà origine ad una sottile pellicola su cui viene, poi, costruito l'anodo. La sottile struttura planare abbrevia i percorsi della corrente, come per tutti gli altri modelli planari, rendendo i contatti elettrici più efficaci ed inoltre è più semplice realizzare lo stack. Il gas ossidante è isolato nella parte interna dal materiale di interconnessione così non occorre una struttura extra-sigillata, mentre il combustibile è fornito dall'esterno.

Il modello a "single-chamber", a seconda della disposizione degli elettrodi sull'elettrolita, può

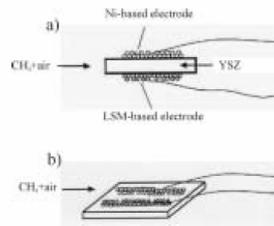


Figura 2.13: **Struttura di una SOFC a geometria a "single-chamber"**.

essere di due tipi. In uno gli elettrodi sono sistemati in ambo i lati dell'elettrolita e la densità di potenza aumenta al diminuire dello spessore dell'elettrolita stesso (caso a) in Figura 2.13). Nell'altro gli elettrodi sono posizionati su uno stesso lato dell'elettrolita e sono distanziati di poco l'uno dall'altro (caso b) in Figura 2.13). In quest'ultimo caso la densità di potenza aumenta al diminuire della distanza tra i due elettrodi (la distanza ottimale è di circa 0.5mm). Il modello a "single-chamber", inoltre, non presenta il problema della separazione dei gas, in quanto sia l'anodo che il catodo stanno a contatto con la stessa miscela di combustibile e aria. Per questo motivo si rende necessario avere un catodo che non sia in grado di ossidare il combustibile. A tale scopo vengono usati catodi di  $LaSrMnO_3$  (manganito di lantanio drogato con stronzio). L'anodo, invece, è un elettrodo di ossido di cerio drogato con gallio. Le performance di questa cella, comunque, sono piuttosto basse [7].

Con le celle SOFC si ottengono alti rendimenti (50% su piccoli sistemi e 70% su sistemi con applicazione di turbine che sfruttano l'elevata temperatura delle celle), non servono catalizzatori, che di solito sono metalli preziosi, ed hanno una densità di potenza elevata, la quale permette una maggior compattezza del sistema. Tra le varie tipologie di cella, è l'unica che può risultare altamente competitiva nel mercato, solitamente l'ambito di applicazione è la produzione di energia decentralizzata con potenze a partire da 100KW. Oggi le SOFC si prestano sia ad applicazioni fisse che mobili. Gli impianti fissi vengono sviluppati sia per il settore residenziale (2KW) che per applicazioni industriali (15 ÷ 200MW); è possibile prelevare il calore ad alta temperatura ed usarlo in processi industriali che prevedono la cogenerazione o per riscaldamento. Sono in via di sviluppo anche SOFC per grandi centrali in cui il calore viene usato per produrre energia elettrica mediante turbine a gas. Si prevede che queste centrali possano raggiungere un rendimento del 70 %. Le SOFC destinate ad applicazioni mobili non riguardano la costruzione di motori, bensì la sostituzione delle convenzionali batterie di automobili. Il motivo è il crescente numero di apparecchi elettrici nelle automobili, ma anche quello di avere a disposizione, per tempi prolungati, corrente elettrica anche quando il motore è spento. Il carburante è in questo caso la benzina che, però, prima dell'introduzione nella cella a combustibile, deve subire un reforming ed una desolfurazione.

Ciononostante, i materiali ceramici, dei quali queste celle sono fatte, sono difficili da maneggiare e sono costosi. Comunque i problemi principali sono legati al degrado del materiale, la ricerca si sta sviluppando nella direzione di abbassare la temperatura di funzionamento senza ridurre in maniera significativa le prestazioni. Anche il sistema di raffreddamento è più complesso e costoso e questo incide sulla diffusione di questo tipo di celle. Un altro grosso problema è il tempo di "start up", che è significativamente lungo (qualche minuto), per cui le SOFC sono utilizzate soprattutto in applicazioni dove è richiesto un funzionamento di tipo continuo.

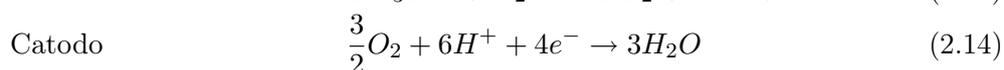
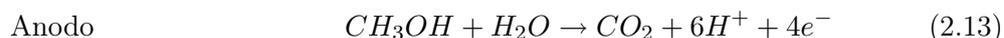
### **Direct Methanol Fuel Cell (DMFC).**

Le celle **DMFC** (Direct Methanol Fuel Cell) sono le uniche che non usano l'idrogeno come combustibile principale, bensì il metanolo. Non hanno bisogno di un reformer perché sono loro

stesse che trasformano il metanolo in protoni di idrogeno, elettroni liberi e  $CO_2$ . Inoltre il combustibile può essere utilizzato come refrigerante dello stack [1].

Queste celle presentano caratteristiche simili alle PEM; entrambe le tecnologie utilizzano membrane polimeriche a scambio protonico come elettrolita ed elettrodi porosi con catalizzatore a base di platino o proprie leghe. Lavorano a temperature comprese tra  $70 \div 100^\circ C$  con un'efficienza elettrica di circa 35%.

Le reazioni elettrodinamiche agli elettrodi sono:



In Figura 2.14 sono illustrate le 2.13 e 2.14 che avvengono all'interno di una singola cella. Il

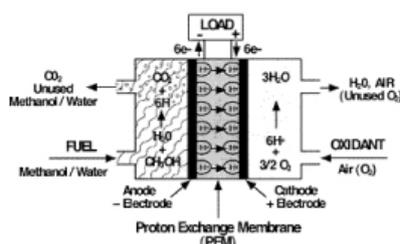


Figura 2.14: **Illustrazione delle reazioni di ossidazione ed ossidoriduzione in una DMFC.**

metanolo ( $CH_3OH$ ) reagisce, nella camera anodica della cella, con l'acqua formando biossido di carbonio e ioni di idrogeno. L'ossidazione del metano sul catalizzatore di platino è più complessa di quella dell'idrogeno e può portare alla formazione di composti intermedi, come ad esempio il monossido di carbonio, che possono determinare l'avvelenamento del catalizzatore. Diversamente dalle altre celle a combustibile, la tecnologia DMFC non produce ossidi d'azoto ( $NOX$ ), ossidi di zolfo ( $SOX$ ) o gas organici reattivi ( $ROG$ ). Complessivamente la quantità di anidride carbonica generata è circa la metà di quella derivante dai motori a combustione che producono la stessa quantità di energia. L'effetto dell'uso di queste celle e del metanolo sul nostro pianeta è notevole. L'assenza di un reformer rende queste celle molto adatte per applicazioni in veicoli anche perché si avvicinano all'obiettivo di avere a disposizione le più semplici sorgenti energetiche. Le celle a combustibile DMFC vengono attualmente sviluppate per l'uso in piccole applicazioni portatili e in veicoli, anche perché il metanolo liquido è più facilmente immagazzinabile rispetto all'idrogeno. Problemi si pongono però a causa della tossicità del metanolo e della sua solubilità in acqua. Se il metanolo dovesse essere usato come carburante nei veicoli, la DMFC semplificherebbe il sistema propulsivo rispetto a un sistema con reformer e cella PEM. Negli ultimi anni le DMFC hanno avuto un grande sviluppo e molti costruttori pensano che il futuro della trazione elettrica dipenda dai risultati che forniranno queste celle. Sono anche ben viste per migliorare i generatori portatili. Si parla, infatti, di "micron fuel cell" che andranno ad alimentare i cellulari nei prossimi anni. La carica avverrà in modo istantaneo, con cartucce contenenti circa 10ml di metanolo.

### 2.1.3 Caratteristiche delle FC.

Le principali caratteristiche comuni a tutti i tipi di celle a combustibile sono:

- **Rendimento elettrico:** per le celle a bassa temperatura si hanno rendimenti variabili tra il 60 ed il 70%. L'alimentazione con reagenti non puri e l'alimentazione delle periferiche (compressori, pompe, controllori, ecc...) riduce il rendimento tra 40 e il 50%. Nel caso di celle ad alta temperatura il rendimento totale dell'impianto si attesta al 60%;

- *Modularità*: è possibile aumentare gradualmente la potenza installata, associando più celle elementari, riducendo così notevolmente i tempi di costruzione;
- *Possibilità di utilizzare tipi diversi di combustibili*: oltre all'idrogeno, possono essere utilizzati combustibili come gas naturale e benzina. Questi però devono essere prima trattati con opportuni processi di reforming che consentono di ricavare idrogeno;
- *Possibilità di cogenerazione*: il calore prodotto dalla cella può essere utilizzato in vari modi. Nelle celle a bassa temperatura il calore può servire per il riscaldamento di acqua sanitaria, nel caso di applicazioni fisse, o per il riscaldamento dell'abitacolo nel caso di installazioni su veicoli.

L'energia massima, ossia il limite teorico corrispondente a quello di Carnot per i cicli termici, di cui dispone un cella a combustibile è data dalla variazione dell'energia libera di Gibbs connessa alla relazione  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ . La corrente della cella a combustibile dipende, oltre che dai reagenti, anche dalla differenza di potenziale ai capi dei catalizzatori. L'andamento della

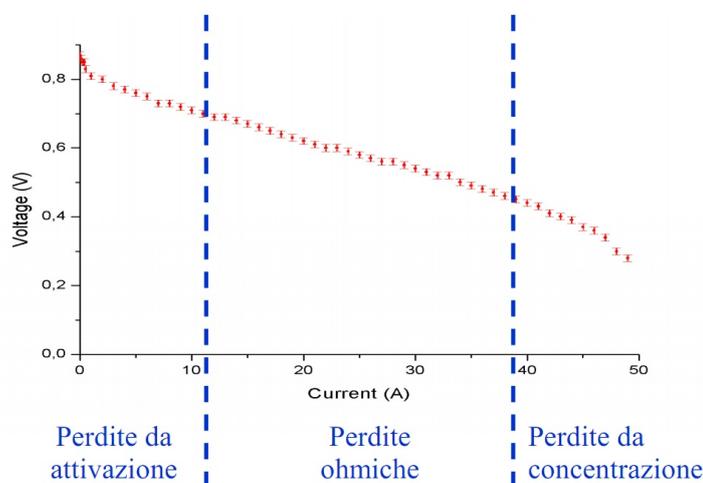


Figura 2.15: Curva caratteristica "tensione-densità di corrente" di una cella.

tensione a vuoto ed a carico di una cella è mostrato in Figura 2.15. Si definisce "Polarizzazione" la differenza di potenziale ai capi della cella tra vuoto e carico, un processo che produce una sorta di caduta di tensione. Si possono distinguere tre zone, in cui sussistono tre diversi tipi di polarizzazione; a seconda della zona prevale un tipo di polarizzazione sugli altri:

- *Polarizzazione di attivazione*: è dovuta all'energia necessaria ad attivare la reazione all'interno della cella. E' legata alla velocità delle reazioni elettrochimiche. Ad essa contribuiscono i processi di adsorbimento dei reagenti, trasferimento di elettroni attraverso il doppio strato, desorbimento di prodotti e la natura della superficie elettronica;
- *Polarizzazione ohmica*: è dovuta alle perdite ohmiche prodotte dalla resistenza al flusso degli ioni nell'elettrolita e al flusso di elettroni attraverso i materiali di elettrodo. Le perdite legate a questa polarizzazione possono essere diminuite riducendo la distanza tra gli elettrodi ed utilizzando elettroliti ad alta conducibilità protonica;
- *Polarizzazione di concentrazione*: è dovuta ai fenomeni di trasporto di massa che si oppongono alle reazioni agli elettrodi. Essi sono per esempio, la diffusione di gas attraverso l'elettrodo, soluzione e dissoluzione dei reagenti e dei prodotti dentro e fuori l'elettrolita. Si manifesta quando la velocità di alimentazione dei reagenti e/o di rimozione dei prodotti di reazione è più bassa di quella corrispondente alla densità di corrente a cui lavora la cella.

Le polarizzazioni agiscono sempre nel senso di aumentare il potenziale dell'elettrodo dove avviene la reazione di ossidazione, e di abbassare il potenziale dell'elettrodo dove avviene la reazione di riduzione. In altre parole, abbiamo un innalzamento del potenziale dell'elettrodo dove avviene

la reazione di ossidazione secondo la:

$$V_a = E_a + \eta_a \quad (2.15)$$

dove  $E_a$  è il potenziale dell'elettrodo in cui avviene la reazione di ossidazione senza reazioni, mentre  $\eta_a$  è l'incremento di potenziale dovuto alla polarizzazione per attivazione.

Un abbassamento del potenziale dell'elettrodo dove avviene la reazione di riduzione secondo la:

$$V_c = E_c - |\eta_c| \quad (2.16)$$

dove  $E_c$  è il potenziale dell'elettrodo dove avviene la reazione di riduzione senza reazioni, mentre  $\eta_c$  è l'incremento di potenziale dovuto alla polarizzazione di concentrazione.

In conclusione il potenziale di cella può essere espresso tramite:

$$V_{cella} = V_c - V_a - iR = E_{rev} - \eta_c - \eta_a - iR \quad (2.17)$$

dove  $E_{rev}$  è il potenziale reversibile della cella.

Il rendimento termodinamico di una cella è dato dalla:

$$\varepsilon_T = \frac{\text{Lavoro utile}}{\text{Energia totale}} \quad (2.18)$$

e dipende dalla temperatura e pressione di lavoro, nonché dal tipo di reazioni che avvengono nella cella. Vengono anche definiti il rendimento elettrico ( $\varepsilon_V$ ) ed il fattore di utilizzo ( $\varepsilon_I$ ):

$$\varepsilon_V = \frac{V_{cella}}{E_{rev}} \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_I = \frac{I}{I_{max}} \quad (2.20)$$

dove si indica rispettivamente con  $V_{cella}$  ed  $I$  la tensione di cella e la corrente prelevata dalla FC ( $V_{cella}$  dipende da  $I$ ). Aspetto molto importante è l'effetto che la temperatura e la pressione hanno sul potenziale reversibile  $E_{rev}$  della cella. Di fatto quest'ultimo diminuisce al crescere della temperatura ed aumenta al crescere della pressione. Un aumento della temperatura porta inoltre a:

- aumento della conducibilità ionica dell'elettrolita e quindi riduzione della polarizzazione ohmica;
- riduzione della polarizzazione di concentrazione e di attivazione;
- maggiore tolleranza alle impurezze presenti nel combustibile di alimentazione.

Per contro una elevata temperatura provoca problemi legati alla corrosione ed alla degradazione dell'elettrolita. Una elevata pressione comporta invece effetti positivi sulle prestazioni elettriche della cella, in quanto produce pressioni più alte dei reagenti nelle prossimità degli elettrodi e migliora i fenomeni di trasporto. Si ha quindi una riduzione della polarizzazione della cella e minori perdite nell'elettrolita. Come controindicazione si creano problemi strutturali sui materiali della cella. Altro effetto negativo è dato dalla presenza di impurezze nei gas di alimentazione. Minori impurezze garantiscono migliori prestazioni della cella, però, dotare le celle di un sistema di purificazione è complicato dal punto di vista tecnologico (quindi costoso).

In Tabella 2.1 vengono riportate le caratteristiche dei principali tipi di celle (le DMFC non vengono riportate in quanto hanno caratteristiche simili alle PEMFC) [1].

Caratteristiche	AFC	PEFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elettrolita	Idrossido di potassio	Membrana polimerica	Acido fosforico	Carbonato di litio e potassio	Ossido di zirconio drogato
Ione	$OH^-$	$H^+$	$H^+$	$CO_2^-$	$O^-$
Catalizzatore	Pt/Pd,N	Platino	Platino	Nichel	Non richiesto
Efficienza %	50÷70	38÷42	37÷42	40÷60	45÷55
Combustibile	Idrogeno puro (99,99%)	Idrogeno Gas riformati ( <i>MeOH</i> ,GN)	Idrogeno Gas riformati (GN, <i>MeOH</i> , idrocarburi leggeri)	Gas riformati	Idrogeno Gas riformati Gas da carbone
Ossidante	$O_2$ puro	$O_2$ aria	$O_2$ aria	$O_2$ aria	$O_2$ aria
Temperatura °C	60÷120	70÷100	180÷220	600÷650	800÷1000
Densità di potenza [ $mW/cm^2$ ]	300÷500	300÷900	150÷300	150	150÷270
Stato della tecnologia	Sistemi 5÷8KW	Sistemi 5÷250KW	Impianti dimostrativi fino a 11MW	Impianti dimostrativi fino a 2MW	Stack 25KW impianto 220KW
Tempo di avviamento	Minuti	Minuti	1÷4 h	5÷10 h	5÷10 h
Applicazioni	Appl. spaziali generatori portatili, trasporto	Piccoli generatori per cogenerazione e usi residenziali, trasporto	Cogenerazione potenza distribuita	Cogenerazione industriale, potenza distribuita	Cogenerazione industriale potenza distribuita

Tabella 2.1: Tabella riassuntiva delle caratteristiche per le principali tipologie di celle.

## 2.1.4 L'Idrogeno.

### Caratteristiche.

L'idrogeno è senza dubbio l'elemento chimico più diffuso dell'universo. Più del 75% della massa della materia visibile nell'universo sotto forma di stelle e galassie è infatti costituita da idrogeno. Nella sua forma atomica più semplice l'idrogeno è costituito da un solo protone, intorno a cui si muove un solo elettrone. Dal punto di vista chimico, costituisce il primo elemento del sistema periodico, il più semplice di tutti. Normalmente però l'idrogeno non esiste in natura (almeno a temperatura ambiente) allo stato atomico, ma si trova legato con un altro atomo di idrogeno, in modo da formare una molecola che nel suo complesso ha, quindi, due protoni e due elettroni. Normalmente, a temperatura ambiente, l'idrogeno si trova in forma gassosa, mentre per ottenerlo in forma liquida occorre raffreddarlo fino ad una temperatura di  $-253^\circ\text{C}$  (20K). Essendo molto leggero tende a dissolversi molto rapidamente in aria. Questo, unitamente al fatto che è privo di colore e di odore, lo rende molto difficile da identificare in caso di dispersione. L'idrogeno molecolare (la sua forma stabile a temperatura ambiente) può essere usato direttamente come combustibile, ma normalmente non si trova direttamente disponibile in natura. Di solito esso è chimicamente legato ad altri atomi, in modo da formare molecole e composti più complessi, come ad es. l'acqua, che è costituita da due atomi di idrogeno e uno di ossigeno. Anche gli altri combustibili che vengono normalmente utilizzati contengono grandi quantità di idrogeno, chimicamente legato ad altri elementi (prevalentemente carbonio), da cui il nome di "idrocarburi" che normalmente si dà a questo tipo di composti. Dal punto di vista energetico, sebbene l'idrogeno abbia il maggior contenuto energetico a parità di peso, rispetto agli altri idrocarburi, la sua bassa densità fa sì che, a parità di concentrazione, abbia un contenuto energetico inferiore. L'idrogeno viene percepito ancora come un gas molto pericoloso, data la sua alta probabilità di incendiarsi. Molto spesso però viene trascurato il fatto che altri gas normalmente utilizzati

a bordo di veicoli, come metano, gpl o anche la stessa benzina (più precisamente i vapori di benzina) hanno caratteristiche analoghe, se non addirittura meno sicure dell'idrogeno. Un esempio è costituito dai limiti di infiammabilità della miscela combustibile-aria. Il limite inferiore di infiammabilità indica la percentuale di gas, rispetto alla miscela gas-aria, al di sotto della quale non c'è abbastanza combustibile per consentire il procedere di una combustione. Viceversa, al di sopra del limite superiore di infiammabilità, non c'è abbastanza aria per consentire il procedere della combustione. All'interno di questo intervallo, è possibile, previo innesco, la combustione del gas. Come mostra la Figura 2.16, l'idrogeno è infiammabile quando è presente nella miscela in

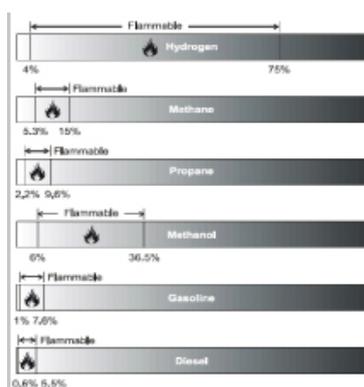


Figura 2.16: Intervallo di infiammabilità di alcuni combustibili.

concentrazioni dal 4% al 75%. Il metano ha un campo inferiore che va dal 5,3% al 15%, mentre la benzina va dall'1% al 7,6% ed il gasolio addirittura dallo 0,6% al 5,5%. Apparentemente, quindi l'idrogeno sembra avere le caratteristiche più sfavorevoli, ma, come si vede, la benzina e il gasolio (o meglio i loro vapori) iniziano a bruciare molto prima, già con concentrazioni inferiori all'1%, risultando quindi molto più pericolosi da questo punto di vista. Inoltre, l'idrogeno ha una densità molto più bassa degli altri combustibili, per cui tende ad essere trasportato verso l'alto molto velocemente, ed è estremamente improbabile che, potendo defluire, raggiunga le percentuali di innesco. Al contrario, i vapori di benzina hanno una densità addirittura maggiore di quella dell'aria, per cui in caso di fuga tendono ad accumularsi verso il basso formando sacche altamente infiammabili, potendo rapidamente raggiungere il limite inferiore di infiammabilità. Altri pericoli derivanti dall'uso dell'idrogeno sono correlati con la sua scarsa conducibilità elettrica, per cui possono accumularsi cariche elettrostatiche al suo interno, che possono dar luogo a scintille in grado di innescare (con la concentrazione richiesta) la combustione. Un altro problema è che l'idrogeno brucia con una fiamma pressoché invisibile in luce diurna, e questo può rendere non immediatamente identificabile un incendio. Inoltre la fiamma tende a dirigersi verso l'alto, data l'estrema leggerezza dell'idrogeno.

## Stoccaggio.

### Idrogeno compresso.

L'idrogeno può essere immagazzinato, come gas compresso, all'aperto, sotto terra ed a bordo di veicoli. E' il modo più economico e semplice per accumulare idrogeno in un veicolo in quanto le uniche attrezzature necessarie sono un compressore ed un contenitore pressurizzato. Il gas all'interno delle bombole è di  $250 \div 200$  bar. Il peso e l'ingombro rappresentano un limite per l'autonomia del veicolo. In Figura 2.17 sono mostrate due tipiche bombole utilizzate nei veicoli per immagazzinare idrogeno. I serbatoi, rinforzati in fibra di carbonio e vetro, possono lavorare a pressioni di bar 350 e quindi, a parità di idrogeno, pesano  $4 \div 3$  volte meno. La maggior parte dei costi è rappresentata dal costo dell'energia impiegata per la compressione e dipendono, quindi,



Figura 2.17: **Bombole per lo stoccaggio di idrogeno compresso.**

dalle quantità trattate. Questa tecnologia di stoccaggio ha una densità d'energia in rapporto al volume, più bassa ( $13MJ/dm^3$ ), se comparata a quella della benzina ( $32MJ/dm^3$ ). I serbatoi sono robusti e vengono usate delle valvole antiscoppio in caso di incendio. Ai fini normativi l'idrogeno è considerato come un gas naturale.

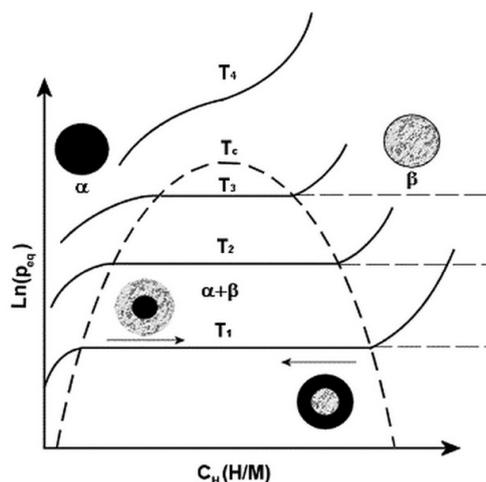
#### **Idrogeno liquido.**

L'idrogeno viene immagazzinato a  $-253^\circ C$ , con serbatoi a doppia parete. Tale procedimento è molto costoso sia a livello di mantenimento di tale temperatura, sia per le tecniche di distribuzione e rifornimento. L'unico inconveniente di questo sistema è l'eventuale fuoriuscita di parte dell'idrogeno liquido ed il notevole dispendio energetico dell'intero processo. Infatti circa il 30% dell'energia dell'idrogeno è necessaria per il suo raffreddamento. Inoltre sono necessarie particolari attrezzature per il mantenimento dello stato liquido. La maggior parte dei contenitori di idrogeno liquido hanno forma sferica perché quest'ultima ha la più bassa superficie per il trasferimento di calore per unità di volume. Inoltre, al crescere del diametro dei contenitori il volume aumenta più velocemente della superficie esterna per cui contenitori più grandi, in proporzione, provocano minori perdite per trasferimento di calore. Riguardo questa tecnologia, il costo operativo maggiore è dovuto all'energia elettrica necessaria per la compressione per cui, attualmente, si stanno analizzando alcuni metodi per la riduzione della quantità di energia richiesta. Per quanto riguarda il rifornimento di veicoli, quello dell'idrogeno liquefatto potrebbe sembrare uno dei metodi più adatti. Sennonché bisogna considerare i notevoli rischi legati, solo per fare un esempio, alle perdite di carburante o ai problemi di sicurezza dovuti allo spazio ristretto a disposizione dei parcheggi. Si stanno progettando serbatoi ad alta pressione leggeri ed impermeabili all'idrogeno. Lo scopo è quello di utilizzare tali serbatoi in spazi ristretti ed in particolare a bordo di veicoli. Basato sul principio fisico che i cilindri siano efficienti nel contenere la pressione interna, questi serbatoi sono costituiti da più cilindri congiunti, con un reticolato rinforzato interno. Il risultato è quindi quello di un contenitore "multi-cella" il cui numero è ottimizzato in base al volume del liquido da immagazzinare. Con questo metodo è possibile immagazzinare il 50% di idrogeno in più rispetto all'uso di serbatoi tradizionali multipli.

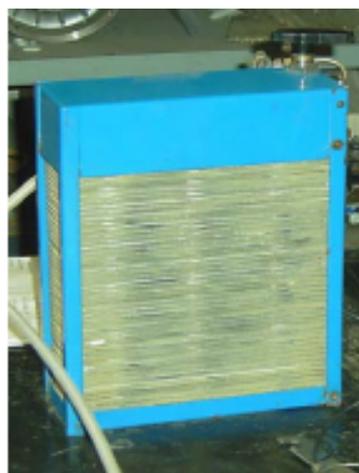
#### **Idruri metallici.**

E' noto che alcuni metalli e leghe sono in grado di assorbire chimicamente idrogeno e poi di rilasciarlo con processo reversibile. Gli aspetti termodinamici della formazione di idruro da idrogeno gassoso sono descritti dalle curve PCI (pressurecomposition isotherms) del tipo di Figura 2.18(a). Ad una data temperatura ed in presenza di idrogeno a bassa pressione il metallo ospite inizialmente dissolve idrogeno in soluzione solida (fase  $\alpha$ ). All'aumentare della pressione la concentrazione di idrogeno nel metallo subisce piccoli incrementi e grazie a questi diventano sempre più importanti le interazioni locali fra gli stessi atomi di idrogeno e gli atomi del reticolo ospite, fino all'inizio di un processo di crescita della fase idruro  $\beta$ . Fino a che la soluzione solida

e l'idruro coesistono, le isoterme (pressione di idrogeno ad una data temperatura in funzione della concentrazione di idrogeno nel materiale) presentano una zona piatta (detta plateau), la cui lunghezza indica la quantità di idrogeno che può essere immagazzinata reversibilmente a quella temperatura con piccole variazioni di pressione. Quando la transizione  $\alpha \rightarrow \beta$  è giunta a completamento, la pressione di idrogeno ritorna a salire bruscamente con la concentrazione. La regione con due fasi termina per l'isoterma alla temperatura critica  $T_c$ , al di sopra della quale la transizione fra fase  $\alpha$  e  $\beta$  è continua. Allo scopo di rendere tecnologicamente interessanti gli



(a) Andamento della pressione in funzione della concentrazione per un idruro.



(b) Serbatoio a idruri metallici  $AB_5$ .

Figura 2.18: **Caratteristiche degli idruri metallici.**

idruri metallici per l'impiego in serbatoi di idrogeno sono necessari i seguenti requisiti. Il metallo o la lega base devono essere facilmente "caricabili", cioè deve essere richiesta una pressione di idrogeno di pochi bar e, poiché l'assorbimento è un processo isotermico, la temperatura di innesco deve essere relativamente bassa e il calore da asportare durante la carica non elevato. Per il rilascio dell'idrogeno accumulato, poiché il desorbimento è un processo endotermico, dovrebbe poi essere necessario fornire una quantità di calore nullo o relativamente basso affinché si produca una pressione di idrogeno di qualche bar. Sostanzialmente quindi pressione e temperatura di lavoro dovrebbero cadere rispettivamente negli intervalli  $1 \div 10$  bar e  $20 \div 100^\circ\text{C}$ . Un ulteriore problema, cui si è già accennato, consiste nel peso del mezzo assorbitore, per cui sono preferibili idruri di metalli leggeri con elevato contenuto di idrogeno. Sono di primaria importanza per le applicazioni pratiche anche le cinetiche dei processi di assorbimento e desorbimento dell'idrogeno, cioè le velocità con cui questi processi avvengono. Tuttavia, nessuno degli idruri oggi noti presenta congiuntamente tutte le caratteristiche richieste per la funzionalità pratica di un serbatoio a idruri. In tempi recenti si sono resi disponibili commercialmente idruri di leghe tipo  $AB_5$  ( $LaNi_5$ ),  $AB$  ( $FeTi$ ), ed  $A_2B$  ( $Mg_2Ni$ ) forniti in recipienti ad hoc. Le leghe come  $LaNi_5$  assorbono idrogeno velocemente e reversibilmente alla pressione di pochi bar ed a temperatura ambiente o vicina ad essa. Esse inoltre sopportano ripetuti cicli di assorbimento/desorbimento senza degradare. Il loro punto debole sta nella bassa massa percentuale di idrogeno contenuta nell'idruro rispetto al metallo ospite. La Figura 2.18(b) mostra un serbatoio ad idruri metallici del tipo  $AB_5$  avente un peso pari a 5Kg e in grado di immagazzinare circa  $0,7m_3$ . All'interno la pressione dell'idrogeno è circa quella ambiente. Solo nella parte superiore l'idrogeno è in forma gassosa. Questo permette all'idrogeno di uscire all'esterno aprendo semplicemente la valvola. Facendo un confronto con le bombole a pressione possiamo dire che, a parità di peso, quelli ad

idruri riescono ad immagazzinare più idrogeno. In percentuali si parla di un valore di peso di idrogeno immagazzinato tra l'1 ed il 3% del peso della bombola per gli idruri, mentre minore dell'1% per le bombole a pressione. Un'elevata quantità di idrogeno immagazzinato si può ottenere utilizzando elementi leggeri come il magnesio, che forma l'idruro  $MgH_2$  con una massa percentuale di idrogeno pari a 7,6%. Gli ostacoli principali all'uso del magnesio sono innanzitutto, la pressione di plateau del sistema risulta eccessivamente bassa nell'intervallo di temperature di interesse applicativo (a 100°C, risulta pari solo a 0,36mbar). Per avere pressioni di esercizio vicino a quella atmosferica occorre portarsi a circa 300°C. Anche a 300°C, tuttavia, le reazioni di idrogenazione e di de-idrogenazione sono estremamente lente.

### **Nano strutture di carbonio.**

Le nano strutture al carbonio possono rappresentare la risposta tecnologica alla richiesta di un sistema che renda realizzabile il progetto di veicoli alimentati ad idrogeno. Le due nano strutture al carbonio che rivestono maggiore interesse sono nano tubi isolati singolarmente e nano fibre di grafite. I nano tubi al carbonio, con pori allungati con diametri di dimensioni molecolari, assorbono idrogeno, con un'azione capillare a temperature non criogene. Sono stati prodotti e testati dei nano tubi isolati, con tecniche di produzione ad alti rendimenti, che hanno dimostrato di poter trattenere il 5 ÷ 10% del peso dell'idrogeno, a temperatura normale. Le nano fibre alla grafite sono composte da materiali generati dalla decomposizione di miscele contenenti idrocarburi. La parte solida è formata da un insieme di nano cristalli distanziati uniformemente a 0,34 ÷ 0,37nm, curvati insieme dalle forze di Van der Waals per formare una struttura di nano pori a parete flessibile. I sistemi con nano strutture al carbonio potrebbero essere realizzati con costi particolarmente bassi, ma la ricerca è ancora ai primi passi e non è possibile dare indicazioni precise sulla loro efficacia. Attualmente, infatti, nessuno di questi sistemi è sfruttato commercialmente.

## **2.2 Accumulatori elettrici.**

### **Introduzione.**

Pile ed accumulatori sono prodotti di uso comune che servono per l'alimentazione di tutti gli apparecchi portatili (radio, telefoni cellulari, videocamere, telecomandi, ecc.) e di dispositivi speciali come le protesi auricolari ed i pace-maker. Gli accumulatori fanno inoltre parte integrante di tutte le autovetture dove rappresentano da tempo componenti essenziali per alcune funzioni fondamentali (avviamento del motore, accensione del carburante, illuminazione, ecc.) ed oggi provvedono anche ad alimentare un numero crescente di funzioni per il comfort delle persone a bordo (ventilazione e condizionamento dell'aria, alza cristalli elettrico, dispositivi elettronici, ecc.). Inoltre essi sono da tempo utilizzati in applicazioni stazionarie per l'alimentazione di emergenza. Altri tipi di accumulatori sono stati studiati per applicazioni di trazione elettrica, cioè per la propulsione di veicoli a motore elettrico (dai carrelli elevatori alle autovetture elettriche o ibride, tuttora in fase di sviluppo, alla propulsione di natanti). In particolare gli accumulatori rappresentano il cuore del problema nello sviluppo delle vetture elettriche. Infine, nelle applicazioni spaziali, le prestazioni degli accumulatori condizionano la portata stessa delle missioni [11]. Gli accumulatori sono dispositivi in grado di trasformare l'energia chimica contenuta nei reagenti al loro interno, in energia elettrica. Il loro funzionamento si basa su reazioni di ossido riduzione spontanee (in scarica) che avvengono in modo da costringere gli elettroni a fluire all'esterno attraverso il carico collegato. Le principali tecnologie attualmente impiegate si basano principalmente sulle batterie al piombo, nelle versioni piombo-acido (a basso costo ma onerose quanto a manutenzione), piombo-gel (con elettrodi piani o a spirale) e con elettrolita adsorbito (che promettono una maggiore potenza specifica). Sul mercato sono presenti (ma se ne sottolinea l'ancora basso impiego per la trazione) le batterie nichel-cadmio, le quali, a causa della tossicità propria del Cadmio, potrebbero essere prossimamente bandite nell'Unione Europea. Sono infine

in fase di sperimentazione le tecnologie basate su ioni di litio ( $Li+$ ) o polimeri. Attualmente sembrano fornire buoni risultati le tecnologie nichel-metallo-idruro ( $NiMH$ ), le quali oltre ad una potenza specifica pressochè doppia, presenterebbero minori problemi di smaltimento e riciclaggio. Ancora più elevata potenza specifica e minor impatto ambientale promettono le ZEBRA (Zero Emission Battery Research Activity) basate su tecnologie nichel-cloruro di sodio ( $Na/NiCl_2$ ). Tra le proposte conseguenti alle attività di ricerca in corso appare interessante anche la tecnologia sodio-zolfo, con cui può essere raggiunta una densità di energia anche di 100 Wh/kg con ingombri più ridotti. Va sottolineato che alcune batterie quali quelle al sodio e cloruro di nichel necessitano di temperature di lavoro comprese tra i 270 °C e i 350 °C. Le batterie costituiscono uno dei più importanti sottosistemi di un veicolo elettrico e la loro scelta rappresenta uno dei pilastri per un loro buon funzionamento. Tale scelta dipende molto dall'integrazione delle batterie con il veicolo, in particolare l'azionamento di propulsione [12].

Un accumulatore è un elemento voltaico di struttura analoga a quella di una batteria e, come tutti gli altri generatori elettrochimici, è in grado di erogare parte dell'energia chimica della sua materia attiva sotto forma di una corrente elettrica continua che circola nel circuito utilizzatore. Ma, a differenza delle pile ordinarie, che non sono ricaricabili, l'accumulatore, una volta che si è scaricato più o meno completamente, è in grado di immagazzinare di nuovo, per la sua particolare struttura e per la composizione degli elettrodi e dell'elettrolito, l'energia chimica necessaria per una nuova scarica. La ricarica dell'accumulatore si ottiene mediante il suo collegamento ad un adeguato generatore di corrente continua [11], [13] e [14].

Ogni generatore elettrochimico è formato essenzialmente da uno o più elementi voltaici (o celle), collegati in serie e composti ciascuno da un catodo (elettrodo positivo), da un anodo (elettrodo negativo) e da un elettrolito che separa i due. La composizione e la struttura dell'elemento voltaico conferisce la caratteristica di ricarica (generatore secondario o accumulatore) o meno (generatore primario o pila) [11]. L'elettrodo negativo è solitamente un metallo: piombo, stagno, nichel, ferro, cromo, alluminio, magnesio. Quello positivo è invece costituito da ferriti, ossidi, idrossidi o perossidi di vario genere. L'elettrolita è una soluzione che contiene elementi chimici e mediante esso gli ioni possono migrare da un elettrodo all'altro a seconda del verso della reazione. L'elettrolita deve avere una bassa conducibilità elettrica per evitare l'auto scarica (infatti, come è già stato detto, si vuole che gli elettroni fluiscano attraverso il circuito elettrico esterno).

Definizioni di anodo e catodo:

**Anodo:** è l'elettrodo che si ossida (l'ossidazione è la reazione chimica con perdita di elettroni da parte di una specie chimica). Quindi esso emette elettroni, e convenzionalmente in esso entra la corrente [15].

**Catodo:** è l'elettrodo che si riduce (la riduzione è la reazione chimica con acquisto di elettroni da parte di una specie chimica). Dualmente rispetta all'anodo, nel catodo la corrente è uscente [15].

Per quanto detto in 2.1.1, le definizioni di anodo e catodo nel caso degli accumulatori è un po' più articolata. Si deve distinguere tra i due funzionamenti da generatore o da immagazzinatore (utilizzatore) di energia. Nel funzionamento da generatore la configurazione resta la stessa della pila, l'anodo coincide con l'elettrodo negativo, mentre il catodo con l'elettrodo positivo. Nella fase di carica l'accumulatore funziona come un utilizzatore, l'elettrodo negativo coincide con il catodo e quello positivo con l'anodo [15].

### 2.2.1 Caratteristiche elettriche degli accumulatori.

Gli accumulatori sono sostanzialmente celle elettrolitiche polarizzabili nelle quali il passaggio della corrente di carica, ottenuta da un adatto generatore, provoca la polarizzazione degli elettrodi. La f.e.m. di polarizzazione si presenta sotto forma di f.c.e.m. durante la carica, e dà origine alla trasformazione di energia elettrica in energia chimica. La stessa f.e.m. viene utilizzata nella

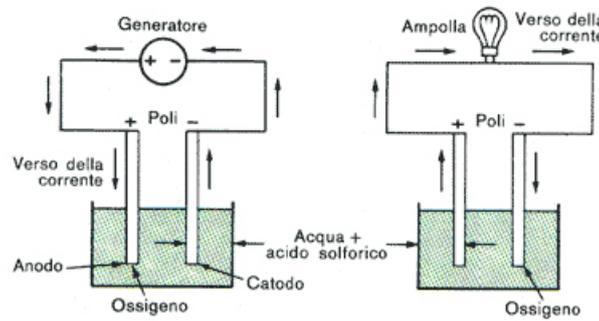


Figura 2.19: Anodo e catodo in un accumulatore nei due funzionamenti.

scarica, durante la quale l'apparecchio cede al circuito esterno energia con una reazione inversa a quella di carica.

Nella sua forma più semplice un accumulatore (o pila) comprende essenzialmente due elettrodi, uno positivo e l'altro negativo, ciascuno formato da una o più "piastre" connesse in parallelo, ed un elettrolito [11], [13] e [14].

Oltre ai due elettrodi che contengono la materia attiva, in un accumulatore sono presenti altri componenti: i "collettori di corrente", che convogliano corrente elettrica da e verso gli elettrodi ed i separatori, che evitano che i due elettrodi, positivo e negativo, entrino in contatto fra loro all'interno dell'elemento voltaico, provocando un cortocircuito [11], [13] e [14].

Un accumulatore può consistere in un solo elemento, ma, di solito, è formato da più elementi collegati fra loro in serie, e in questo secondo caso si parla di "batteria di accumulatori". La tensione fra i morsetti di una batteria è quindi determinata, oltre che dal sistema elettrochimico utilizzato, dal numero degli elementi collegati in serie. Ad esempio, una comune batteria al piombo per autovettura da 12V è formata da 6 elementi, in serie fra loro, ciascuno dei quali fornisce 2V. Più in generale, dato che gli apparecchi da alimentare funzionano a diverse tensioni e richiedono differenti livelli di potenza, il dimensionamento di un accumulatore, in tensione e potenza erogata, viene determinato scegliendo sia il sistema elettrochimico da adottare, sia il numero di elementi [11], [13] e [14].

La quantità di energia che può essere ricavata da una batteria completamente carica dipende dalla temperatura, dal tipo di cella e dalla sua vita (ad ogni ciclo di carica e scarica si verificano cambiamenti nella struttura e nel volume degli elettrodi). Sarà difficile quindi specificare la capacità di una batteria con un unico numero, in quanto nei progetti bisogna tener conto di questi effetti e compensarli per quanto possibile [11], [13] e [14]. I principali indici che caratterizzano una batteria sono:

- **Capacità:** espressa in Ah, rappresenta la carica elettrica totale che la batteria è in grado di erogare, ad un determinato regime, fino a che la tensione della cella non scende sotto un determinato valore chiamato tensione di fine scarica  $V_{FS}$ . La capacità non è una costante ma dipende dal modo in cui la batteria viene utilizzata. Ad esempio se una batteria ha una capacità di 50Ah quando viene scaricata in 30h, non si può dire che la stessa batteria ha una capacità di 50Ah se scaricata in 15h. Si evince che la batteria è un componente non-lineare. Tale concetto di fondamentale importanza può essere chiarito analizzando l'andamento della capacità in funzione del tempo di scarica. La figura 2.20 mostra la capacità, che una batteria riesce ad erogare in un certo tempo di scarica. Le curve si riferiscono ad una batteria al Ni-Cd ed una al piombo acido. Quest'ultima scaricata in 10h riesce a fornire il 100% della sua capacità, mentre se scaricata in 5h riesce a fornire circa l'80% della carica complessiva. La capacità dipende dalla massa delle materie prime [11] e [13];

- **Capacità nominale in Ah:** indica gli Ah che la batteria riesce a fornire se scaricata in un

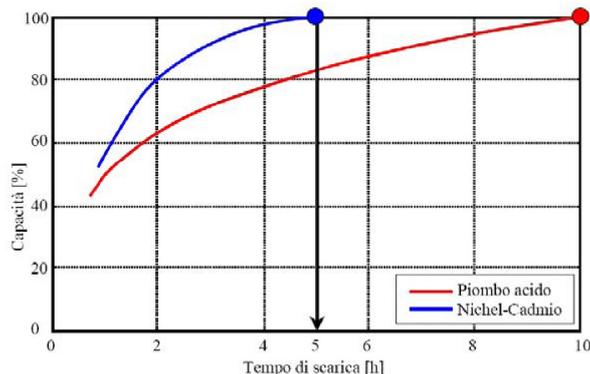


Figura 2.20: Andamento della capacità di una batteria, espressa in %, in funzione del tempo di carica.

determinato periodo di tempo. Nelle batterie utilizzate per la trazione, con riferimento alle Litio-ione, ci si riferisce ad un periodo standard di 2h. Tale valore viene indicato con la nomenclatura  $C/2$ , ossia l'energia complessiva della batteria che viene ceduta in un tempo di 2h. Quindi una batteria da 60Ah con  $C/2$  fornisce una corrente di 30A per 2h, scaricandosi completamente. Mentre per le batterie al piombo acido ed al Ni-Cd il tempo a cui si fa riferimento è rispettivamente 10h e 5h [11], [12] e [13]. La capacità specifica indica la capacità dell'accumulatore per unità di massa ( $Ah/Kg$ ) o per unità di volume ( $Ah/m^3$ ) [13];

- **Capacità di riserva:** indica il valore di corrente che la batteria riesce ancora, dopo scarica, ad erogare per un determinato intervallo di tempo, espresso in minuti. Un valore di capacità di riserva di 40min per 30A vuol dire che la batteria riesce a fornire ancora 30A per un tempo di 40min;

- **Capacità in Wh:** (o l'energia che l'accumulatore può erogare): indica l'energia richiesta per caricare interamente una batteria scarica<sup>4</sup>. E' data dalla capacità moltiplicata per la tensione media di scarica ed è espressa generalmente in Wattora (Wh). L'energia specifica indica l'energia che può essere erogata dall'accumulatore per unità di massa ( $Wh/kg$ ) o per unità di volume ( $Wh/dm^3$ ) [11] e [13];

- **Tensione nominale:** può essere riferita a ciascun elemento dell'accumulatore o all'intera batteria, se questa è composta da più elementi collegati in serie. Esso è riferito alla batteria carica, infatti, durante la scarica la tensione segue l'andamento riportato in figura 2.21. Sotto un determinato livello la batteria non è più in grado di fornire una tensione sufficiente per garantire il funzionamento [12].

- **Tensione media di scarica ( $V_{MS}$ ):** è il valore di tensione che si ha ai capi della cella quando si sta scaricando. Si assume un valore costante anche se si ha una leggera diminuzione durante il processo di scarica. Ogni singola cella ha una sua determinata tensione media di scarica che dipende dagli elementi chimici utilizzati. La Tabella 2.2 fornisce la tensione media di scarica per vari tipi di cella. Si nota subito che le celle a litio lavorano con tensioni medie di scarica

Tipo	Piombo-acido	Ni - Cd	Ni - H <sub>2</sub>	Ni - MH	Litio-ione
$V_{MS}$	2V	1,2V	1,25V	1,2V	3,6V

Tabella 2.2: Tensione media di scarica per vari tipi di cella.

<sup>4</sup>Una batteria si dice scarica non quando la tensione ai suoi capi è nulla, bensì quando scende sotto il valore  $V_{FS}$ . Ad esempio la classica batteria a piombo acido da 12V usata nelle auto tradizionali è scarica quando la sua tensione scende al di sotto di 10,5V.

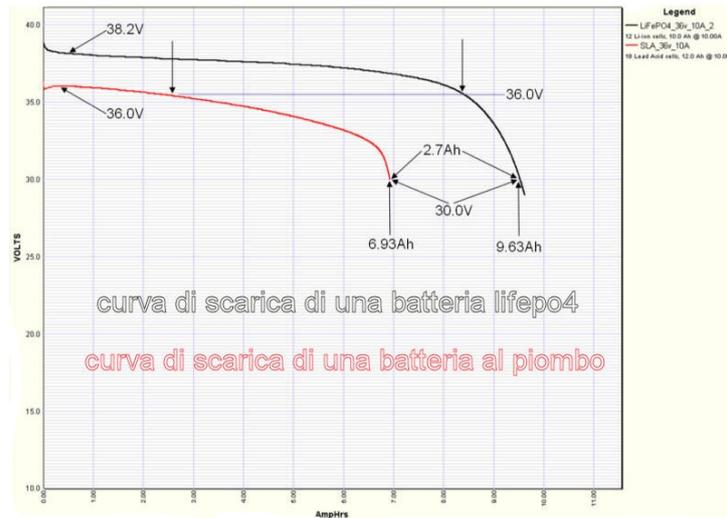


Figura 2.21: Andamento tensione di una batteria, al variare del tempo durante una scarica.

superiori alle altre. Questo permette di ridurre, rispetto agli altri tipi, il numero di celle di un fattore 2 o 3 a parità di densità di energia richiesta. Ciò è più chiaro guardando la Figura 2.22.

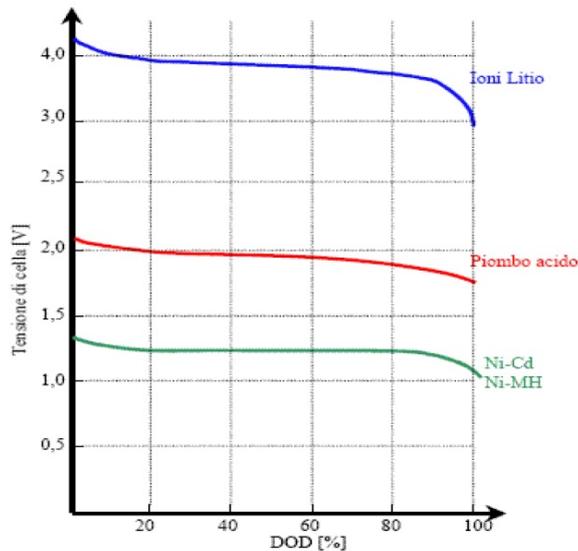


Figura 2.22: Andamento della tensione media di scarica al variare del DOP.

E' evidente come l'andamento non è costante e quindi tale tensione media di scarica è solo un valore convenzionale, un altro parametro che influenza la tensione di scarica è il DOD definito qui sotto;

- **Profondità di scarica (DOD, Date of discharge):** indica il rapporto tra gli Ah forniti dalla batteria nella fase di scarica e la capacità nominale. E' un indice che viene riferito al singolo ciclo di scarica o a più cicli, quasi mai fa riferimento ad un determinato istante di funzionamento. Generalmente una completa scarica della batteria (DOD del 100%) distrugge la batteria stessa, o quanto meno ne abbrevia drasticamente la vita. E' possibile però scaricare la batteria fino ad un certo livello (indicato dal DOD), ma lo si può fare per un numero limitato di volte. Ad esempio indicare DOD = 80% ad una corrente di scarica pari a C/5 (la capacità nominale fornita

in 5h), significa riferirsi alla condizione nella quale la batteria, inizialmente carica, è scaricata alla corrente costante pari a  $C/5$ , fino a che non sia stato estratto l'80% della carica  $C$  [12]. La

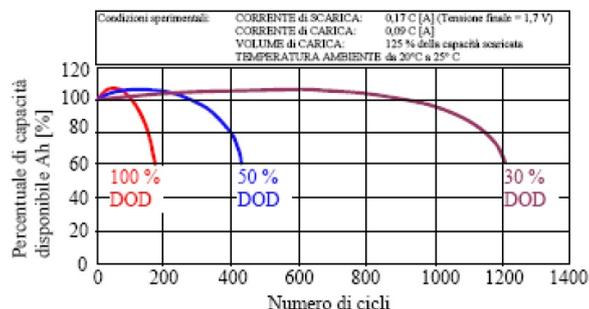


Figura 2.23: Numero di cicli al variare della DOD.

Figura 2.23 mostra quanto detto, il grafico fa riferimento ad una cella al piombo acido, anche se un analogo comportamento (diminuzione della vita all'aumentare della DOD) è riscontrabile in tutti i tipi di cella. Inoltre a parità di DOD, la vita degli accumulatori diminuisce all'aumentare della temperatura.

La DOD ha anche una influenza importante sulla capacità della cella. Infatti, all'aumentare del numero di cicli di carica e scarica effettuati, la capacità diminuisce più rapidamente tanto più elevata è la DOD raggiunta dalla scarica della cella.

Le Figura 2.23 mostra l'andamento della capacità di una cella al piombo acido al crescere del numero dei cicli di vita per differenti valori di DOD. E' evidente che se la batteria viene scaricata completamente durante il suo funzionamento durerà meno. Con DOD del 100% la capacità della cella, dopo circa 200 cicli, si è ridotta del 40%, mentre con DOD del 50% abbiamo una riduzione del 40% dopo più di 400 cicli. Questi valori di DOD non sono tanto usati visto che con un valore pari al 100% le batterie durano poco, mentre con DOD del 30% non si riesce a sfruttare tutta la potenzialità della cella, un valore comunemente usato è l'80%;

- **Tensione di inizio scarica:** è la tensione che si ha ai capi della batteria una volta collegato il carico e il più delle volte non corrisponde alla tensione massima della cella. In alcuni tipi di cella, come quelli al piombo, appena essa viene collegata, si verificano delle brusche diminuzioni di tensione come mostrato in Figura 2.24; essi vengono comunemente chiamati colpi di frusta. Solitamente viene definita tensione di inizio scarica la tensione che si ha dopo che la capacità è diminuita del 10% rispetto al suo valore massimo;

- **Tensione di lavoro:** è la tensione media presente fra i due terminali positivo e negativo

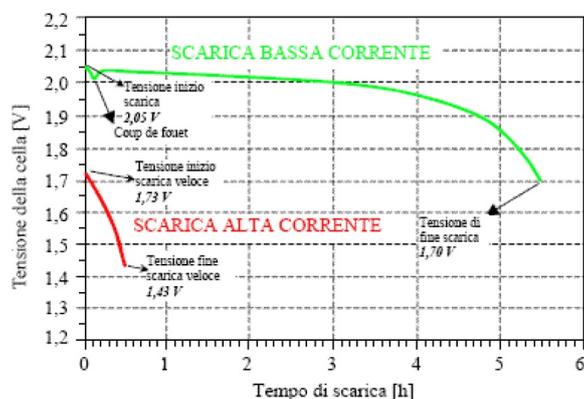


Figura 2.24: Curva di scarica di una batteria al piombo acido.

quando l'accumulatore eroga corrente [11] e [13];

- **Tensione di fine scarica:** è la tensione che determina la fine della scarica. Se definita dal costruttore è la tensione che si ha ai capi della cella dopo una scarica con DOD pari al 100%. Se definita dall'utente, indica la minima tensione che la cella può raggiungere per motivi progettuali [11] e [13]. In Figura 2.24 si vede che la tensione di inizio scarica non è univocamente determinata, ma dipende dalla corrente di scarica e dalla temperatura. All'aumentare della corrente erogata, diminuisce sensibilmente il tempo di scarica, la tensione di inizio scarica e quella finale. Ad esempio, con riferimento alla curva di scarica con bassa corrente della Figura 2.24, la tensione di inizio scarica è circa 2,05V mentre quella di fine scarica è di 1,7V. La stessa cella se scaricata con corrente elevata presenta un valore di inizio scarica di 1,73V ed uno di fine scarica di 1,43V. Tali valori sono definiti dal costruttore. L'utente può decidere di scaricare la cella fino ad una tensione di 1,9V. Sicuramente saranno scelte legate alla progettazione, dove la sicurezza di non scendere al di sotto di una determinata soglia di tensione ha maggior rilievo rispetto ad un sovradimensionamento e quindi ad un costo maggiore.

La Figura 2.25 mostra la tensione ai capi di una cella al litio al variare della corrente di scarica;

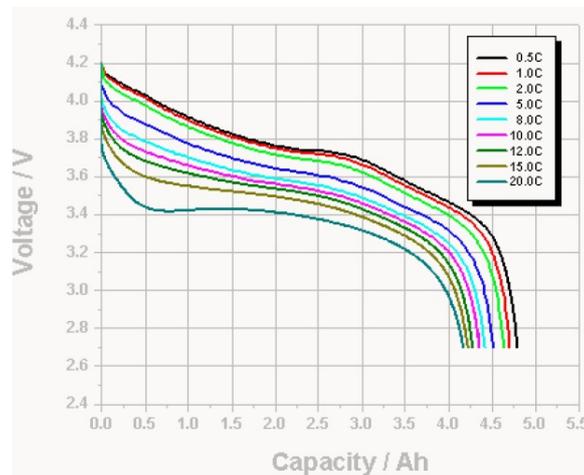


Figura 2.25: Tensione di una cella al litio al variare della corrente di scarica.

- **Stato di carica (SOC):** indica la carica immagazzinata dalla cella in un preciso momento. E' definito come il rapporto tra gli Ah rimanenti e quelli nominali. Una carica completa significa che la batteria ha un SOC del 100%. Questo indice si riferisce ad un determinato istante di funzionamento e non a un singolo ciclo. Ricordando la definizione di DOD possiamo scrivere che:

$$SOC = [1 - DOD] \quad (2.21)$$

Bassi valori di questo indice fanno sì che si creino cristalli che possono resistere alla ricarica e quindi impedire la completa carica della batteria. A seconda delle applicazioni si preferisce raggiungere SOC del 100% o un po' meno [12];

- **Peso e volume:** sono parametri molto importanti soprattutto per i progettisti del settore veicolistico. Un parametro può avere maggiore interesse rispetto ad un altro in relazione all'applicazione. Ad esempio, per la trazione stradale si preferisce avere un maggior peso ma minore ingombro, mentre per le applicazioni spaziali si preferisce avere il minor peso possibile. Si cerca sempre di trovare un buon compromesso e di ottenere la massima energia e potenza;

- **Potenza:** è data dalla tensione media di scarica moltiplicata per la corrente di scarica ed è espressa in Watt (W) [11] e [13];

- **Energia specifica:** è una misura dell'energia che può essere ricavata da una batteria per unità di peso o volume ( $W/Kg$  e  $W/dm^3$  rispettivamente) [11] e [13]. In funzione del tipo di batteria,

esiste uno stretto legame tra peso o volume, energia specifica e densità di energia. L'energia specifica dà una misura di quanta energia può essere estratta da una batteria per unità di volume. La densità di energia, invece, è l'energia per unità di peso della batteria [12].

La Tabella 2.3 fornisce alcuni valori indicativi di energia specifica e densità di energia per diversi tipi di batterie.

- **Potenza specifica:** è la misura della potenza che può fornire la batteria per unità di peso

		Piombo	Ni-Cd	Ni-MH	Litio
Densità di energia	$Wh/Kg$	30÷50	48÷80	60÷120	110÷160
Energia specifica	$Wh/dm^3$	70÷120	97÷146	209÷240	274÷290

Tabella 2.3: **Energia specifica e densità di energia per alcuni tipi di batterie.**

o volume, valori indicativi sono commercialmente poco diffusi vista l'impossibilità di fare un confronto diretto senza specificare il tempo di scarica. Alle volte può succedere che pur essendo presente nella batteria ancora una sufficiente quantità di energia, essa non possa essere erogata con sufficiente rapidità non garantendo al veicolo le prestazioni minime richieste per un utilizzo sicuro e confortevole, in questo caso la potenza specifica diventa un parametro fondamentale per un corretto dimensionamento del veicolo e dello stato di carica della batteria [12].

La Figura 2.26 mostra l'andamento della densità di energia in funzione della potenza specifica

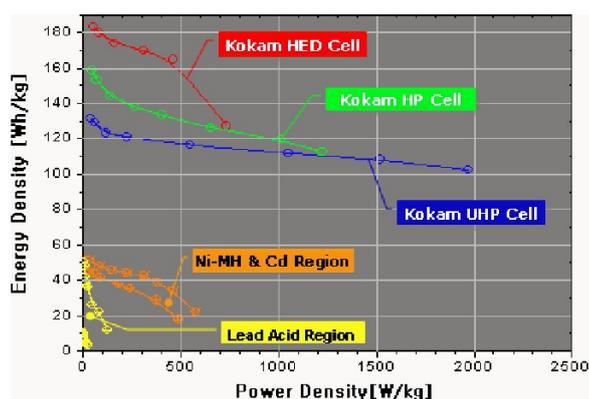


Figura 2.26: **Andamento della densità di energia in funzione della potenza specifica.**

delle batteria attualmente in commercio. I dati sono forniti dalla Kokam CO, Ltd che è un'azienda leader nel settore. Si nota subito la differenza che c'è tra una cella al Piombo e quella Ni-Cd e Ni-MH, ancor più abissale è la differenza tra quest'ultime e le celle al litio. Gli acronimi HED, HP e UHP significano rispettivamente alta densità di energia, alta potenza ed altissima potenza.

Un'analisi sulle curve relative alle celle al litio mostra che un'elevata densità di energia, comporta ridotta potenza specifica. Viceversa le celle con potenza elevata potranno essere utilizzate per un tempo minore per evitare surriscaldamenti che ne diminuiscono la vita;

- **Temperatura di lavoro:** le batterie lavorano in modo ottimale in un determinato intervallo di temperatura funzione del tipo di batteria stessa. Al di fuori di tali limiti le prestazioni delle batterie diventano scadenti o addirittura si possono verificare guasti per il congelamento o l'evaporazione di alcuni componenti chimici presenti all'interno [12]. Normalmente la temperatura di lavoro è compresa tra i  $-10^{\circ}C$  e  $+50^{\circ}C$ . All'interno di questo intervallo le prestazioni variano molto, infatti una temperatura bassa sarebbe l'ideale per la conservazione (aumenta la resistenza interna dell'elettrolita e quindi riduce l'effetto memoria), mentre le temperature più alte sono

favorevoli al funzionamento (aumenta la conducibilità protonica dell'elettrolita);

- **Rendimento:** per qualificare il funzionamento di un accumulatore si considerano due rapporti caratteristici, che definiscono rispettivamente il rendimento in carica elettrica (o amperometrico)  $\eta_e$ , ed il rendimento energetico,  $\eta$ . Il primo è espresso come il rapporto tra gli amperora erogati dall'accumulatore durante la scarica e quelli assorbiti durante la precedente carica ed è espresso da:

$$\eta_e = \frac{\int_0^{t_s} i_s dt}{\int_0^{t_c} i_c dt} = \frac{q_s}{q_c} \quad (2.22)$$

dove con  $q_s$  e  $q_c$  si indicano rispettivamente la carica elettrica erogata nella scarica e quella assorbita nella carica. Generalmente tale rendimento è dell'ordine di  $0,9\% \div 0,95\%$  e diminuisce quando la scarica viene fatta rapidamente [11] e [13].

Il rendimento energetico è il rapporto tra l'energia resa nella scarica e quella impiegata per la precedente carica ed è dato da:

$$\eta = \frac{\int_0^{t_s} v_s i_s dt}{\int_0^{t_c} v_c i_c dt} = \frac{W_s}{W_c} \quad (2.23)$$

Tale rendimento è molto più basso del precedente per la presenza della resistenza interna che dissipa energia sia in fase di carica che in fase di scarica: esso può raggiungere  $0,75\% \div 0,8\%$ ;

- **Durata di vita:** dipende sostanzialmente dalle condizioni di funzionamento dell'accumulatore e quindi può essere assegnata solo per prefissati regimi di carica e scarica. In particolare, quando l'accumulatore è soggetto a successivi cicli di carica e scarica, si considera la durata di vita ai cicli che indica l'attitudine di un accumulatore a resistere a successivi cicli di carica e scarica. In questo caso la durata di vita è indicata generalmente con il numero di cicli di carica e scarica che danno luogo ad una prefissata diminuzione percentuale della capacità di un accumulatore (generalmente l'80% del valore originario) [11] e [13].

I due principali difetti che affliggono le batterie sono l'auto scarica e l'effetto memoria.

- **L'auto scarica:** consiste nella perdita graduale di carica anche quando ai morsetti non è collegato alcun carico. Tale fenomeno può essere spiegato considerando le reazioni negli elettrodi della cella. L'elettrolita si riduce all'anodo, mentre quest'ultimo si ossida. L'elettrodo perde cariche positive e si carica negativamente. Tale reazione spontanea continua fino a che non si raggiunge un equilibrio chimico. Gli elettroni cercano di raggiungere l'altro elettrodo utilizzando il percorso che presenta minore resistenza elettrica. Nel caso in cui il carico non sia collegato, la resistenza elettrica minore rispetto all'aria è data dall'elettrolita. Il fenomeno di autoscarica può quindi essere ridotto a valori bassissimi ma non eliminato. Valori di auto scarica delle batterie presenti in commercio sono mostrati in Tabella 2.4, è evidente come nelle celle al litio il fenomeno

Auto-scarica	Piombo	Ni-Cd	Ni-MH	Litio
%/mese	20 ÷ 30	20 ÷ 30	20 ÷ 30	1 ÷ 3

Tabella 2.4: **Valori di auto scarica delle celle in commercio.**

è stato sensibilmente ridotto, rendendo queste batterie idonee alle applicazioni non stazionarie. Per ridurre l'auto scarica ci sono due metodi, il primo chiamato carica di mantenimento consiste nell'iniettare in una batteria completamente carica, una piccola corrente atta a compensare le perdite di scarica dovuta alla resistenza interna. Tipicamente il valore di queste correnti varia da  $C/40$  a  $C/100$ . Se tale corrente è superiore a quella richiesta per la compensazione allora avremo la formazione di gas (molto pericolosi nelle batterie al litio) se invece è inferiore la batteria si scaricherà anche se meno velocemente. L'altro metodo consiste nell'applicare una tensione leggermente superiore a quella massima, in modo che la batteria, vista come un carico, assorba la corrente necessaria per la compensazione;

- **L'effetto memoria:** è legato alla formazione di cristalli. La batteria si ricorda della più frequente profondità di scarica e quando questa viene superata si ha una forte riduzione della tensione e della carica disponibile. La Figura 2.27 mostra un classico effetto memoria di una

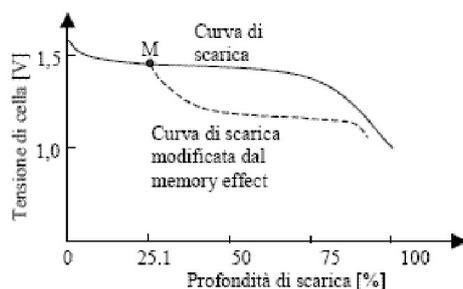


Figura 2.27: **Effetto memoria per una cella Ni-Cd.**

cella al Ni-Cd. La curva a tratto continuo rappresenta la tensione di scarica della cella. Nel funzionamento normale la cella viene scaricata fino al punto M a cui corrisponde una DOD del 25%. Nel momento in cui si ha una scarica al di sotto del punto M, la cella segue la curva tratteggiata che provoca una notevole caduta di tensione. Un modo per eliminare tale effetto è effettuare il reconditioning che consiste nella scarica totale della batterie tramite resistori particolari e nella carica fino ad una tensione leggermente superiore a quella massima. Tale procedura non è dannosa per la cella visto che questa dissipa la sopraccarica con la formazione di gas che tramite un foro esce dalla cella.

Per effettuare la ricarica delle batterie si cerca di avere la maggior efficienza elettrica e mantenere le temperature entro i limiti di funzionamento delle batterie stesse. In Figura 2.28 è rappresen-

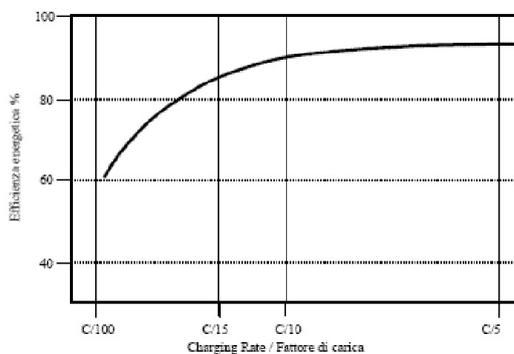


Figura 2.28: **Curva dell'efficienza di carica, in funzione del fattore di carica, per una cella Ni-Cd.**

tata, per una cella al Ni-Cd, la curva dell'efficienza di carica in funzione della corrente. Correnti di carica basse come le C/100 sono raramente usate per la ricarica visto che presentano basse efficienze, mentre alte correnti come le C/5, pur avendo elevate efficienze, innalzano troppo la temperatura della cella. Le correnti di carica sono generalmente C/10 e C/15 e presentano efficienze dell'ordine dell'85%. Correnti di questo ordine vengono iniettate in cella fino a che la carica non raggiunge circa l'80%. Successivamente la corrente viene diminuita gradualmente. A carica ultimata, verrà inviata la corrente di mantenimento per evitare l'auto scarica.

La Figura 2.29 mostra la carica di una batteria al litio. In tale tipologie di celle le correnti di carica sono superiori rispetto alle altre. Generalmente sono dell'ordine di C/2. Anche se non consigliate, possono essere fatte delle cariche (cariche veloci) con correnti che raggiungono anche C3/2, con corrente superiore al valore nominale.

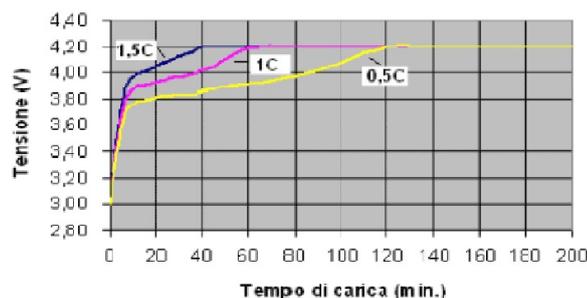


Figura 2.29: Andamento delle tensioni di carica in funzione del tempo, per tre valori di corrente di una cella (batteria) al litio.

Un confronto tra le celle più utilizzate può essere fatto mediante la Figura "a ragnatela" 2.30

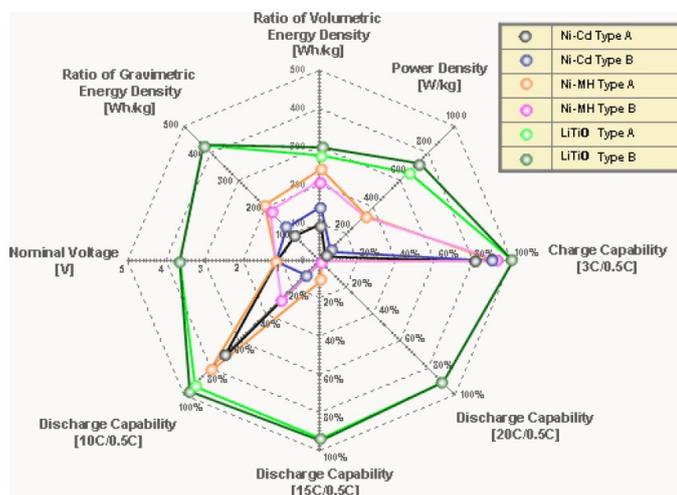


Figura 2.30: Confronto grafico delle varie tipologie di celle.

dove vengono messi a confronto due modelli A e B per tre tipologie diverse di cella (A e B indicano valori diversi di capacità nominale). Ai vertici della ragnatela sono riportati i principali parametri di interesse. Il colore di ogni spezzata si riferisce ad una tipologia di cella. Dall'analisi del grafico si vede, che le celle a litio hanno tensioni, densità di energia e potenza specifica superiori alle altre.

Un altro parametro di confronto importante è la capacità di scarica delle celle a varie correnti. Per esempio con  $C/5$  potrebbe essere indicata la corrente con cui la cella è in grado di fornire il 100% della sua capacità. Sia le Ni-Cd che le Ni-MH, per correnti di scarica di 10C, presentano una riduzione della capacità che varia dal 25% al 15%, per i tipi A, mentre varia addirittura dal 70% al 90% per i tipi B. Per correnti di 15C e 20C, tali celle non sono più in grado di fornire energia. Invece, entrambe le tipologie di celle al litio riescono a fornire il 90% della capacità con correnti di 20C. Un comportamento analogo si ha anche in carica, dove soltanto le celle al litio riescono a ricaricarsi completamente con una corrente di 3C (carica veloce). Nella Tabella 2.5 sono riportati i valori dei principali parametri delle celle in commercio, per varie correnti di carica e scarica.

Le batterie al piombo sono sicuramente le più diffuse in campo automobilistico, visto il basso costo, hanno però una bassa energia specifica ed una vita breve ai cicli di carica/scarica. Le nuove batterie garantiscono una vita più lunga e quindi permettono il loro utilizzo sugli HEV.

ITEMS	Unit	Ni-Cd		Ni-MH		Litio	
		A	B	A	B	A	B
Capacità	mAh	640	2200	760	3150	740	3200
Tensione	V	1,2	1,2	1,2	1,2	3,7	3,7
Densità di energia	Wh/Kg	33	44	70	63	144	143
Densità di energia	Ratio	100	130	210	190	430	430
Densità di energia	Wh/l	97	146	240	209	274	290
Scarica	10C/0,5C	76%	11%	84%	34%	92%	95%
Scarica	15C/0,5C	Guasto	Guasto	13%	Guasto	92%	93%
Scarica	20C/0,5C	Guasto	Guasto	Guasto	Guasto	90%	90%
Ricarica	3C/0,5C	81%	88%	90%	94%	100%	100%

Tabella 2.5: **Valori a confronto delle celle in commercio.**

Le Ni-Metal hydride hanno elevata potenza ed energia specifica ed una vita lunga a cicli di carica/scarica; il loro costo elevato, e l'elevata produzione di calore ne limitano l'uso sugli HEV. Le batterie a ioni di litio sembrano essere le batterie ideali per un HEV: alta potenza ed energia specifica, buon comportamento alle alte temperature, bassa autoscarica, una vita abbastanza lunga e la quasi completa riciclabilità dei suoi componenti sono tra i vantaggi che le contraddistinguono. Purtroppo alti costi e una tecnologia produttiva non ancora matura, ne limitano l'utilizzo ad applicazioni sperimentali [12].

In Tabella 2.6 sono riportati i valori caratteristici di alcuni parametri per diverse tipologie di accumulatori di uso commerciale (i costi si riferiscono all'anno 2009).

	Energia specifica [Wh/Kg]	Potenza specifica [W/Kg]	Rendimento energetico [%]	Numero di cicli di carica/scarica	Costo di produzione [\$/kWh]
Piombo-acido	30÷40	90÷130	75	600÷1000	170
Nichel-Cadmio	50÷60	140÷190	75	2000	450÷700
Nichel-Idruri	55÷60	175	65	300÷400	-
Litio	90÷180	100	75	300÷500	100÷150

Tabella 2.6: **Confronto tra diverse tipologie di accumulatori [11].**

### 2.2.2 Tecnologia degli accumulatori.

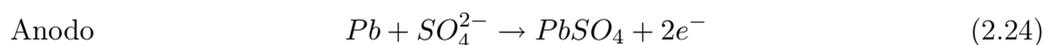
Gli accumulatori possono essere classificati in base alla tecnologia del sistema elettrochimico utilizzato o in base al tipo di applicazione. In tal senso gli accumulatori comunemente usati sono: gli accumulatori al piombo acido, gli accumulatori alcalini e gli accumulatori al litio.

#### Accumulatori al piombo acido.

E' la tecnologia più consolidata, utilizzata da molti anni per svariate applicazioni. In queste celle l'anodo è di piombo mentre il catodo è di perossido o ossido di piombo. Entrambi gli elettrodi sono supportati da griglie di una lega di piombo contenente piccole quantità di arsenico, stagno e antimonio. L'elettrolita, è una soluzione acquosa di acido solforico purissimo alla concentrazione di massima conducibilità ionica. I recipienti sono generalmente fatti di ebanite o miscele di asfalti o bitumi con carica inerte e fibre. Si va sempre più estendendo l'uso di contenitori in

materie plastiche che permettono una notevole riduzione del peso globale. In particolare un accumulatore al piombo-acido per applicazione automobilistica è costituito da piastre positive a loro volta formate da un telaio di lega di piombo (griglie) che comprendono un gran numero di maglie in cui si individuano dei compartimenti (alveoli) riempiti di biossido di piombo ( $PbO_2$ ) da piastre negative con la stessa struttura delle precedenti, ma di cui gli alveoli sono riempiti con piombo attivo (Pb) e da separatori in plastica che evitano i cortocircuiti fra le piastre consentendo la libera circolazione dell'acido (elettrolito) [11].

Le reazioni chimiche che si hanno in questo tipo di celle durante la scarica sono:



Durante il processo di scarica (quando la batteria eroga corrente elettrica) l'acido solforico ( $H_2SO_4$ ) di cui è composto l'elettrolito si scinde, l'idrogeno ( $H$ ) si unisce all'ossigeno liberato dalla piastra positiva formando acqua ( $H_2O$ ) mentre lo ione  $SO_4$  va ad unirsi con il piombo della piastra negativa formando il solfato di piombo ( $PbSO_4$ ). A batteria completamente scarica l'elettrolito è composto solo da acqua (densità dell'elettrolita bassa), mentre la piastra negativa è ricoperta da solfato di piombo. Durante il processo di carica il processo chimico si inverte, il solfato di piombo si scioglie, l'acqua si scinde (elettrolisi) e si riforma l'acido solforico nell'elettrolito (densità dell'elettrolita maggiore) [11].

Durante il processo di carica si possono verificare processi di elettrolisi dell'acqua con conseguente formazione di gas idrogeno, molto pericoloso, e diminuzione del livello dell'elettrolita. Pertanto queste batterie vengono dotate di valvole che permettono lo sfogo gassoso e il rabbocco dell'elettrolita tramite aggiunta di acqua distillata. Esse vengono chiamate batterie a valvole di regolazione. La tensione media di scarica in queste celle è di 2V.

Il solfato di piombo depositato sulla piastra negativa a batteria scarica, può nel caso di prolungata permanenza in questo stato cristallizzare per poi non riuscire a sciogliersi più durante il processo di carica, rovinando definitivamente la batteria. Questo processo è noto come solfatazione. L'avvertenza è quella di conservare la batteria sempre carica [11].

In Figura 2.31 è mostrata una comune batteria al piombo utilizzata per le automobili. Quando

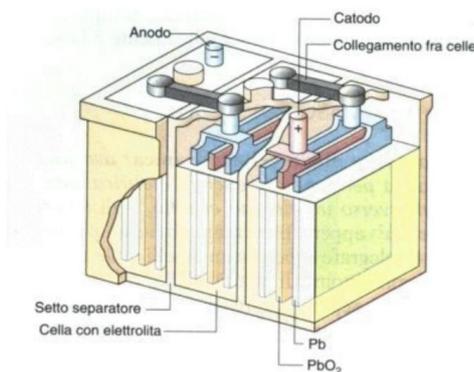


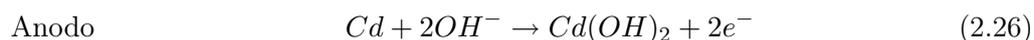
Figura 2.31: **Batteria al piombo acido.**

la batteria funziona da generatore, ossia si scarica, la corrente entra nell'elettrodo di piombo che in questo caso è l'anodo e coincide con il polo negativo. Nel processo di carica si ha la configurazione inversa, cioè l'anodo coincide con l'elettrodo positivo formato da perossido di piombo in quanto da questo entra la corrente. Questa tipologia di batteria è stata la prima ad essere utilizzata su larga scala, ma se confrontata con le batterie sviluppate negli ultimi anni presenta una serie di svantaggi:

- \* il piombo è uno degli elementi a densità più elevata utilizzati per produrre accumulatori e quindi le batterie di questa tipologia sono molto pesanti;
- \* sono sensibili alle alte e basse temperature;
- \* contengono acido solforico che è corrosivo e pericoloso;
- \* richiedono parecchie ore per la ricarica;
- \* sono molto sensibili alla scarica profonda;
- \* hanno una durata limitata;
- \* il fenomeno dell'auto scarica è rilevante, esso è dovuto alla decomposizione indesiderata del piombo durante i periodi di stoccaggio. Il fenomeno è così grave che provoca una scarica profonda se non viene ripristinato lo stato di carica periodicamente. In caso contrario i cristalli di piombo diventano troppo grandi e la batteria non può più essere ricaricata.

### Accumulatori alcalini nichel-cadmio (Ni-Cd).

I principali accumulatori alcalini sono quelli con tecnologia al nichel-cadmio, l'elettrodo positivo è costituito essenzialmente da idrossido superiore di nichel ( $NiOOH$ ) con piccole quantità di ossido di nichel ( $NiO_2$ ) e cobalto. L'elettrodo negativo è invece in cadmio ( $Cd$ ). L'elettrolita è l'idrossido di potassio ( $KOH$ ). In queste celle l'elettrolita non partecipa alla reazione ma garantisce solo la conducibilità ionica. Le reazioni chimiche che avvengono agli elettrodi durante la scarica sono date dalle 2.26 e 2.27



Le celle Ni-Cd sono in grado di fornire una f.e.m. di circa 1,2V con una densità di circa 40Wh/Kg. Uno degli inconvenienti di questo tipo di reazione chimica è il fenomeno della carbonazione dell'elettrolita per effetto dell'anidride carbonica presente nell'aria. Durante la scarica, al catodo abbiamo la formazione di idrossido di nichel, mentre nell'anodo si crea idrossido di cadmio che è una sostanza tossica. Questi accumulatori si caricano rapidamente ed hanno una durata di vita che può essere di 800÷1000 cicli (30000 con DOD 20÷30%).

In Figura 2.32 è mostrata una batteria al Ni-Cd. Queste batterie presentano due problemi.

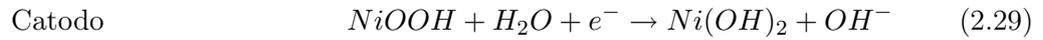
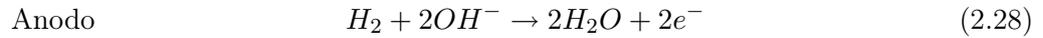


Figura 2.32: Accumulatore al Nichel-cadmio.

Il primo è che il cadmio è tossico, mentre il secondo è l'effetto memoria. Sono disponibili per l'alimentazione degli apparecchi elettronici e delle lampade portatili, con capacità inferiori a 5Ah; elementi al Ni-Cd di varia forma (rettangolari, cilindrici, a bottone) sono largamente impiegati per utensili e macchine fotografiche e predominano nelle applicazioni combinate spina-batteria (rasoi elettrici, registratori, radioricevitori, ecc.). Per l'uso di questi accumulatori è necessario seguire rigorosamente le indicazioni fornite dai produttori e, a causa della tossicità del cadmio, vanno osservate tutte le norme previste per il loro smaltimento [11].

### Accumulatori alcalini Nichel-idrogeno ( $Ni - H_2$ ).

Elettrolita e catodo sono uguali alle batterie Ni-Cd. L'anodo è costituito da idrogeno contenuto in un contenitore in pressione. Le reazioni che si hanno agli elettrodi sono riportate nelle 2.28 e 2.29.



In Figura 2.33 è mostrata una batteria Ni-H, l'idrogeno durante la scarica si ossida e produce

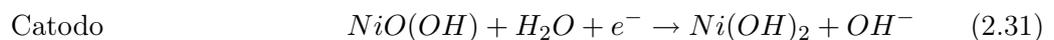
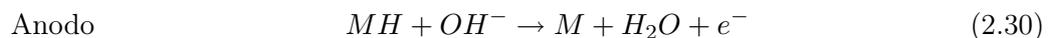


Figura 2.33: **Batteria Nichel-idrogeno.**

elettroni e ioni positivi  $H^+$ , mentre si riduce durante la carica. La pressione nel contenitore è proporzionale alla carica e quindi può fornire un ottimo rivelatore del livello di carica. Naturalmente la presenza del recipiente (50bar) causa un aumento di peso ed una riduzione dell'energia specifica. Attualmente sono utilizzate solo per applicazioni spaziali. Sono realizzabili tre tipologie di celle rispettivamente da 3,5 pollici, 4,5 pollici e 5,5 pollici. Il corpo esterno è realizzato in Inconel 718, con terminali in ceramica o teflon. La capacità di ogni cella può variare, a seconda del modello, da 40 a 400Ah, la densità di energia varia tra 50 e 62  $Wh/kg$ , con una tensione nominale di 1,25V. Notevole la durata, 15 anni all'80% DOD per applicazioni GEO, 8 anni al 40% DOD per applicazioni LEO.

### Accumulatori alcalini Nichel-idruri metallici (Ni-MH).

Sono celle molto simili a quelle Ni-Cd. Sono state introdotte per ovviare la tossicità del cadmio. L'elettrodo positivo è costituito da idrossido superiore di nichel ( $NiOOH$ ). In luogo del cadmio sono utilizzate per l'anodo delle leghe metalliche, generalmente leghe di lantanio e terre rare, che fissano idrogeno nel reticolo cristallino sotto forma di idruri. L'elettrolita è composto da una soluzione diluita di idrossido di potassio ( $KOH$ ). Le reazioni chimiche durante la scarica sono mostrate nelle 2.30 e 2.31.



dove M indica il metallo dove è contenuto l'idrogeno mentre MH indica l'idruro. La f.e.m. che si riesce ad avere è circa 1,2V. Dal punto di vista elettrochimico sono simili alle  $Ni - H_2$  dove l'idrogeno è stoccato in forma di idruro invece che di gas. In Figura 2.34 è mostrata una batteria

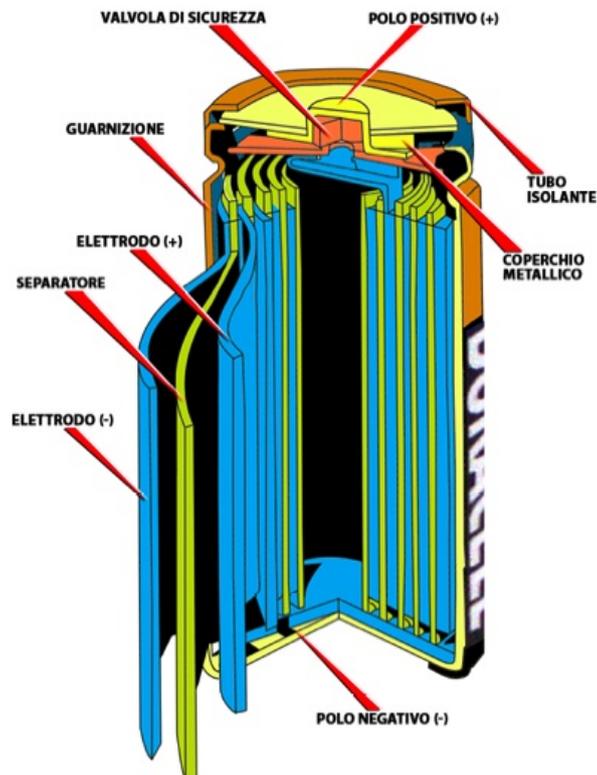


Figura 2.34: **Batteria Nichel-idruri metallici.**

al Ni-idruri metallici, la capacità è più elevata di quella degli accumulatori al cadmio: dopo 600 cicli di carica/scarica, gli accumulatori Ni-MH dovrebbero presentare una capacità residua pari all'80% di quella originaria. Gli svantaggi rispetto agli accumulatori al cadmio sono rappresentati da una minore potenza specifica e da un più marcato processo di auto scarica [11]. Presentano un effetto memoria non significativo. Tali batterie soffrono la sovraccarica che provoca la creazione di gas all'interno dell'elettrolita durante la carica. Nelle batterie moderne vengono usati dei catalizzatori che hanno il compito di smaltire rapidamente i gas creati in modo da non causare pericolo, inoltre la presenza delle terre rare rende la cella molto costosa. Tali batterie vengono utilizzate nei veicoli ibridi, come la Toyota Prius e Honda Insight/Civic e nelle apparecchiature elettroniche. Le Ni-MH verranno utilizzate anche per elettrificare il nuovo tram della città di Nizza.

### **Accumulatori al litio.**

La ricerca per la realizzazione della prima cella utilizzante litio partì nel 1912 grazie a G. N. Lewis ma si dovette aspettare gli anni '70 per la comparsa sul mercato della prima batteria primaria a litio. Essa era caratterizzata da elevatissime prestazioni in confronto con le celle chimiche esistenti al tempo, grazie alla leggerezza del materiale utilizzato e al suo alto potenziale elettrochimico [11]. Poiché il litio si ossida più facilmente degli altri metalli utilizzabili nelle pile, esso rappresenta il materiale anodico per eccellenza. Il suo basso peso specifico e la spiccata tendenza a cedere elettroni lo rendono interessante per la costruzione di pile di elevata capacità specifica.

Il litio può essere usato anche con un catodo solido o liquido. Nel primo caso si ottengono elementi di elevata stabilità, nel secondo tensioni più elevate, ma con riduzione della stabilità. La ricerca per ottenere una cella ricaricabile fu iniziata negli anni '80, ma fu sempre ostacolata

da problemi legati alla sicurezza. Il litio è un metallo instabile e durante la scarica può causare esplosioni della cella se supera una determinata temperatura. Molti problemi sono dovuti anche all'alta reattività del litio, sono usati elettroliti solidi organici o liquidi non acquosi e le pile devono essere prodotte, con tecnologie complesse e costose, in "camere secche".

Sempre a causa della sua alta reattività, il litio non può essere lavorato sotto forma di polvere come avviene per lo zinco nelle pile alcaline. Per aumentare la superficie dell'elettrodo negativo (anodo) il litio viene lavorato in fogli sottili con i quali vengono formati cilindri concentrici. Analogamente si procede con il biossido di manganese ( $MnO_2$ ) con cui si formano fogli impregnati con l'elettrolito (una soluzione di sali disciolti in un solvente organico). La struttura complessiva consiste in una successione di elettrodi cilindrici alternativamente positivi ( $MnO_2$ ) e negativi ( $Li$ ). La struttura di questo tipo di celle è in continua evoluzione ed è cambiata negli anni alla ricerca di prestazioni sempre più alte. La batteria al litio possono essere costruite in una vasta gamma di forme. In Figura 2.35 è mostrata una tipica pila al litio, in cui il terminale positivo

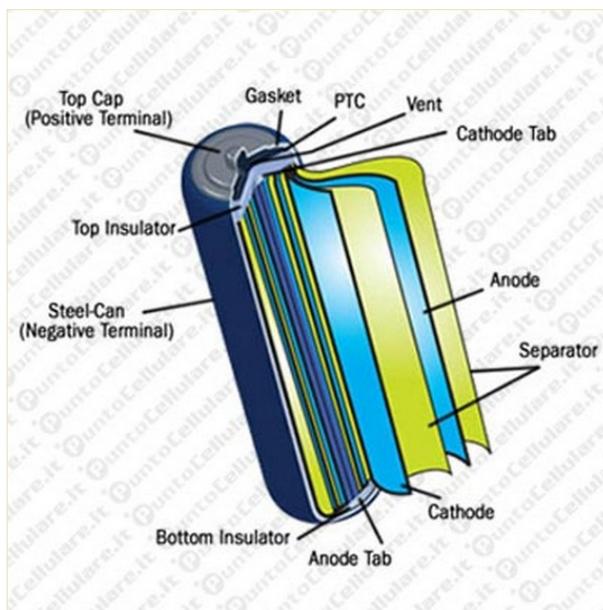


Figura 2.35: Pila al litio.

è formato da un cappuccio in acciaio, sotto di esso un sigillo in plastica serve sia a contenere il materiale attivo all'interno dell'elemento che a fornire uno sfiatatoio di sicurezza per prevenire eventuali esplosioni.

### Accumulatori al litio ricaricabili.

Inizialmente la tecnologia di queste batterie era di tipo non ricaricabile. Ossia, anodo costituito da un metallo, elettrolita da un polimero drogato con sali non acquosi di litio e catodo da ossido di litio in grado di sottoporsi alla reazione reversibile degli ioni. In questi accumulatori, le difficoltà dovute all'elevata reattività del litio metallico sono state aggirate utilizzando in luogo del litio metallico, un suo composto in grado di assorbire o rilasciare ioni litio [11]. Le piastre di questi accumulatori sono realizzate in modo che gli ioni di litio, migranti all'interno di masse di grafite con struttura reticolare a traliccio (materiali a intercalazione), possono essere inseriti o asportati dalla struttura ospitante senza produrre alterazioni significative. La Figura 2.36 mostra il processo elettrochimico che avviene nella cella. Durante la scarica avviene la dissoluzione degli ioni di litio ( $Li^+$ ) all'anodo, questi migrano attraverso l'elettrolita e si inseriscono all'interno della struttura cristallina dell'ospite. Tale processo viene chiamato "intercalation". Durante la

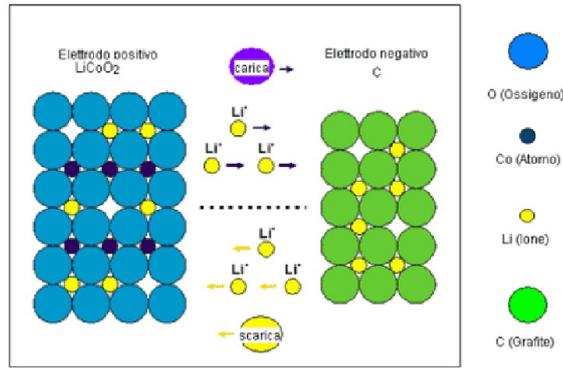
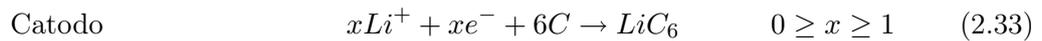
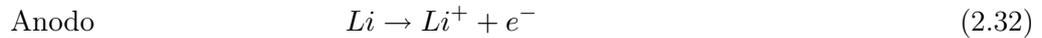


Figura 2.36: **Processi chimici all'interno di una cella al litio.**

carica avviene il processo inverso e gli ioni si spostano dall'elettrodo positivo a quello negativo. Il processo prende il nome di "de intercalation". Le reazioni chimiche che avvengono agli elettrodi durante la scarica sono riportata nelle 2.32 e 2.33.



Il parametro  $x$  rappresenta la concentrazione del litio.

L'elettrodo deve avere la capacità di accettare ed espellere gli elettroni dalla propria banda elettronica. Tali materiali vengono chiamati "intercalation hosts". La tensione presente ai morsetti di questi accumulatori è di oltre 3V, è cioè più che doppia di quella delle pile alcaline [11]. Il

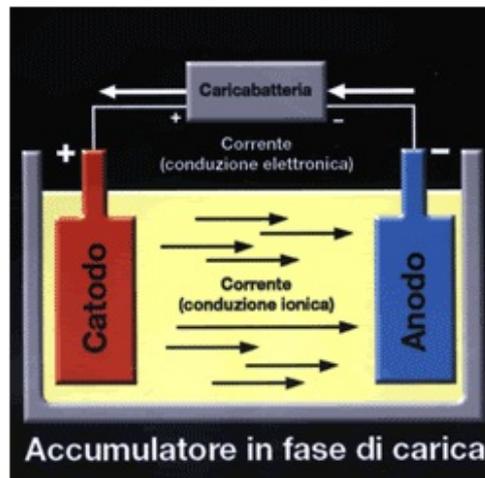


Figura 2.37: **Illustrazione schematica di un accumulatore agli ioni di litio.**

comportamento esterno è invece mostrato in Figura 2.37. Gli elettroni escono dall'anodo, percorrono il circuito esterno ed entrano nel catodo. Il tipo più comune è detto "litio-ione".

Un modello più recente è la batteria al "litio-polimero", la quale usa polimeri solidi come elettrolita, fornendo il grosso vantaggio di essere completamente solida e quindi più robusta. Esiste anche un terzo tipo chiamato "litio-metallo" che è potenzialmente superiore alle altre due, ma presenta lo svantaggio di essere costruita con litio metallico, il quale può reagire violentemente con l'aria e incendiarsi. Tale situazione pericolosa può verificarsi anche nelle "litio-ione".

Le "litio-ione" e le "litio-polimero" sono le batterie esistenti che presentano la più alta densità di energia, una lunga durata in cicli e si ricaricano molto rapidamente [11]. Non devono essere mai

scaricate sotto una determinata tensione. Questo è anche uno dei motivi per cui le batterie al litio non vengono vendute direttamente al consumatore così come sono, ma solo come batterie finite, progettate per adattarsi ad un sistema particolare. Le celle agli ioni di litio sono in grado di fornire una f.e.m. che va da 1,5V a 4,2V. Principale differenza tra le "litio-ioni" e le "litio-polimero" è che l'elettrolita in sale di litio non è contenuto in un solvente organico, ma si trova in un composto di polimero solido, come ad esempio il poliacrilonitrile. Le attuali celle polimeriche hanno una struttura a fogli flessibili, spesso pieghevoli, e contengono ancora un solvente organico. Un'altra differenza è che nelle litio ioni, il contenitore rigido pressa reciprocamente gli elettrodi ed il separatore, mentre in quelle a polimero questa pressione esterna non è richiesta perché i fogli dell'elettrodo ed i fogli del separatore sono laminati l'uno sull'altro. Le litio polimero sono più leggere e possono essere sagomate ulteriormente per occupare lo spazio che gli è riservato nell'apparecchio da alimentare. La loro densità di energia è superiore di circa il 20% rispetto alle "litio-ione". Anche la tensione è superiore, si va dai 2,7V (scarica) ai 4,3V (carica). Durante la scarica dovuta ad un carico di lavoro, questo dovrà essere rimosso rapidamente quando la tensione scende al di sotto dei 3V per cella. Nelle batterie a litio polimero tutti gli strati sono solidi e l'elemento chiave è proprio il polimero che presenta:

- \* Elevata conducibilità ionica;
- \* Trascurabile conducibilità elettronica;
- \* Alta stabilità elettrica e chimica;
- \* Ottima stabilità meccanica;
- \* Bassi costi.

L'assemblaggio delle celle "ioni-litio" può essere fatto tramite tre distinti metodi. A seconda dell'assemblaggio che viene utilizzato, si possono ottenere tre differenti tipi di cella:

- *Button o coin*: sono costituiti da strati singoli di anodo, separatore e catodo, posizionati all'interno di un contenitore sigillato di metallo;
- *Spirale avvolta*: sono formate da elettrodi di materiale attivo, rivestiti con pellicole o sottili griglie conduttive dal punto di vista elettrico. Questi elementi sono poi avvolti assieme ad un separatore intorno ad un'anima metallica. Gli elettrodi avvolti, detti "jelly roll", sono inseriti in un contenitore metallico che tiene unito tutto il sistema appena descritto. Il contenitore spesso contiene dispositivi di sicurezza come valvole di assistenza per la pressione o limitatori termici;
- *Plastic "Litio-ioni"*: sono composte da elettrodi e separatori simili a quelli del tipo a spirale avvolta, eccetto che il materiale legante addizionale è usato nella pellicola dell'elettrodo in modo da facilitare la laminazione termica degli strati. Tramite questo processo, i materiali attivi vengono a trovarsi compattati l'uno accanto all'altro. In questo modo l'involucro esterno della cella ha solo una funzione protettiva e non ha, come nelle celle a spirale avvolta, il compito di tenere compressi i vari strati dei materiale attivi.

Il solvente dell'elettrolita delle batterie a "litio-ione" è infiammabile e soggetto alla decomposizione elettrochimica. Esso è instabile quando è soggetto ai tipici potenziali di cella. La prima carica della cella fa sì che il solvente si riduce sulle particelle dell'anodo e forma uno strato di sali organici di litio insolubili e carbonato di litio chiamato interfaccia solida dell'elettrolita (Solid Electrolyte Interface, SEI). Lo strato SEI protegge l'anodo da ulteriori riduzioni del solvente, mentre permetterà agli ioni di litio di passare attraverso esso.

La Figura 2.38 mostra i vari processi di formazione, rottura e riformazione dello strato SEI. La rottura dello strato è causata dai cambiamenti volumetrici delle particelle del materiale dell'anodo sottostante, dovuti ad intercalazione e deintercalazione di ioni di litio. Durante la rottura e la ricostruzione dello strato SEI, l'elettrolita riesce ad infiltrarsi nelle intercapedini formate e va a ridursi all'anodo. La continua crescita dello strato SEI, dovuta alla rottura ed alla ricostruzione, diminuisce l'utilizzo del materiale dell'anodo e riduce le prestazioni e la vita della cella.

L'instabilità del solvente verso l'ossidazione diventa notevole a potenziali bassi come 4,2V. Mag-

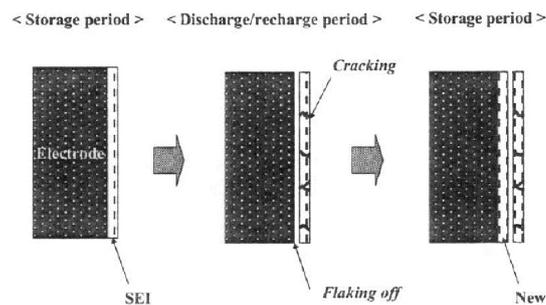


Figura 2.38: **Processi di formazione e rotture del SEI (interfaccia solida dell'elettrolita).**

giore è la tensione a cui è sottoposto il solvente, maggiore è la formazione di  $CO$  e  $CO_2$ . Inoltre la decomposizione dell'elettrolita genera sottoprodotti polimerici che si depositano sul materiale del catodo, riducendo prestazioni e vita della cella. Una riduzione di prestazioni e vita viene causata anche da correnti elevate in quando consentono al litio di diffondersi in modo non adatto nelle particelle dell'anodo e di iniziare a placcare con litio metallico le superfici degli elettrodi. La placcatura può provocare la foratura dei separatori e provocare un corto circuito verso il catodo. Questi corto circuiti inizialmente sono deboli, provocano un vistoso abbattimento della tensione ed un picco notevole di corrente durante la carica. Con il passare del tempo questi corto circuiti aumentano, rendendo impossibile una carica completa della cella. La placcatura del litio metallico provoca l'ampliamento dello strato SEI. Ciò porta ad un aumento della resistenza interna e una riduzione delle prestazioni della cella. La placcatura del litio metallico sull'anodo inizia, di solito, alla temperatura di  $10^\circ C$  ma può avvenire anche a temperature inferiori a seconda dell'elettrolita. A temperature più alte, la placcatura può avvenire anche a normali correnti di carica. Se le valvole di sicurezza della cella (a spirale avvolta) o il foglio di alluminio di rivestimento si aprono a causa della eccessiva pressione interna provocata dalla decomposizione dell'elettrolita o dall'alta temperatura, i vapori dell'elettrolita riempiono il contenitore della batteria. Questi vapori possono rappresentare un pericolo che dipende dalla temperatura di innesco della miscela vapore aria.

L'anodo è formato generalmente da carbonio o suoi composti come la grafite. Può essere sia duttile che flessibile. Mostra una tendenza a legarsi con vari materiali sotto moderate pressioni. In presenza di aria umida, la superficie cambia rapidamente colore e diventa grigia o nera, dovendo reagire con ossigeno e azoto. Tuttavia, se l'umidità è mantenuta sotto un certo livello ( $<20\%$  a  $20^\circ C$ ), non c'è una apparente ossidazione per un certo periodo di ore. La sua gestione è molto sicura e comparabile con quella degli altri metalli alcalini. Non è auto incendiabile, a meno che non entri in contatto con l'acqua.

L'elettrolita, come risultato della sua natura elettropositiva, il litio reagisce violentemente con l'acqua. Per tale motivo sono usati sempre elettroliti non acquosi. Scegliere la più adatta combinazione tra soluto e solvente implica delle considerazioni sulla soluzione stessa. Dovrà verificarsi la stabilità chimica ed elettrochimica e la compatibilità con i materiali degli elettrodi. Ci sono due gruppi di elettroliti che vengono generalmente usati per le batterie ricaricabili al litio che lavorano a temperatura ambiente. Il primo gruppo è costituito da soluzioni liquide di sali di litio contenuti in un solvente organico. Un elettrolita liquido conduce ioni di litio, il quale funziona come trasporto tra l'anodo e il catodo quando la batteria fa passare una corrente elettrica attraverso il circuito esterno. I solventi organici si decompongono facilmente sugli anodi durante la carica, impedendo così l'attivazione della batteria. Tuttavia, quando vengono usati solventi organici appropriati, gli elettroliti si decompongono e formano un'interfaccia elettrolitica solida alla prima carica che è isolante elettricamente e altamente conduttiva per gli ioni di litio. L'in-

terfaccia previene la decomposizione degli elettrodi dopo la seconda carica.

Il secondo gruppo invece è conosciuto come elettrolita polimero ed è formato da sali di litio disciolti in un composito di polimero solido. A volte vengono usati dei miscugli che presentano proprietà migliori. I solventi misti sono anche utilizzati per togliere impurezze ed inibire reazioni su gli strati superficiali di litio, cosa molto importante per la scarica dell'elettrodo e la sua successiva carica. Sono necessari solventi con un ampio campo di stabilità elettrochimica affinché si abbia una alta tensione durante la carica. La scelta del soluto è limitata dalla solubilità. Essa deve essere la più alta possibile in modo da avere sufficiente conducibilità e ridotta resistenza interna. La conduttanza di una soluzione a base di sali di litio presenta un massimo quanto la concentrazione dell'elettrolita aumenta. Tale massimo può essere visto, da un lato, come effetto di un aumento del numero di portatori di cariche e, dall'altro lato, come effetto dovuto ad un incremento della viscosità ed ad un incremento degli ioni a cui è associata la formazione di coppie di ioni non conduttori. I solventi usati in queste batterie sono instabili alla presenza del litio. Il basso livello di corrosione è necessario alla formazione di un film (SEI) sulla faccia del metallo. La stabilità della soluzione elettrolita in presenza del litio dipende dalla purezza e dal basso contenuto di acqua. Una procedura per la purificazione e l'asciugatura del solvente include operazioni di pre-elettrolisi con elettrodi di platino. Sia la natura che la vita degli elettrodi influenzano molto la decomposizione.

Il catodo di queste celle può essere di varia natura: si va da l'ossido di litio a composti a base di ferro, nichel, cobalto e manganese come ad esempio,  $LiFCoO_2$ ,  $LiFePO_4$  e  $LiFNiMnCoO_2$ . Inoltre il catodo, come detto prima, può essere sia solido che liquido. Nel primo caso si ottengono elementi di elevata stabilità e tensioni media di scarica comprese tra 2,2V e 3,2V, nel secondo caso si ha una riduzione della stabilità ma tensione di scarica più elevate, circa 4V.

Gli accumulatori si possono distinguere anche per il tipo di applicazione: accumulatori stazionari, per trazione, per avviamento e portatili.

### **Accumulatori per impianti fissi.**

Gli accumulatori per impianti fissi (stazionari) sono quegli accumulatori (al piombo o al nichel-cadmio) per impianti fissi, che vengono installati per alimentazioni di emergenza (illuminazione o altri servizi) presso centrali elettriche, centrali telefoniche, ospedali, ecc. Essi sono previsti per una lunga vita di servizio (oltre 10 anni) e il loro requisito principale è l'affidabilità. Naturalmente devono essere installati in modo da essere facilmente sorvegliabili. In particolare, per gli accumulatori al piombo, devono essere osservate le regole che riguardano i locali destinati a contenerli (specialmente per l'aerazione e l'illuminazione), gli avvisi al personale, il montaggio degli elementi, la cura degli isolamenti e lo stato delle condutture elettriche. Per gli accumulatori cadmio-nichel di tipo aperto, la norma di esercizio più importante e gravosa è invece rappresentata dal controllo dell'elettrolito che deve essere totalmente sostituito quando il quantitativo di carbonato di potassio (prodotto nell'elettrolito per effetto dell'anidride carbonica dell'atmosfera) supera determinati limiti. Si stanno attualmente diffondendo anche le applicazioni stazionarie degli accumulatori al piombo regolati con valvola (commercialmente detti "sigillati"), che hanno il vantaggio di non richiedere manutenzione [11].

### **Accumulatori per trazione.**

Gli accumulatori per trazione sono destinati a fornire energia per la trazione di veicoli elettrici (spesso all'interno di stabilimenti, cantieri, parchi ferroviari, ecc.) o per la propulsione di natanti. Spesso in questi accumulatori la materia attiva è contenuta in tubi di materiale permeabile all'elettrolito, riuniti in telaio. I loro requisiti principali sono una grande capacità ed una buona resistenza alle sollecitazioni meccaniche. I dati di targa devono riportare la tensione nominale e la capacità alla scarica in 5h. L'applicazione principale degli accumulatori per trazione riguarda

attualmente i carrelli elevatori, mentre nell'ambito della ricerca, la massima attenzione continua ad essere focalizzata sulle batterie per autoveicoli elettriche che richiedono il raggiungimento di energie specifiche notevolmente più elevate di quelle utilizzabili nelle applicazioni di trazione elettrica usuali [11].

### **Accumulatori per avviamento.**

Gli accumulatori per avviamento trovano impiego negli autoveicoli per un complesso di funzioni: avviamento ed accensione dei motori a combustione interna, illuminazione, servizi ausiliari ed alimentazione degli apparati elettronici imbarcati (la batteria ha anche l'importante compito di stabilizzare la tensione a bordo della vettura e la stabilizzazione della tensione è condizione necessaria per il funzionamento delle centraline elettroniche). Per queste applicazioni le batterie di accumulatori devono poter erogare forti intensità di corrente per brevi periodi di tempo senza che la tensione ai morsetti scenda sotto i limiti prescritti. In particolare sono critiche le condizioni di lavoro che si incontrano a basse temperature, infatti, se diminuisce la temperatura, diminuisce anche la potenza erogabile da parte della batteria e nello stesso tempo aumenta la potenza necessaria per avviare il motore. Un'autoveicolo necessita, durante l'avviamento, di una corrente con picchi di un centinaio di ampere, mentre un autoveicolo industriale può arrivare a richiedere un migliaio di ampere. A differenza di quanto avveniva nel passato, le batterie attuali non richiedono rabbocchi di acqua distillata durante il normale esercizio del veicolo eliminando sostanzialmente le operazioni di manutenzione. I dati di targa devono riportare la tensione nominale (V), la capacità (Ah) e corrente di avviamento o "di spunto" (la massima corrente erogabile nei primi 210 secondi) (A) a  $-18^{\circ}\text{C}$ . Ad esempio una batteria da "12V/40Ah/200A" ha una tensione di 12 V, ha 40Ah, quindi è in grado di fornire 40A in un ora di funzionamento continuo oppure 80A in mezz'ora, oppure 20A in due ore ed ha 200A di spunto, quindi nei primi tre minuti e mezzo è in grado di erogare 200A [11].

### **Accumulatori portatili.**

Gli accumulatori portatili sono caratterizzati da un'elevata compattezza e da una buona resistenza agli urti e alle vibrazioni. Un altro requisito indispensabile è l'ermeticità per impedire la fuoriuscita dell'elettrolito e la corrosione dei componenti dell'apparecchio in cui l'accumulatore è incorporato. Per queste applicazioni possono essere usati gli accumulatori al piombo "sigillati", gli accumulatori ermetici nichel-cadmio, gli accumulatori nichel-idruri metallici e gli accumulatori al litio. Gli accumulatori al piombo "sigillati" non hanno vincoli di posizione e non richiedono manutenzione. Sono disponibili in batterie da 6V o da 12V, con capacità fino a 20Ah e durate in cicli pari a circa 200. Le energie specifiche sono comprese da  $18 \div 22 \text{ Wh/kg}$  e  $50 \div 60 \text{ Wh/dm}^3$  [11].

### **2.2.3 Sistema di gestione delle batterie (BMS).**

Le celle che compongono le batterie devono essere accuratamente monitorate e controllate per evitare che qualche cella sia sottoposta ad una sovratensione o ad una sovracorrente dovuta ad una carica e scarica eccessiva. Il problema sorge soprattutto quando più celle vengono collegate in serie. Infatti, anche se la tensione del pacco rimane entro limiti accettabili, alcune celle all'interno della serie possono risultare danneggiate a causa dello sbilanciamento della tensione delle celle. Tale sbilanciamento può essere attribuito alla differente impedenza interna, allo sbilanciamento dello stato di carica (SOC) tra le celle ed al gradiente termico all'interno del pacco. Il problema viene risolto in maniera differente a seconda della tipologia delle celle. Nelle celle al piombo acido viene controllata la sovraccarica. Questo tipo di celle, infatti, possono essere portate in condizione di sovraccarica senza rischiare il danneggiamento permanente della

cella. L'eccesso di energia è dissipato con la formazione di gas nell'elettrolita. Un procedimento simile avviene nelle Ni-MH.

Nelle batterie a litio non può essere usato nessun procedimento naturale per il bilanciamento delle celle ed inoltre quest'ultime non riescono a sopportare una sovraccarica, pena il danneggiamento permanente della cella. Si dovrà utilizzare un metodo artificiale per controllare il bilanciamento delle celle ed eliminare gli effetti dello sbilanciamento delle stesse all'interno del collegamento in serie. Il controllo è molto importante per i transistori presenti nelle applicazioni delle batterie a litio, soprattutto dove si hanno cariche frequenti. Un esempio importante è la frenatura a recupero che avviene nei veicoli elettrici ed ibridi. Tale recupero di energia può provocare problemi perché la corrente in ingresso alle batterie durante una brusca frenata può creare improvvisi incrementi di tensione. Anche quando la tensione del pacco batterie è entro i limiti, durante il flusso della corrente di carica, lo sbilanciamento può provocare il danneggiamento delle stesse. Quindi la corrente di carica prodotta dalla frenatura a recupero deve essere controllata mediante il controllo della singola tensione di cella e non mediante il controllo della tensione globale del pacco. Bisogna inoltre tenere presente che, nelle applicazioni dei veicoli elettrici, le batterie devono essere mantenute ad uno stato di carica compreso tra il 30% e l'80% perché, in ogni momento, devono essere pronte ad immagazzinare l'energia prodotta dalla frenatura a recupero. Tuttavia il valore della carica immagazzinata non può essere troppo basso perché questi veicoli hanno bisogno dell'energia delle batterie durante le accelerazioni.

Inoltre si deve mantenere un elevato stato di carica della batteria perché se il veicolo rimane fermo per troppo tempo, il fenomeno dell'auto scarica può provocare difficoltà di avviamento del veicolo poiché l'avviamento avviene tramite il motore elettrico alimentato esclusivamente dalle batterie. Come detto prima, anche il gradiente di temperatura può provocare momentanei sbilanciamenti. La cella più calda mostra una minore resistenza interna ed un processo di auto scarica più marcato rispetto alle celle più fredde.

Un metodo per evitare gli inconvenienti provocati da sovratensione e sovracorrente è il controllo dell'energia, tramite il sistema di gestione delle batterie (Battery management system, BMS). L'obiettivo è quello di massimizzare la durata di vita della batteria. Le grandezze da controllare sono tensione e corrente. Evitando tensioni troppo elevate si riduce la decomposizione dell'elettrolita, che come visto in precedenza riduce la vita della cella. Il controllo deve evitare quindi che la batteria raggiunga stati di carica del 100% in modo da garantire una vita più lunga. Inoltre evitando correnti elevate si riduce, come già visto in precedenza parlando del SEI, la formazione di piccoli corto circuiti tra i due elettrodi che provocano una diminuzione delle prestazioni.

In Figura 2.39 è schematizzato un sistema di controllo che tramite la tensione delle celle calcola

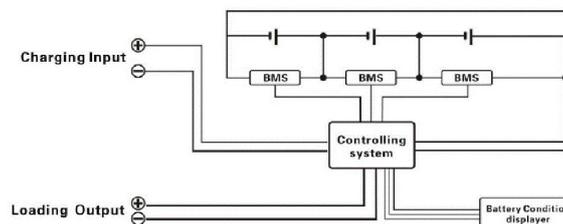


Figura 2.39: Schema di controllo BMS per batterie a litio LFP, Thunder Sky.

la carica che può essere accettata da ogni cella, il suo stato di carica ed altre grandezze utili alla gestione della batteria. La misura delle grandezze di ciascuna cella, necessarie alla gestione della batteria, avviene scollegando momentaneamente la cella della batteria tramite la commutazione dei collegamenti. Uno svantaggio di questo sistema è dato dal fatto che può essere controllata una cella per volta e che quindi è necessaria una elevata velocità di commutazione. Il controllo del processo di scarica delle celle avviene in modo sequenziale. Il controllo della corrente delle

celle avviene con un unico sensore. Tipicamente sono shunt di corrente o sensori ad induzione magnetica installati in serie con le celle della batteria. Il valore della corrente di scarica dipende dalla tensione e dalla temperatura. La corrente di scarica è limitata dalla cella con minori prestazioni e deve essere verificato che nessuna cella raggiunga un prestabilito limite minimo di tensione.

Anche il controllo del processo di carica deve essere basato sul valore della tensione di ogni singola cella in modo che in nessuna di esse si abbia una sovratensione. Uno schema di principio per il controllo della carica è mostrato in Figura 2.40. L'invecchiamento, i gradienti termici ed

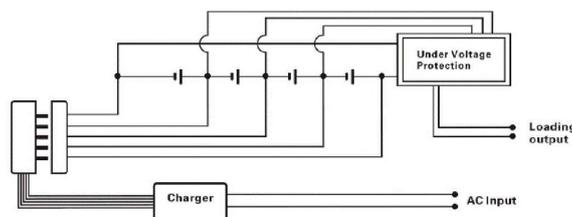


Figura 2.40: **Circuito per il bilanciamento della carica per batterie LFP Thunder Sky.**

il peggioramento dell'autoscarica possono limitare la capacità di ricarica e dunque il controllore della carica deve adattare la corrente di carica alle caratteristiche di ogni singola cella. Anche la corrente di carica deve essere adeguata alla cella con minori prestazioni. Il bilanciamento elettronico della carica realizza l'equalizzazione delle celle variando lo stato di carica delle singole celle. Senza il bilanciamento delle celle, le caratteristiche di carica e di scarica della batteria sono limitate dalla cella con minor carica e quindi la capacità della batteria stessa non potrà essere utilizzata al 100%.

## 2.2.4 Carica batterie.

Un carica batterie è un particolare dispositivo che ha il compito di prelevare l'energia da una sorgente per trasferirla, con opportuna procedura, alla batteria e di segnalare l'avvenuta ricarica. Una batteria può essere destinata principalmente a due modalità di utilizzo. Il primo, e anche il più comune, è l'uso detto ciclico, ossia è prevista la ricarica rapida della batteria solo quando la stessa è scarica. Si alternano quindi fasi di completa scarica e fasi di ricarica veloce. La seconda modalità è quella detta a tampone, in cui la scarica è solo occasionale e il carica batteria è sempre inserito. Nei veicoli elettrici è utilizzato il primo modo, in quanto non si ha una sorgente mobile da cui prelevare energia per la ricarica.

### Procedure di carica.

#### Carica a tensione costante.

Viene applicata la tensione massima  $V_{max}$  ai capi della cella fino alla completa carica. E' il modo più semplice ed è quasi sempre realizzato con un trasformatore a frequenza di rete ed un raddrizzatore. Si deve tenere presente che all'inizio del processo di carica la corrente è molto alta; essa è data dalla:

$$I = \frac{(V_{CB} - V_B)}{R} \quad (2.34)$$

dove con  $V_{CB}$  e  $V_B$  si indicano rispettivamente la tensione fornita dal carica batterie e la tensione ai capi della batteria mentre  $R$  indica la resistenza interna del circuito. Nella fase iniziale la  $V_B$  è molto piccola. Il dimensionamento del carica batterie dovrà essere fatto su una corrente molto alta rispetto a quella di carica e questo fenomeno influisce molto sulla costruzione e quindi sul prezzo del carica batterie stesso.

Carica a corrente costante e poi a tensione costante.

In questa procedura è introdotto un limite alla corrente che può circolare nella prima fase della carica. La Figura 2.41 mostra gli andamenti di tensione, corrente e capacità di una tipica

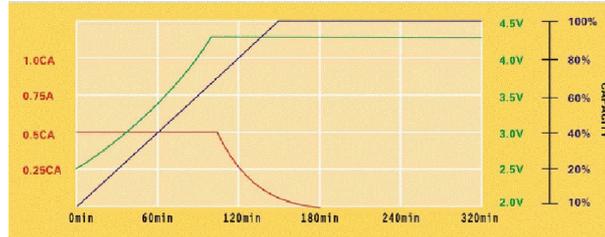


Figura 2.41: **Andamento della tensione, corrente e capacità di una cella a litio durante la carica.**

carica a corrente costante seguita da una carica a tensione costante. Come esempio concreto

MODEL: TS-LFP90AHA	
Nominal capacity	90Ah
Operation voltage (Charge)	4,25V
Operation voltage (Discharge)	2,5V
Max charge constant current	$\leq 3CA$
Max charge impulse current	$\leq 10CA$
Standard charge/discharge current	0,3CA
Cycle life (80DOD%)	$\geq 2000$ times
Cycle life (70DOD%)	$\geq 3000$ times
Temperature durability of case	$\leq 250^{\circ}C$
Operating temperature	$-25^{\circ}C \div 75^{\circ}C$
Self-discharge rate	$\leq 3\%$
Weight	3Kg $\pm$ 100g

Tabella 2.7: **Caratteristiche tecniche di una cella LFP, Thunder Sky.**

si consideri la cella avente le caratteristiche della Tabella 2.7. Adottando questa procedura di carica l'andamento della corrente  $I(t)$  e della tensione durante la carica sono rappresentate in Figura 2.42.

La cella viene inizialmente caricata ad una corrente costante  $I_{max}$  di C/2 ossia 45A. Tale fase

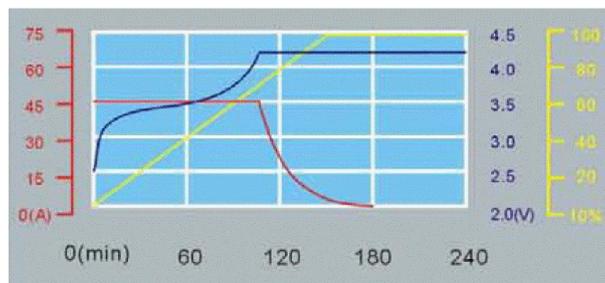


Figura 2.42: **Andamento della corrente (rosso), tensione (blu) e capacità (giallo) durante la carica della cella LFP, Thunder Sky.**

dura per circa 100 minuti e al termine la carica fornita alla cella è:

$$Q_1 = I\Delta t = \frac{(45 * 100)}{60} = 75Ah \quad (2.35)$$

$Q_1$  non coincide con la carica immagazzinata dalla cella, la quale a sua volta non coincide con la carica  $C$  che essa riesce a fornire nel successivo processo di scarica. Non potendo misurare la carica accumulata, la curva della capacità di Figura 2.42 è riferita alla carica  $C$  che la cella fornisce se scaricata a  $C/2$ . Dalla lettura della curva della capacità in Figura si ricava un valore di circa il 72%, in corrispondenza dei 100 minuti di carica. L'efficienza di carica è quindi data dalla:

$$\eta_c = \frac{Ah \text{ erogati}}{Ah \text{ assorbiti}} = \frac{0,72}{0,83} = 0,967 \quad (2.36)$$

L'area sottostante alla curva  $I(t)$  rappresenta la carica totale accumulata nella batteria. Per completare la carica (oltre i 100 minuti) occorre ancora la quantità sottostante alla curva con andamento esponenziale descritto dalla:

$$I(t) = I_{max}e^{-\alpha(t-t_0)} \quad \text{con } t > t_0 \quad (2.37)$$

la carica che ancora viene fornita alla batteria è:

$$Q_F = 0,17C = \int_{t_0}^{\infty} I(t)dt = \int_0^{\infty} I_{max}e^{-\alpha t}dt = \frac{I_{max}}{\alpha} \quad (2.38)$$

dove con  $t_0$  viene indicato l'istante di tempo in cui la corrente comincia a diminuire. Indicando con  $I_F$  il valore della corrente dopo un tempo  $t_F$  da  $t_0$  si può scrivere (trascurando l'origine dei tempi in  $t_0$ ):

$$I_F = I(t_F) = I_{max}e^{-\alpha t_F} \quad (2.39)$$

da cui:

$$t_F = -\frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{I_F}{I_{max}}\right) \quad (2.40)$$

Ipotizzando di limitare il livello di carica al 99%, la carica che ancora si deve fornire è:

$$Q_F = Q_{TOT} - Q_1 = 16\% = 14,4Ah \quad (2.41)$$

dove  $Q_{TOT}$  indica la carica totale da fornire alla cella. Dalla 2.40 si ottiene il tempo  $t_F$ :

$$t_F = \frac{0,17C}{I_{max}} \ln\left(\frac{I_{max}}{I_F}\right) = 0,96h \cong 58min \quad (2.42)$$

Il tempo di carica totale risulterà allora:

$$T = C\left[\frac{0,83}{I_{max}} + \frac{0,17}{I_{max}} \ln\left(\frac{I_{max}}{I_F}\right)\right] = 2,62h \cong 158min \quad (2.43)$$

Si nota immediatamente la sproporzione tra il tempo della fase a corrente costante  $I_{max}$ , in cui viene immagazzinato l'83% della carica, e la fase a corrente non costante, in cui viene trasferito poco più del 16%. La fase a tensione costante risulta quindi insufficiente in termini di uso del carica batterie. Per migliorare questa prestazione, sono state proposte due alternative:

- Una seconda fase di iniezione a corrente costante (flash), in quelli che sono definiti i carica batterie a tre stadi, e che obbliga ad imporre una tensione di cella più alta della nominale quando la corrente comincia a scendere. Con tale metodo si rischia di avere un effetto di stratificazione dell'elettrolita. Tale stratificazione tende ad aumentare la resistenza interna della cella e costringe a fornire una tensione ancora più alta a parità di corrente. Ciò comporta quindi una maggiore dissipazione di energia sotto forma e di calore e quindi un riscaldamento della cella stessa.

- L'introduzione di una soglia di tensione in luogo della soglia di corrente: ogni qualvolta la tensione raggiunge la soglia, si smette di iniettare corrente fino a che la tensione non scende sotto un valore prefissato. Tale metodo ha una difficoltà realizzativa in quanto la tensione di cella viene valutata alla piena corrente e quindi la tensione ai capi del carica batterie vede comprendere anche la c.d.t. sulla resistenza interna del circuito del carica batterie. La resistenza dipende tra l'altro dalla temperatura e dunque la tensione del carica batterie deve crescere in funzione della temperatura della cella in fase di carica.

## 2.3 Supercondensatori.

### Introduzione.

Negli ultimi anni si è assistito ad un proliferare di utilizzatori di energia elettrica che necessitano per il proprio funzionamento d'intense correnti per brevi intervalli di tempo. Ciò implica che la sorgente di alimentazione deve essere in grado di far fronte alle esigenze del carico non solo in termini di energia ma anche di potenza. Tutti i sistemi, per compiere lavoro, necessitano di energia tuttavia alcuni di essi ne richiedono intense quantità per brevi intervalli di tempo mentre altri quantità limitate per periodi prolungati. Entra così in gioco il concetto di potenza che definisce la quantità di energia utilizzata dall'applicazione (o fornita dalla sorgente) nell'unità di tempo. Maggiore è la potenza fruibile da una sorgente, più breve è il tempo entro il quale essa è in grado di somministrare una stessa quantità di energia. Soprattutto in ambito elettrico è necessario utilizzare un sistema di alimentazione che regoli il flusso di energia erogata da una sorgente primaria verso il carico mediante forme d'onda di tensione e corrente che si addicono alle esigenze dell'applicazione in termini di potenza. Quando la tensione di alimentazione, come spesso accade, è fissata (si pensi alle autovetture nelle quali tutti gli equipaggiamenti sono alimentati con sorgenti aventi una tensione nominale di 12 o 24V), trasferire una certa quantità di energia in tempi sempre più brevi implica aumentare il corrispondente valore della corrente. Poiché quest'ultima equivale alla quantità di carica trasferita nell'unità di tempo, ecco che per produrre rapidamente correnti elevate è necessario disporre di un adeguato "serbatoio" di carica [16].

Le soluzioni tradizionali al problema prevedono l'utilizzo di batterie e/o condensatori elettrolitici in alluminio. In entrambi i casi tuttavia, il risultato non è sempre soddisfacente. Le batterie sono in grado di accumulare alte quantità di energia che non possono essere però associate a potenze elevate. Viceversa i condensatori elettrolitici in alluminio esibiscono una discreta potenza abbinata a bassi livelli di energia, essi sono in grado di scaricare correnti estremamente intense ma la loro durata non supera qualche frazione di secondo. Quando peso ed ingombro costituiscono requisiti importanti, il miglior modo per valutare le prestazioni di un dispositivo di accumulo è quello di riferirsi all'energia ed alla potenza specifiche intese come energia accumulabile e potenza massima fruibile per ogni kg di massa del dispositivo. In questi termini le batterie sono caratterizzate da elevate densità energetiche in J/kg ma da medio-basse densità di potenza in W/kg, mentre i condensatori presentano bassa energia ed alta potenza specifiche [16].

### 2.3.1 I supercondensatori.

Chiamati con nomi differenti dai vari costruttori (UltraCap da Epcos, BoostCap da Maxwell, Bestcap da Avx, ecc.), i SuperCondensatori (nel seguito SC) costituiscono nuovi dispositivi per l'accumulo di energia, realizzati grazie ai progressi registrati nel settore delle nanotecnologie [16]. I supercondensatori esitono sin dagli anni '60 e rispetto agli accumulatori convenzionali hanno una maggiore durata (più di 10 anni) ed una grande resistenza alle sollecitazioni elettriche. Purtroppo fin'ora le loro dimensioni ne scoraggiavano il loro utilizzo industriale. I progressi



Figura 2.43: Esempio di un supercondensatore commerciale.

ottenuti dai ricercatori del MIT (Massachusetts Institute of Technology), hanno ridotto notevolmente le dimensioni pur applicando le tecnologie convenzionali di produzione [17]. Trovano utilizzo nelle applicazioni in cui si richiede il loro abbinamento a varie tipologie di sorgenti quali accumulatori, generatori eolici e solari, celle a combustibile [16].

I supercondensatori non rientrano nella categoria dei dispositivi che convertono energia chimica in energia elettrica, ma il loro obiettivo è sostanzialmente lo stesso. Tutti sappiamo che un condensatore carico è come una sorta di batteria che però, a causa dei bassi valori di capacità, si scarica in tempi brevissimi con legge esponenziale. Un supercondensatore assume valori di capacità dell'ordine delle centinaia o addirittura migliaia di Farad, permettendone l'uso continuo ed anche in sostituzione dei comuni accumulatori [17].

Per una fissata tensione  $V$ , l'energia accumulabile in un condensatore di capacità  $C$  è determinata da  $\frac{1}{2}CV^2$  ed è quindi tanto maggiore quanto più grande è la capacità. E' noto che la capacità di un condensatore può essere aumentata diminuendo la distanza tra le armature ed aumentando la superficie affacciata. Grazie ai progressi registrati nel campo delle tecnologie dei materiali, è stato possibile realizzare un materiale conduttivo, noto come "carbone attivo", che presenta a livello microscopico una particolare struttura detta a "nanotubi" caratterizzata da una superficie specifica dell'ordine di  $1000m^2$  al grammo. I supercondensatori sono strutturalmente simili ai condensatori elettrolitici. In essi gli elettrodi (in alluminio) sono ricoperti con polvere di carbone attivo (che aumenta enormemente la superficie sulla quale si formeranno le coppie di cariche opposte in fase di carica) ed immersi in una soluzione elettrolitica [16]. I supercondensatori accumulano l'energia elettrica in due condensatori in serie a doppio strato elettrico EDL (Elettrochemical Double Layer) [18]. All'atto dell'applicazione di una differenza di potenziale, gli ioni dell'elettrolita, sotto l'azione del campo elettrico, si muovono verso le armature con carica opposta fino ad addossarsi in prossimità degli elettrodi. In tal modo lungo la superficie di confine tra elettrodo ed elettrolita (costituita dalle superfici dei nanotubi) vi saranno due strati di carica estremamente ravvicinati (la distanza è dell'ordine di  $2\div 5 \cdot 10^{-9}m$ ). L'elevata superficie disponibile, unita alla ridotta distanza tra le cariche, consente di ottenere capacità di qualche migliaio di Farad in dispositivi grandi appena quanto una lattina [16]. Altre ricerche mirano ad ottenere elettrodi composti da film di carbonio nanostrutturato. La presenza di molti vuoti e canali tra i grani di questo film suggerisce un'elevata porosità ed una bassa densità del materiale. Misure di riflettività ai raggi X hanno confermato questa ipotesi. Rispetto alla tecnologia basata sui nanotubi, che richiede una sequenza complessa di fasi costruttive, la deposizione da fasci supersonici di cluster appare una tecnica più semplice e versatile [18]. L'elevata porosità dei films di carbonio nanostrutturato così depositati, consente grandi superfici attive ( $1400m^2/g$ ) e

permette di raggiungere i seguenti valori:

- capacità specifica  $75F/g$ ;
- massima densità di energia  $76Wh/Kg$ ;
- massima densità di potenza  $506KW/Kg$ .

### 2.3.2 Struttura di un supercondensatore.

Fisicamente il catodo è costituito dall'elettrolita che è assorbito da un opportuno supporto (carta, polimeri, fibre di vetro). Due sono le caratteristiche richieste ad un buon elettrolita, risultare elettrochimicamente inerte alla tensione applicata e presentare stabilità delle proprietà fisico-chimiche in un range termico il più ampio possibile [16]. Quelli maggiormente studiati

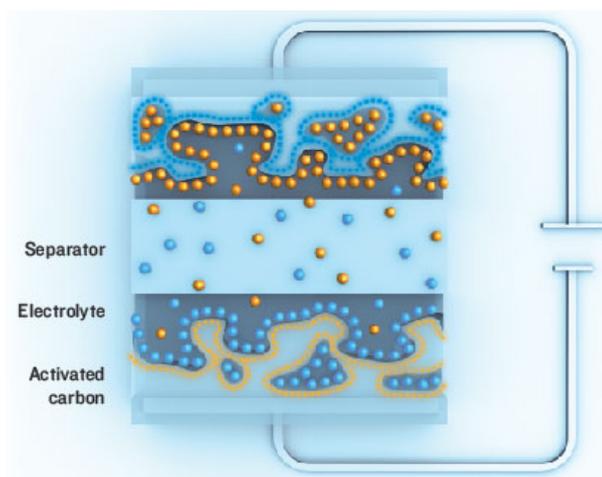
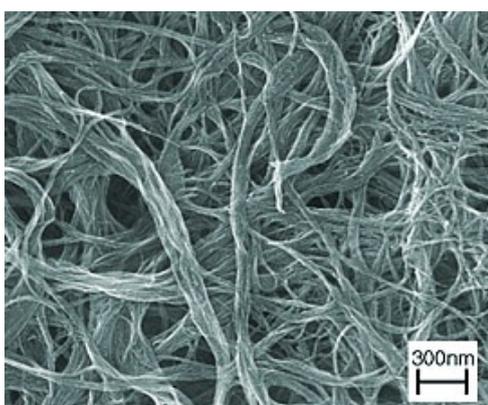
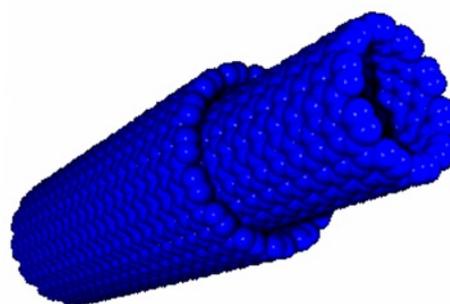


Figura 2.44: **Carbone attivo per supercondensatori.**

e commercializzati utilizzano elettroliti in soluzione acquosa o organica ed elettrodi a base di carbone attivo (Figura 2.44) con elevata superficie. Per aumentare ancora la superficie degli elettrodi sono allo studio dei materiali contenenti nanotubi di carbonio, al posto del carbone attivo [18]. In Figura 2.45(a) si vede come in una parete di nanotubi la superficie possa essere



(a) **Parete di nanotubi di carbonio.**



(b) **Ingrandimento di un nanotubo.**

Figura 2.45: **Nanotubi in carbonio.**

molto più elevata rispetto a quella ottenuta da carbone attivo.

Ma l'utilizzo di soluzioni acquose limita la tensione di cella a circa 1V, valore al quale si innesca un processo di elettrolisi con sviluppo di gas. I più recenti elettroliti, basati su composti organici

innovativi, permettono di ottenere tensioni di cella fino a  $2,5 \div 2,7V$  [16].

In termini di range termico i migliori elettroliti oggi presenti sul mercato sono in grado di lavorare tra  $-40^{\circ}C$  e  $+70^{\circ}C$ . L'elettrodo di contatto negativo (collettore) ed il contenitore sono realizzati in alluminio utilizzando geometrie molto simili a quelle dei condensatori elettrolitici. Una peculiarità dei supercondensatori è costituita dalla presenza di uno strato non conduttivo, detto separatore posto tra gli elettrodi (Figura 2.46). Lo scopo è quello di agevolare i percorsi ionici

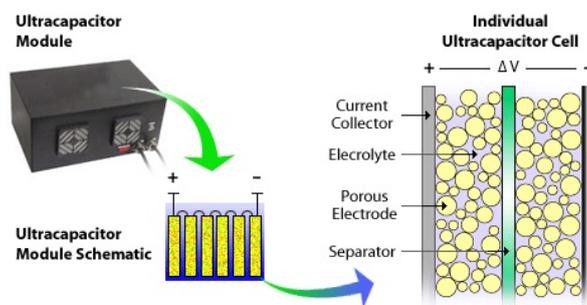


Figura 2.46: **Struttura interna di un supercondensatore.**

nell'elettrolita durante le fasi di carica e scarica, soprattutto con elevate densità di corrente [16] e [18].

Comunemente i tre fogli costituenti l'anodo, il separatore ed il collettore sono arrotolati a formare un cilindro il quale viene immerso nell'elettrolita ed incapsulato nel contenitore di alluminio. Una guarnizione di gomma sigilla la struttura assicurando anche l'isolamento tra i terminali e riducendo la diffusione dell'elettrolita verso l'esterno (questa circostanza l'essiccamento del condensatore e l'incremento del valore della resistenza serie equivalente ESR) [16] e [18].

In termini di energia specifica (J/kg) i supercondensatori sono leggermente inferiori alle batterie al piombo, per contro sono di gran lunga superiori per potenza specifica ossia in termini di velocità di accumulo-erogazione dell'energia nel tempo [16]. Le cariche elettriche si dispongono sull'interfaccia elettrodo/elettrolita del supercondensatore e non si hanno processi chimici di ossido-riduzione [18]. Il rendimento di un supercondensatore sia in fase di accumulo, che in quella di erogazione dell'energia è dell'ordine del 90% (gran parte della perdita è dovuta al fatto che il condensatore deve necessariamente essere caricato attraverso una resistenza che dissipa energia) mentre il rendimento dei migliori accumulatori si attesta sul 50%. Attualmente l'obiettivo principale dei costruttori è quello di aumentare il più possibile la tensione di cella. In questo contesto è da tenere presente che percentualmente un aumento della capacità causa un uguale aumento dell'energia accumulabile mentre aumentando la tensione si assiste ad un aumento circa doppio dell'energia (ad esempio un incremento della tensione del 10% conduce ad un incremento dell'energia accumulata del 20% circa). La tensione nominale di lavoro dei migliori supercondensatori attualmente prodotti varia tra 2,5 e 2,7V. Da ciò segue che affinché un sistema di accumulo basato su supercondensatori possa operare alla tensione nominale delle usuali applicazioni, è necessario utilizzare più celle collegate in serie (Figura 2.47). È facilmente dimostrabile, nonostante la conseguente diminuzione della capacità equivalente, tale metodo conduce, nel caso del collegamento di "N" celle uguali, ad un aumento di un fattore "N" dell'energia accumulata [16].

Quando si collegano più supercondensatori in serie, diviene critica l'uniformità della distribuzione della tensione sulle singole celle, problema noto come "voltage balancing". Distribuzioni uniformi possono essere ottenute mediante dispositivi passivi o attivi. I primi, utilizzati per applicazioni nelle quali la corrente attraverso il condensatore si mantiene su livelli bassi per tempi prolungati, prevedono resistori di precisione connessi in parallelo ad ogni singola cella. Il valore ohmico dipende dalla capacità della cella ed è dell'ordine dei 100000 secondi/Farad (il prodotto Ohmm



Figura 2.47: **Batteria di supercondensatori commerciale.**

x Farad è un tempo in secondi). L'impiego di dispositivi elettronici attivi si usa, invece, quando la corrente attraverso il condensatore può assumere picchi elevati per brevi intervalli di tempo e deve quindi essere limitata. In questi casi il bilanciamento viene ottenuto mediante singoli circuiti di regolazione connessi in parallelo ad ogni cella. Ognuno di essi realizza essenzialmente un comparatore dotato al proprio interno di un preciso riferimento di tensione. Se il valore della tensione ai capi del supercondensatore supera la soglia stabilita, questo viene temporaneamente chiuso su un carico resistivo finché la scarica riporta la tensione al di sotto della soglia di guardia [16].

Nei supercondensatori l'energia è immagazzinata direttamente nel campo elettrico tra le armature senza alcuna reazione chimica, il che rende il processo di accumulo e rilascio altamente reversibile e con efficienza non influenzata dal numero di cicli di carica e scarica. Per lo stesso motivo, i supercondensatori sono molto "tolleranti" nei riguardi del metodo di ricarica adottato. Possono essere utilizzati profili del tutto arbitrari purché la tensione ai capi dell'elemento non superi mai quella nominale (unico accorgimento è dovuto alla resistenza interna particolarmente bassa la quale impone l'utilizzo di sorgenti auto-limitate in corrente). Possono essere "microciclati", ossia sottoposti a cariche/scariche che coinvolgono il 5% o meno dell'energia accumulabile (condizione operativa questa che si verifica in molte applicazioni) [16] e [17].

In generale un supercondensatore può operare, per periodi limitati, a tensioni e temperature superiori a quelle nominali. Maggiore è la tensione alla quale opera la singola cella minore sarà la sua durata. Come regola generale, eventuali picchi di tensione impulsiva non devono superare il 110% della tensione nominale. La temperatura non dovrebbe mai superare i 70°C tale limite va tenuto in considerazione non solo durante il funzionamento del dispositivo, ma anche durante le eventuali fasi di saldatura dei suoi terminali ai circuiti esterni. Contrariamente ad altri dispositivi di accumulo, le fasi di carica-scarica non influiscono sensibilmente sulle attese di vita. In condizioni normali i supercondensatori sopportano un numero di cicli dell'ordine del milione senza degrado apprezzabile delle caratteristiche (capacità, ESR, ecc.) [16] e [18].

Osservando i data sheet dei costruttori è possibile rendersi conto di numerose altre prerogative presentate dai supercondensatori, quali ad esempio il range di temperatura di funzionamento, totale assenza di manutenzione (che ne compensa nel tempo il costo iniziale), assenza di sostanze tossiche da smaltire, possibilità di stoccaggi per lunghi periodi di tempo. Poiché molte applicazioni, ne prevedono l'impiego su veicoli a trazione elettrica, l'ingombro, il peso e la resistenza alle vibrazioni divengono caratteristiche fondamentali. Il design del package e quello delle connessioni esterne sono quindi aspetti particolarmente curati dai costruttori. Geometria, volume e massa della singola cella devono essere definite per minimizzare peso ed ingombro, massimizzando nel contempo energia e potenza specifiche del package. Il design delle connessioni influenza la resistenza alle vibrazioni, la maggior parte dei supercondensatori vengono attualmente prodotti con terminali per saldatura o con terminali che consentono il fissaggio a vite del corpo direttamente

alla barra (ciò che produce un contemporaneo miglioramento delle caratteristiche termiche). In ogni caso, poichè i supercondensatori sono destinati a garantire correnti intense (seppur per brevi intervalli di tempo) è di vitale importanza che la connessione offra sempre una resistenza quanto più piccola possibile [16].

### 2.3.3 Applicazioni dei supercondensatori.

I supercondensatori potenzialmente sono la risposta in tutte le applicazioni che richiedono immagazzinamento e rilascio veloci di energia elettrica. Mediante batterie di supercondensatori è possibile evitare il continuo intervento di gruppi generatori o celle a combustibile nel caso di ripetuti transitori di flusso di energia che avvengono negli impianti elettrici. Anche l'intrinseca disuniformità della produzione di energia nel tempo dei generatori eolici e solari è un problema che può trarre vantaggi dall'utilizzo di supercondensatori caratterizzati, tra l'altro, da basso invecchiamento conseguente a ripetuti cicli di carica-scarica. Gli azionamenti elettrici e la regolazione dell'alimentazione per i carichi rapidamente variabili in robotica sono solo alcuni esempi di possibili utilizzi in ambito industriale. Piccoli supercondensatori sono già integrati per il mantenimento della memoria in molte applicazioni consumer quali fotocamere digitali e personal computer [16].

Nel settore automotive i supercondensatori risultano particolarmente adatti per i sistemi di distribuzione elettrica a più zone. In un'autovettura la batteria è quasi sempre collocata ad una certa distanza dai carichi, per cui la resistenza serie del collegamento si somma a quella della sorgente, ciò che costituisce un problema nel caso di applicazioni che richiedono correnti intense. D'altra parte, nelle moderne autovetture, applicazioni di questo tipo sono sempre più numerose. Si pensi ad esempio ai sistemi per il gonfiamento istantaneo degli airbag, a quelli per il preriscaldamento dei catalizzatori, ai regolatori di carichi rapidamente variabili quali sospensioni intelligenti, ed anche agli impianti hi-fi car (la cui dinamica di riproduzione è fortemente influenzata, nei picchi, dal sistema d'alimentazione). In tutti questi casi, uno o più supercondensatori possono essere installati nelle immediate vicinanze dell'applicazione affinché l'energia in essi accumulata possa far rapidamente fronte alle richieste istantanee del carico [16].

Il fatto di poter essere rapidamente caricati e scaricati, anche con correnti elevate, fa sì che i supercondensatori trovino applicazione nei cosiddetti freni rigenerativi. In questo caso l'energia cinetica dei veicoli viene trasformata in energia elettrica che l'azionamento può utilizzare nuovamente. Soprattutto nel traffico cittadino, i cui cicli di guida sono caratterizzati da continue accelerazioni e frenate, è possibile in questo modo risparmiare fino al 20÷25% di energia. Analogo risultato si ottiene con i mezzi di trasporto pubblico locale su rotaia, infatti i supercondensatori sono in grado di accumulare l'energia di una metropolitana durante la fermata per poi cederla al riavvio successivo, considerando le numerose fermate e ripartenze di questi mezzi è indubbio il beneficio in termini di rendimento complessivo [16] e [18].

Le prime applicazioni di questa tecnologia sono in Texas, si tratta di un importante progetto della EESore. Da qualche tempo ha iniziato la produzione di un'auto elettrica di nuova concezione che tramite l'utilizzo di supercondensatori super efficienti è in grado di offrire affidabilità, autonomia e velocità di ricarica. Questi supercondensatori (EESU) sono in grado infatti di garantire 500Km di autonomia con solo pochi minuti di ricarica. Non solo, gli EESU possono immagazzinare da 1,5 a 2,5 volte l'energia delle precedenti batterie a fronte di un costo minore del 15÷25%. I costruttori di automobili intanto pensano a progetti ibridi, le automobili dotate di supercondensatori sono un primo traguardo nel settore car maker. All'interno del veicolo è eliminata la presenza del serbatoio e del carburante, sostituiti da un sistema a batterie, supercondensatori e un motore elettrico. Le batterie si ricaricano in poco tempo tramite la rete elettrica in stazioni di servizio oppure recuperando l'energia prodotta dall'automobile durante il movimento e nelle

fasi di frenatura. In California la ricerca in questa direzione è recentemente giunta alla fase della verifica su strada di un prototipo, l'Honda Fcx, il cui scopo è l'analisi dei pregi e difetti della nuova tecnologia. L'automobile dotata di supercondensatori è del tutto sicura, non necessita di alcun tipo di serbatoio per contenere il carburante, non inquina ed è assolutamente silenziosa [17].

La maggiore controindicazione è dovuta alla tecnologia costruttiva che, seppur disponibile, è ancora molto costosa. Quando le prestazioni in termini soprattutto di autonomia di percorrenza miglioreranno, è indubbio che l'aumento della produzione (economia di scala) ed ulteriori investimenti in ricerca e sviluppo consentiranno un forte ribasso del costo di produzione [17].

In Italia, presso l'Istituto CNR-ITAE di Messina è in corso un'attività di ricerca, finanziata dal Consiglio Nazionale delle Ricerche, orientata a sviluppare un supercondensatore che per tipologia può ritenersi, nel panorama scientifico internazionale, completamente innovativa. Essa consiste nel realizzare un dispositivo costituito solo da componenti solidi e cioè nell'utilizzare al posto dei tradizionali elettroliti liquidi un elettrolita solido polimerico. A tale tipologia di supercapacitore è stato dato il nome di supercapacitore tutto-solido. Nel medio termine si prevede di ottenere da questo dispositivo migliori prestazioni, maggiore sicurezza e durata rispetto ai sistemi convenzionali [18].

## 2.4 Accumulatori meccanici.

E' noto che un "volano", messo in moto preventivamente da una opportuna fonte di energia (per esempio un motore elettrico) immagazzina energia meccanica e può cederla ad una qualunque macchina. Questa forma di accumulo di energia, ha generalmente un rendimento basso, per effetto degli attriti, che tendono a rallentare la massa rotante ed a scaricare l'energia immagazzinata.

L'energia contenuta in una massa rotante è espressa dalla:

$$W = \frac{1}{2}J\omega^2 \quad (2.44)$$

in cui  $\omega$  è la velocità angolare e  $J$  è il momento d'inerzia; nel caso di un cilindro rotante il momento d'inerzia è dato da:

$$J = \frac{1}{2}Mr^2 \quad (2.45)$$

con riferimento alla Figura 2.48,  $M$  è la massa del corpo ed  $r$  è il raggio del cilindro.

E' facile vedere che per disporre di energie immagazzinate elevate, occorre avere momenti di

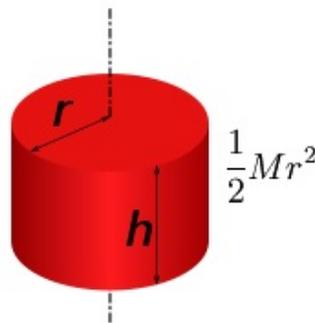


Figura 2.48: **Momento di inerzia per un corpo cilindrico.**

inerzia elevati e quindi in caso di volani cilindrici masse elevate. E' una condizione non sempre accettabile soprattutto in applicazioni che non gradiscono ingombri e pesi elevati.



## Capitolo 3

# Azionamento di propulsione.

### Introduzione.

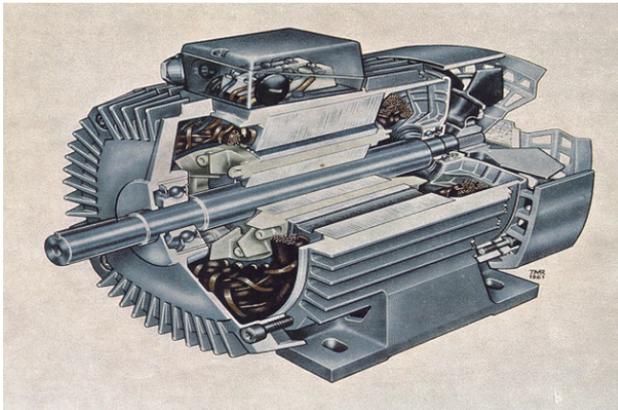
Con il presente lavoro si vogliono confrontare gli aspetti caratterizzanti le principali tipologie di azionamenti elettrici. I motori presi in considerazione sono:

- **Motore asincrono**, nella sua versione trifase e con rotore a gabbia di scoiattolo;
- **Motore a riluttanza variabile**;
- **Motore a magneti permanenti**, sia AC che DC.

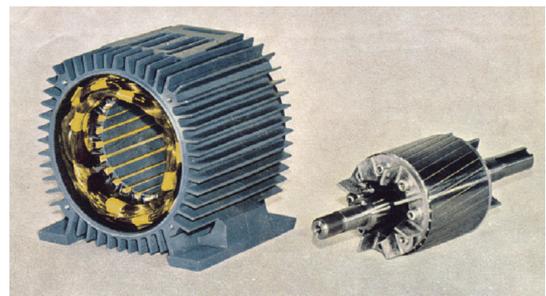
Dopo una breve panoramica generale sulle caratteristiche di ogni azionamento si cercherà di scegliere quello che si abbina meglio alle specifiche richieste da una propulsione navale tipica delle imbarcazioni da diporto.

### 3.1 Azionamenti con motore asincrono.

Il motore asincrono è robusto e di facile costruzione ed economico. Si presenta come una



(a) Spaccato di un motore asincrono a gabbia.



(b) Statore e rotore di un motore asincrono a gabbia.

Figura 3.1: Motore asincrono trifase e suoi componenti.

macchina sensorless, infatti nel normale funzionamento non richiede l'ausilio di sensori, ed intrinsecamente stabile, o almeno finché la  $C_m \leq C_{maxE}$  generata dal motore, anche senza feedback di velocità [19], [21], [26].

Per contro si hanno anche dei limiti, in quanto questi motori normalmente non sono flussati prima dell'avvio ed esiste una certa inerzia all'atto della generazione del campo magnetico rotante (dinamica lenta). Inoltre per basse velocità si possono avere delle oscillazioni che possono portare

instabilità [19]. Un altro problema sono gli impuntamenti che si possono verificare o con avvii sotto carico o con PWM errate [21]. Infine il motore asincrono ha lo svantaggio di avere bassa efficienza per il surplus di perdite sul rotore, rispetto ai motori sincroni, infatti il rotore non riesce a raggiungere la velocità di sincronismo e quindi si crea una corrente indotta, che genera perdite per effetto Joule anche sul rotore. Da ricordare che il rotore è anche sottoposto a flussi variabili e quindi si hanno anche perdite nel ferro [19]. L'efficienza ed il fattore di potenza diminuiscono per piccole taglie in primo luogo perchè non si riesce a smaltire il calore per i traferri ridotti, di conseguenza occorrono grandi portate di aria  $\Rightarrow$  maggiori perdite per ventilazione ed in secondo luogo la riduzione del profilo dei denti, conseguente alla riduzione delle dimensioni geometriche, può dare maggior saturazione nel ferro  $\Rightarrow$  maggiori perdite nel ferro [19], [26].

Per superare i limiti di funzionamento del motore asincrono si sono studiati diversi controlli, tra i quali spiccano il DTC (controllo diretto di coppia) ed il controllo vettoriale, nei quali l'ampiezza e la fase della corrente di statore sono regolate in modo da mantenere ottimo l'angolo tra la forza magnetomotrice di statore ed il flusso di rotore [19], [21]. Purtroppo questi controlli di ultima generazione hanno bisogno di conoscere la posizione del rotore o il modello del motore. Naturalmente questo fatto comporta dei costi aggiuntivi oltre a rendere maggiormente complesso il controllo ed in molti casi non si riesce a giustificare il costo per piccoli azionamenti [19].

In base a quanto appena scritto, si evince che il motore asincrono non offre una buona soluzione se si ricerca un azionamento con elevate prestazioni dinamiche, elevata efficienza e grande escursione di velocità [19].

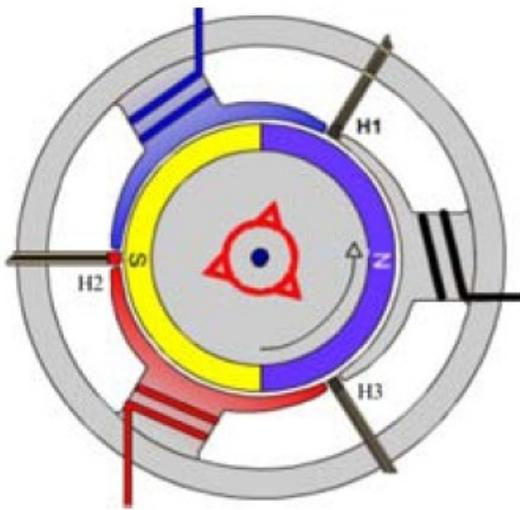
### 3.2 Azionamenti con motori brushless DC.

I motori brushless DC (BLDC) sono usati in svariate applicazioni industriali e stanno incrementando la loro diffusione per la loro efficienza, il controllo più semplice rispetto ad un motore asincrono ed ai brushless AC (descritti al paragrafo 3.3) e la mancanza di spazzole rispetto ad un motore in corrente continua tradizionale [22]. Il range coperto è di  $1 \div 10$  KW, sopra questa taglia il motore ad induzione migliora il costo dei magneti usati [19].

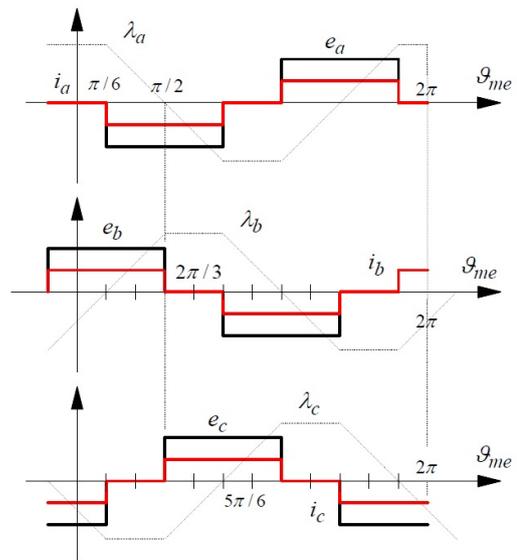
I BLDC posseggono gli avvolgimenti sullo statore (di solito tre, ma anche in numero maggiore) ed i magneti permanenti (PM, permanent magnet) sul rotore [22]. L'assenza di avvolgimenti sul rotore porta due vantaggi: il primo è quello di avere perdite di rotore estremamente piccole ed il secondo è di poter rimuovere più facilmente il calore prodotto dalle perdite di statore, dato che quelle di rotore sono trascurabili (questo fa sì che le macchine possano avere dimensioni ridotte a parità di coppia erogata e potenza rispetto ai motori ad induzione) [19]. Inoltre il fatto di non avere spazzole e commutatore elettromeccanico riduce la lunghezza del motore e di conseguenza il suo diametro, ottenendo la possibilità di raggiungere velocità maggiori e rapporti  $l/D$  (lunghezza/diametro di alesatura) più elevato. Questo è importante per ottenere rapporti coppia/inerzia ( $C/J$ ) elevati (talvolta è richiesto per posizionatori) [19].

I magneti del rotore sono costruiti per produrre un andamento spaziale del flusso al traferro ad onda triangolare. Questo fa sì che la forza elettromotrice indotta negli avvolgimenti di statore, per come sono posizionati questi ultimi, diventi un'onda di forma trapezoidale (da cui il nome motore trapezio). In Figura 3.2(a) si può vedere lo schema di massima di un motore BLDC, mentre in Figura 3.2(b) si può notare l'andamento spaziale del flusso  $\lambda$  e delle forze elettromotrici indotte  $e$  al variare dell'angolo meccanico  $\vartheta_{me}$ .

Nel BLDC il controllo si semplifica notevolmente, dato che basta far circolare delle correnti, con verso opportuno, nelle due fasi in cui la f.e.m.  $e$  è costante, si ottiene così coppia costante in ogni punto. Per alimentare il motore può essere utilizzato lo stesso tipo di inverter usato per i motori ad induzione, con la sola eccezione di controllare solo due rami per volta in modo di parzializzare l'alimentazione con un'opportuna PWM (uguale al funzionamento di un chopper). Purtroppo nella realtà si riscontrano problemi di commutazione nelle fasi, ossia quando si commutano due,



(a) Schema di massima di un BLDC.



(b) Flusso e f.e.m. caratteristiche di un BLDC.

Figura 3.2: BLDC trifase.

lasciando il terzo alimentato, la corrente dell'avvolgimento che viene aperto, non decade a zero alla stessa velocità con cui si incrementa la corrente dell'avvolgimento che viene chiuso. Questo fatto provoca un'ondulazione di coppia che diventa sempre più elevata con l'aumentare della velocità [19].

Il controllo può essere analogico oppure digitale. In quest'ultimo caso i costi possono ancora essere abbattuti approssimativamente del 37% se si utilizza un microcontrollore con i generatori della PWM ed i convertitori ADC on-chip [22]. Comunque si ricorda che occorre sempre l'informazione della posizione del rotore, che può essere ottenuta o tramite sonde ad effetto Hall o con un encoder assoluto, in quanto basta identificare il settore in cui si trova il flusso prodotto dai magneti permanenti sul rotore e quindi alimentare le fasi opportune in modo da trascinarlo in rotazione [19], [21], [22], [26].

### 3.3 Azionamenti con motori brushless AC.

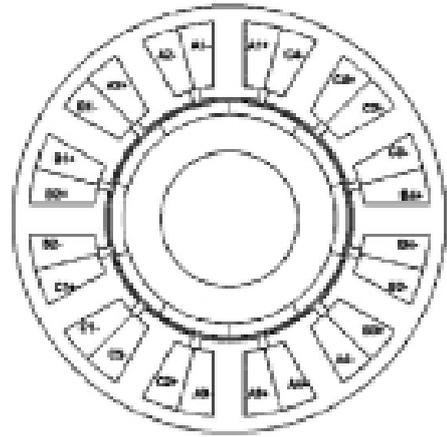
Il motore brushless AC o motore a magneti permanenti ad onda sinusoidale è simile al motore BLDC (Figura 3.3) con la differenza di avere una distribuzione sinusoidale del flusso magnetico al traferro. Questo comporta, quando la distribuzione dei conduttori sullo statore è quasi sinusoidale, di poter alimentare la macchina come se fosse un motore sincrono; ma non avendo spazzole si ottengono minori perdite e maggior efficienza [19].

La possibilità di poter alimentare il motore con tensioni sinusoidali offre vantaggi in termini di controllo, infatti si possono adattare tutti i controlli vettoriali del motore asincrono (DTC, controllo ad orientamento di campo, ecc.). Lo svantaggio, però, è quello di dover prevedere l'utilizzo di un resolver o di un encoder assoluto, dato che in questo caso (a differenza del BLDC), non basta identificare il settore, ma occorre conoscere la posizione esatta del rotore.

Per il tipo di costruzione ed il funzionamento questo motore presenta coppia costante, con una piccolissima ondulazione ed offre il vantaggio di essere intrinsecamente tollerante ai guasti dei magneti, infatti, anche se a seguito di una sovracorrente o altro guasto, i magneti permanenti riuscissero a smagnetizzarsi il motore comunque continuerebbe a funzionare come un motore ad



(a) Motore brushless AC.



(b) Schema di massima di un motore brushless AC.

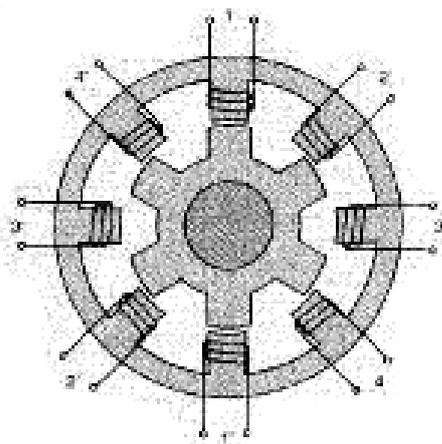
Figura 3.3: Brushless AC o ad onda sinusoidale.

induzione normale. Naturalmente, in quest'ultimo caso, si avrebbe una degradazione del fattore di potenza e dell'efficienza [19].

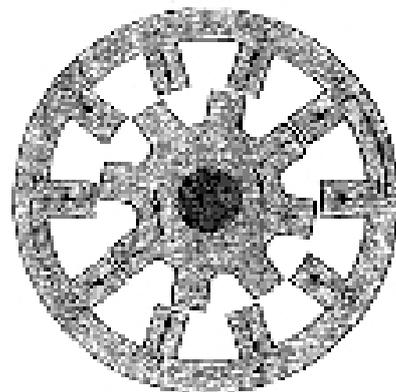
### 3.4 Azionamenti con motori a riluttanza commutata.

Il concetto di motore a riluttanza variabile è stato stabilito ancora nel lontano 1838, ma il motore non ha avuto un grosso successo prima dell'avvento dell'elettronica di potenza e dei microcontrollori. Dalla metà degli anni 60 si sono avuti nuovi sviluppi, che hanno portato questo tipo di motore ad essere competitivo con motori a magneti permanenti [19].

Come si può apprezzare in Figura 3.4 il motore a riluttanza commutata (SRM, Switched Reluc-



(a) Motore a quattro fasi.



(b) Motore penta fase.

Figura 3.4: Esempi di piani di laminazione di motori a riluttanza variabile.

tance Motors), presenta delle espansioni polari sia sul rotore che sullo statore. Gli avvolgimenti

di eccitazione si trovano solo sullo statore (Figura 3.4(a)) [19], [24], [25].

Ci sono due differenze essenziali per distinguere il motore SRM dal motore passo-passo a riluttanza variabile. La prima è che, per l'SRM, la fase della corrente è sincronizzata con la posizione del rotore, come per il BLDC. Il motore passo-passo, invece, può essere comandato passo per passo a catena aperta, senza l'ausilio di sensori di posizione. La seconda differenza è che per l'SRM si ha un'efficiente conversione di potenza alle alte velocità, comparabile con i motori a magneti permanenti, mentre il passo-passo è di solito dimensionato per essere un motore di coppia, che funziona per velocità limitate. Questo comporta una differenza sostanziale sulle geometrie delle macchine e sul progetto degli inverter che le alimentano, inoltre il motore SRM, opportunamente alimentato, produce una coppia continua a differenza del passo-passo, nel quale la coppia è pulsante [19].

Come già detto in precedenza il motore SRM è dimensionato per alte velocità, combinando alcune qualità del motore ad induzione ed altre proprie dei motori a magneti permanenti. I vantaggi sono molteplici, ad una notevole semplicità della strategia di controllo si affianca una semplificazione nell'inverter utilizzato, si può fare a meno di alcuni interruttori di potenza dal momento che la coppia è indipendente dalla polarità della corrente di fase, inoltre gli interruttori sono in serie alle fasi e non si corre il rischio di generare corto circuiti. La macchina è di elementare concezione, facile da realizzare ed economica, i circuiti di eccitazione si trovano sullo statore, facilitando così il raffreddamento ed il rotore presenta una ridotta inerzia, è meccanicamente robusto (può raggiungere velocità anche elevate) e può lavorare a temperature maggiori, non avendo magneti permanenti che si potrebbero smagnetizzare con le temperature elevate [19], [20], [23], [24] [25].

Il controllo si riduce ad alimentare una fase sola per volta. La corrente viene regolata tramite chopper e la fase viene scelta in base alla posizione del rotore. L'unico inconveniente si ha nel passaggio della corrente da una fase all'altra, se le correnti nelle due fasi non sono compensate opportunamente (nella prima fase deve decrescere con la stessa rapidità con cui sale nella seconda) si ha un buco di coppia o una coppia negativa che rallenta il motore. Questo problema purtroppo è più evidente alle basse velocità, per le quali in controllo prevede anche un limitatore di corrente ed il segnale di comando diventa un'onda quadra, come per i motori passo-passo, degradando notevolmente le prestazioni. Per questi motivi, di solito, gli SRM hanno un limite inferiore di velocità sotto il quale non si scende [19], [20], [24].

A causa della commutazione, come per il motore BLDC, anche per l'SRM si ottiene un'ondulazione di coppia elevato che, essendo il momento d'inerzia piccolo, porta notevoli problemi di vibrazioni e di rumorosità [19], [25]. Per risolvere questo problema si può pensare di aumentare l'inerzia del sistema (per la trazione elettrica, in cui il veicolo possiede un'elevata inerzia propria) o aumentando il numero di denti di rotore. In quest'ultimo caso bisogna tenere in considerazione la velocità richiesta dal sistema, in quanto se si dimensiona la macchina in modo da avere  $N_s - N_r = \pm 2$ , si riduce l'ampiezza dei settori, riducendo, così, l'ondulazione di coppia, ma ottenendo, per contro, velocità di funzionamento basse [24].

Nel SRM si deve generare il flusso al momento del suo avviamento, generando ritardi e penalizzando le caratteristiche dinamiche (nei motori a magneti permanenti ciò non avviene in quanto i magneti permanenti producono già flusso indipendentemente dagli avvolgimenti) [19]. Si può, altresì pensare di ottenere una premagnetizzazione inserendo degli opportuni avvolgimenti e sacrificando una certa percentuale di coppia. Si ottiene un aumento dell'efficienza del 18% circa, ma un aumento dei costi di costruzione per il suo controllo [23].

### 3.5 Scelta del tipo di motore per la propulsione dell'imbarcazione.

In prima istanza si analizzeranno le differenze tra le principali tipologie di motori. Si prenderanno in considerazione motori asincroni, a riluttanza variabile ed a magneti permanenti (senza

distinzioni BLAC o BLDC), sotto l'ipotesi che i motori abbiano identici i diametri esterni del pacco statorico, di quello rotorico e la lunghezza dello statore [26].

La prima comparazione verrà eseguita sulla base della potenza erogata e sull'efficienza, ipotizzando che i magneti permanenti siano costruiti con terre rare. In Tabella 3.1 sono mostrati i risultati della comparazione dei tre tipi di motori [26]. Nella Tabella 3.1 non si è tenuto conto

Tipo di motore	Potenza 75°C	Efficienza	Densità di corrente [ $A/mm^2$ ]
Induzione AC	5,0	90% catalogo	7,8
Magneti permanenti	14,5	94% misurato	7,65
Riluttanza variabile	9,0	92% misurato	7,7

Tabella 3.1: **Comparazione delle prestazioni in termini di potenza resa.**

di un importante aspetto per la comparazione: il raffreddamento. Esso dipende dalla tecnologia costruttiva della macchina, infatti si erano fissate alcune dimensioni geometriche, ma non si era detto nulla sui materiali (salvo il tipo di magneti) [26].

Per l'analisi dei costi si assume che i tiranti, le testate, i ventilatori e le carcasse siano le stesse per tutti i motori ed i materiali usati (stessa qualità). Le parti che variano di più sono le forme costruttive dello statore e del motore ed è su queste particolarità che si basa la comparazione. La Tabella 3.2 mostra le variazioni di costo dei possibili materiali usati per unità di peso. I magneti

Tipo di motore	Rame €/Kg	Ferro €/Kg	Alluminio €/Kg	Magneti €/Kg	Costo totale €/Kg	Costo/potenza €/ (Kg*KW)
Induzione AC	51,87	41,68	7,07	-0-	100,62	27,48
Magneti permanenti	40,42	50,52	-0-	555,72	646,66	60,90
Riluttanza variabile	35,36	43,95	-0-	-0-	79,32	12,03

Tabella 3.2: **Comparazione in termini di costo e materiali utilizzati.**

permanent in terre rare sono molto costosi, quelli ceramici hanno il problema di avere bassa densità volumetrica (maggiore volume per ottenere lo stesso flusso) [26]. I magneti in Nd-Fe-B hanno costi piuttosto contenuti (ecco che allora anche i motori a magneti permanenti diventano economicamente competitivi), hanno temperatura di funzionamento di 25÷125°C, ma dato che le perdite nel rotore sono basse e lo statore si raffredda facilmente, vengono solitamente dimensionati con  $T_{lavoro} = 100°C$  [19].

In base a quanto detto nella sezione 3.1 ed alle Tabelle 3.1 e 3.2, viene confermata l'inadeguatezza del motore asincrono per questa applicazione, soprattutto per la bassa efficienza.

Il motore SRM, anche se presenta notevoli vantaggi, uno tra tutti è il costo ridotto potrebbe creare problemi con vibrazioni o rumore e dato che il sistema non è previsto abbia inerzia elevata, questi inconvenienti, specie in una barca, potrebbero ridurre il confort degli occupanti.

I motori a magneti permanenti sembrano essere quelli più indicati, sono in generale più efficienti, anche se costano più degli altri per la presenza dei magneti e sono più compatti. Ne esistono di due tipi: a flusso radiale (visti fino a qui) ed a flusso assiale. Tra i due modelli cambia la

forma costruttiva ma non le caratteristiche e vengono, di solito, usati per propulsione navale, direttamente calettati all'albero motore [27].

Resta da decidere tra il BLDC ed il motore ad onda sinusoidale, quest'ultimo ha il vantaggio di poter funzionare ugualmente diventando un semplice motore asincrono, nel caso i magneti si smagnetizzino. D'altro canto, però, il BLDC a parità di potenza ha coppia più elevata, infatti ipotizzando di avere un angolo di coppia di  $90^\circ$ , la coppia per il valore efficace della corrente di fase, nel motore trifase ad onda sinusoidale, è:

$$T/I = \frac{3}{2} \sqrt{2} \frac{\pi r_1 l \hat{B} N}{2} \quad (3.1)$$

in cui:

$T$  = coppia elettromagnetica generata;

$I$  = valore efficace della corrente di fase;

$r_1$  = raggio interno dello statore;

$\hat{B}$  = valore di picco della densità del flusso magnetico sotto un polo;

$N$  = numero di conduttori in serie per fase.

La coppia per corrente di picco è  $\sqrt{2}$  volte inferiore alla 3.1 [19].

Nel BLDC, invece, la coppia per la corrente di picco vale:

$$T/i = 4r_1 \hat{B} l N \quad (3.2)$$

con lo stesso significato dei simboli ( $i$  è il valore di picco della corrente di fase che coincide con il valore della corrente mantenuto in una fase per due settori contigui) [19].

Il valore efficace della corrente di fase per il BLDC, ricordando che le correnti sono ad onda quadra a  $120^\circ$ , è:

$$I = i \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (3.3)$$

Perciò la coppia per valore efficace della corrente, nel BLDC, risulta (sostituendo la 3.3 nella 3.2):

$$T/I = 4 \sqrt{\frac{3}{2}} r_1 l \hat{B} N \quad (3.4)$$

Dividendo la 3.4 per la 3.1, si ottiene il rapporto di coppia per ampere nei due motori (equazione 3.5). A parità di valore efficace della corrente di fase la coppia del BLDC risulta 1,47 volte quella del motore sinusoidale [19].

$$\frac{4 \sqrt{\frac{3}{2}}}{\frac{3}{2} \sqrt{2} \frac{\pi}{2}} = 1,47 \quad (3.5)$$

A parità di picchi di corrente il fattore è 1,69. La comparazione è stata fatta ipotizzando uguale densità magnetica di picco al traferro [19].

Per liberarsi da questo impiccio, è meglio mettere a confronto i motori in base allo stesso flusso per polo, ottenendo il rapporto per il valore efficace della corrente di 0,94, mentre quello per il valore di picco di 0,81. Anche se questa analisi trascura molti importanti effetti, come reazione di armatura e perdite, indica che non c'è molta differenza tra i due motori [19].

Più interessante è il paragone eseguito considerando le caratteristiche volt-ampereometriche richieste dai convertitori. Una semplice stima può essere fatta considerando la potenza apparente sugli switch di potenza per potenza attiva utilizzata nel motore, si ottiene:

$$VA_e = 2qI_s V_s \quad (3.6)$$

dove:

$VA_e$  = valore efficace della potenza apparente fittizia;

$q$  = numero delle fasi;

$I_s$  = valore efficace della corrente in ogni interruttore;

$V_s$  = picco della tensione attraverso ogni interruttore.

Ora, sostituendo, nella 3.6, la corrente di picco  $\hat{i}_s$ , si ottiene la potenza apparente di picco [19]:

$$VA_p = 2q\hat{i}_sV_s \quad (3.7)$$

La 3.6 e la 3.7 sono riferite a potenze fittizie, rappresentano soltanto un indice della bontà dell'inverter, vengono anche chiamate potenze di dimensionamento, infatti  $V_s$  è la tensione ai capi dell'interruttore quando non conduce, mentre la  $I_s$  o la  $\hat{i}_s$  sono le correnti che lo attraversano in fase di conduzione.

Nel normale funzionamento, il picco della tensione sugli switch è uguale alla tensione del lato in continua dell'inverter, in quanto ogni interruttore (in commutazione) deve poterla bloccare, anche se bisognerebbe tenere conto delle sovratensioni dovute alle induttanze che fanno ricircolare corrente attraverso i diodi. Essendo, però, gli effetti dovuti al fenomeno degli spike non piccoli ma parassiti e non fondamentali per il controllo del motore, verranno trascurati. Inoltre si considera una situazione del tipo di figura 3.5, in cui la 1° armonica delle tensioni di fase picco-picco risulta maggiore della tensione lato in continua dell'inverter  $V$ . Ciò può essere possibile utilizzando una

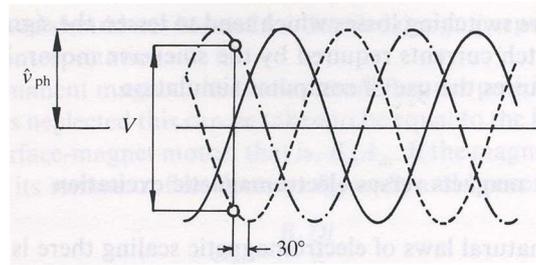


Figura 3.5: Tensioni trifase derivanti dalla tensione lato continuo dell'inverter.

PWM a sottoscillazione sinusoidale con l'aggiunta di una terza armonica alla modulante o con PWM vettoriale in sovramodulazione, comunque ottenendo un indice di modulazione  $m = 2/\sqrt{3}$  ed ipotizzando che la PWM sia realizzata con sufficiente frequenza di portante. Ricordando che per una PWM a sottoscillazione sinusoidale vale l'equazione:

$$\hat{v}_{ph} = m \frac{V}{2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V}{2} \quad (3.8)$$

si esplicita la  $V$  in funzione del valore efficace della tensione di fase  $V_{ph}$ , ottenendo:

$$V = \sqrt{3}\hat{v}_{ph} = \sqrt{6}V_{ph} \quad (3.9)$$

Ora, per il BLAC, ipotizzando che le correnti siano sinusoidali e che ogni interruttore conduca per  $180^\circ$  (metà periodo) e per i restanti  $180^\circ$  sia spento, il valore efficace della corrente sugli interruttori è  $1/\sqrt{2}$  volte il valore efficace della corrente di fase. Per dimostrare ciò, basta pensare alla definizione di valore efficace, per la corrente di fase si può scrivere  $I = \sqrt{\frac{1}{T} 2 \int_0^{T/2} i^2(t) dt}$ . La corrente sugli interruttori, come detto in precedenza è a singola semionda, quindi si può scrivere  $I_s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} i^2(t) dt} = \frac{I}{\sqrt{2}}$ . I picchi delle correnti di fase e sugli interruttori sono, invece, uguali [19]. Sostituendo la 3.9 e le espressioni delle correnti nella 3.6 e nella 3.7 si ottengono, per il

BLAC:

$$VA_e = 6V \frac{I}{\sqrt{2}} \quad (3.10a)$$

$$VA_p = 6V \hat{i} \quad (3.10b)$$

$$P_u = 3V_{ph}I = 3 \frac{V}{\sqrt{6}} I \quad (3.10c)$$

in cui  $P_u$  rappresenta la potenza in uscita dal convertitore. Dalle 3.10, si ricava  $VA_e/P_u$  è di 3,5 e  $VA_p/P_u$  è 6,9 [19]. Per il BLDC le corrispondenti equazioni sono:

$$VA_e = 6Vi \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (3.11a)$$

$$VA_p = 6Vi \quad (3.11b)$$

$$P_u = Vi \quad (3.11c)$$

Anche in questo caso, dalle 3.11, si ricava che il rapporto  $VA_e/P_u$  è di 4,9 ed il rapporto  $VA_p/P_u$  è 6 [19].

Dai risultati ottenuti si nota che il BLDC ha un vantaggio in condizioni di elevata corrente di picco, mentre il motore sinusoidale gestisce meglio il valore efficace della corrente, come era logico aspettarsi (conducono tre interruttori dell'inverter contemporaneamente e non due come nel BLDC) [19].

Naturalmente sintetizzando si intuisce che il motore sinusoidale, a parità di potenza lavora con correnti di minor ampiezza sugli switch e dà minor ondulazione di corrente nel lato in continua. Ciò è logico ragionando in termini di egual potenza, per la stessa tensione lato in continua si ha che per il BLDC  $P = 2 \frac{V}{2} i$ , mentre per il BLAC si ha  $P = 3V_{ph}I = 3 \frac{V}{\sqrt{6}} I$ , facendo il rapporto tra le due potenze si ottiene  $\frac{i}{I} = \frac{3}{\sqrt{6}} = 1,22$ , da cui si deduce che la corrente nel BLDC è 1,22 volte maggiore del valore efficace della corrente utilizzata nel BLAC, per il dimensionamento degli interruttori di potenza dell'inverter. Passando ai valori massimi per entrambe le equazioni e rifacendo il rapporto, si ottiene  $\frac{i}{i_s} = \frac{3}{2\sqrt{3}} = 0,87$ , in questo caso è la corrente di picco nel BLAC ad essere maggiore della corrente nel BLDC. Un inverter viene dimensionato per la corrente efficace, se pilotato con onda sinusoidale, con la corrente di picco se alimenta un BLDC. Per questo motivo si riesce ad ottenere un inverter più economico nel caso di un BLAC, in quanto gli switch si possono dimensionare per una corrente minore.

Oltre a ciò, il BLDC ha il problema dell'ondulazione di coppia che può provocare vibrazioni (sicuramente minori del motore a riluttanza commutata).

## Conclusione.

Per concludere, dopo aver fatto una panoramica sui vari tipi di motori e relativi controlli, si è giunti alla conclusione che, per un azionamento su una piccola imbarcazione da diporto, sia meglio utilizzare un motore sinusoidale a magneti permanenti, che possiede anche il vantaggio di poter funzionare da asincrono se i magneti permanenti, per qualche motivo, si smagnetizzassero. Il sistema si prevede sia su 1 kW e con tensione attorno 60-80V.



# Capitolo 4

## I componenti utilizzati nel sistema di propulsione.

### Introduzione.

In una prima fase di valutazione sulla realizzazione sperimentale del sistema di propulsione per una piccola imbarcazione si era proposta l'idea di costruire anche l'azionamento elettrico e la parte meccanica di propulsione. A causa di difficoltà di trovare un costruttore per la parte meccanica è stato deciso di ricorrere, per quanto possibile, a componentistica commerciale. In questo capitolo verranno analizzati tutti i componenti commerciali usati per questo lavoro, tralasciando ovviamente il convertitore che verrà presentato, nei minimi dettagli, nei prossimi capitoli.

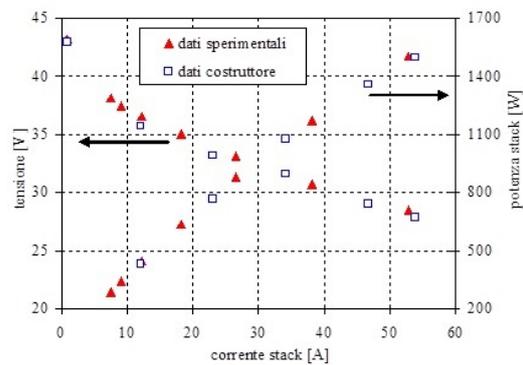
### 4.1 Cella a combustibile.

La cella a combustibile utilizzata è una PEM gentilmente concessa dal Professor Taccani del Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Trieste (Figura 4.1(a)), ha potenza nominale di 1,2KW, una corrente di 48A a 25V.

In Figura 4.1(b), viene riportato il grafico della caratteristica tensione-corrente e quello della



(a) Esempio di cella a combustibile PEM.



(b) Caratteristica tensione-corrente e potenza-corrente della cella usata.

Figura 4.1: Cella e relativa caratteristica.

caratteristica potenza-corrente della cella in oggetto.

## 4.2 Accumulatori.

Si era orientati ad utilizzare accumulatori al litio, ma per il loro costo e per le problematiche relative alla gestione della corrente (portano ad un aumento della temperatura) si è deciso di scegliere i più tradizionali accumulatori al piombo per avviamento di automobili.

Questi ultimi possiedono una tecnologia molto più consolidata delle batterie al litio e sopportano



Figura 4.2: Batterie al piombo utilizzate.

correnti di spunto più elevate, molto utili per effettuare sperimentazioni.

Gli accumulatori hanno tensione nominale di 12V e possono erogare 44Ah, arrivano fino ad un centinaio di Ampere come corrente di spunto. Si è scelto di usare quattro accumulatori, in modo da ottenere 48 o 24V collegandoli opportunamente.

## 4.3 Fuoribordo elettrico.

Fuoribordo elettrici (Figura 4.3(a)), equipaggiati con motore a magneti permanenti, non sono diffusi commercialmente, in quanto quasi tutte le applicazioni montano motori in corrente continua. Si è riusciti a trovare un fuoribordo da una ditta Statunitense, la MotorSport. Ha una tensione di alimentazione nominale di 48V ed una potenza di 4Hp, circa 3KW, anche se può arrivare ad una potenza massima di 4,8KW, ed una corrente massima di 100A. Il fuoribordo monta un motore brushless a magneti permanenti (Figura 4.3(b)) a flusso assiale.

### 4.3.1 Determinazione dei parametri del motore a magneti permanenti.

Per poter effettuare le simulazioni è stato necessario determinare i parametri interni, perciò si sono eseguite una serie di prove dalle quali si sono calcolati i valori dei parametri con una sufficiente approssimazione:

$R_s$ : resistenza di una fase di statore;

$p$ : numero di coppie polari;



(a) Vista esterna del fuoribordo.



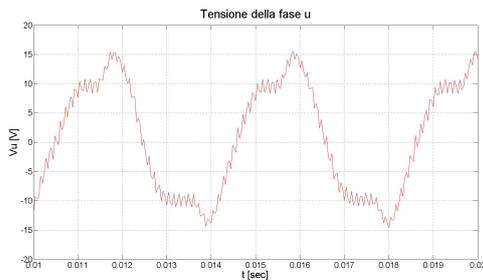
(b) Vista interna del fuoribordo.

Figura 4.3: Fuoribordo elettrico utilizzato.

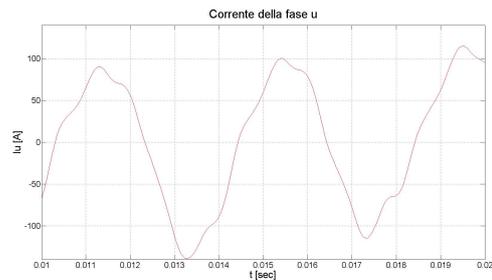
$L_q$ : Induttanza della macchina nel sistema di riferimento d-q, lungo l'asse q;  
 $L_d$ : Induttanza della macchina nel sistema di riferimento d-q, lungo l'asse d;  
 $\lambda_m$ : flusso di magnetizzazione prodotto dai magneti permanenti sul rotore;  
 $B$ : coefficiente di attrito viscoso.

### Prova a vuoto.

Per eseguire la prova a vuoto si è posizionato il fuoribordo con la parte inferiore immersa in acqua, questo per evitare danni alla pompa di ricircolo dell'acqua, all'interno degli scambiatori, per il raffreddamento del motore e del convertitore. Naturalmente l'elica è stata rimossa dal suo alloggiamento e quindi l'asse inferiore è a tutti gli effetti libero di muoversi, quindi senza carico. Si è alimentato il fuoribordo con un alimentatore e si sono misurate tensioni e correnti a varie velocità. Inoltre si sono misurati i segnali provenienti dalle sonde ad effetto hall, unici trasduttori di posizione presenti, e soprattutto si è misurata la velocità media del motore. Le Figure 4.4



(a) Misura della tensione  $V_u$ .



(b) Misura della corrente  $I_u$ .

Figura 4.4: Misure eseguite sul fuoribordo elettrico.

mostrano l'andamento temporale, rispettivamente, della tensione di statore e della corrente di una fase del motore (identificata come fase u). L'analisi delle misure conduce ad una frequenza delle grandezze elettriche di 250Hz, mentre la misura della velocità del motore eseguita con un tachimetro ha fornito 3680giri/min.

Il numero di coppie polari è:

$$p = \frac{60f}{v_m} = \frac{60 * 250}{3680} = 4,076 \quad (4.1)$$

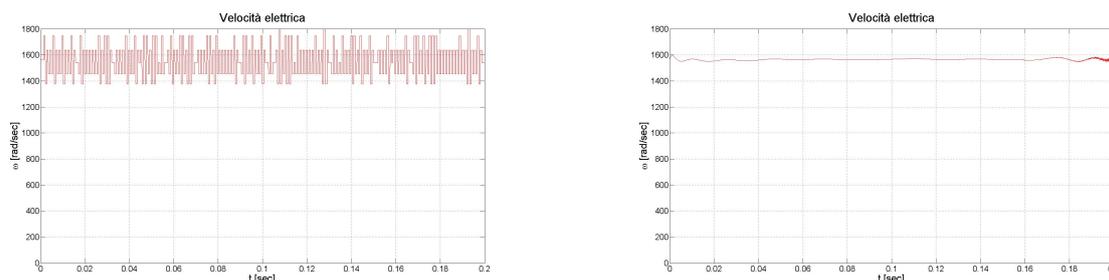
La determinazione della frequenza elettrica può essere condotta in alternativa anche analizzando i segnali provenienti dalle tre sonde Hall. Questi segnali hanno una forma del tipo onda rettan-

golare con un'escursione tra 0 e 12V e la loro frequenza è coincidente con quella delle grandezze elettriche. Essi sono sfasati tra loro di  $120^\circ$  e servono per rilevare la posizione del rotore, per sincronizzare l'alimentazione delle fasi. Se si sommano i tre segnali si ottiene un segnale che va da 12 a 24V con una frequenza tripla rispetto ai segnali componenti. Il semiperiodo di quest'ultimo segnale corrisponde ad un angolo di  $60^\circ$  elettrici, ossia  $\pi/3$ rad. Contando il numero  $n$  di periodi di campionamento tra i fronti di salita e discesa si può calcolare la velocità in rad/sec con la formula:

$$\omega_e = \frac{\pi}{3nT_c} \quad (4.2)$$

dove  $T_c$  è il periodo di campionamento.

In Figura 4.5 vengono riportati i grafici rispettivamente della velocità elettrica data dalla 4.2 e



(a) Andamento della velocità elettrica stimata. (b) Andamento della velocità elettrica filtrata.

Figura 4.5: Velocità elettrica del motore per la prova a vuoto.

della stessa ottenuta tramite un filtro mediano.

Il valor medio della velocità risulta di  $1566 \text{ rad/sec} = 14954 \text{ giri/min}$ . Con questo risultato si ottiene:

$$p = \frac{v_e}{v_m} = \frac{14954}{3680} = 4,063 \quad (4.3)$$

che ovviamente coincide con la 4.1.

### Stima della resistenza di statore.

Per stimare la resistenza delle fasi di statore si è utilizzato il metodo Volt-Amperometrico. Con riferimento alla Figura 4.6, a causa della inaccessibilità del centro stella, la misura è fatta

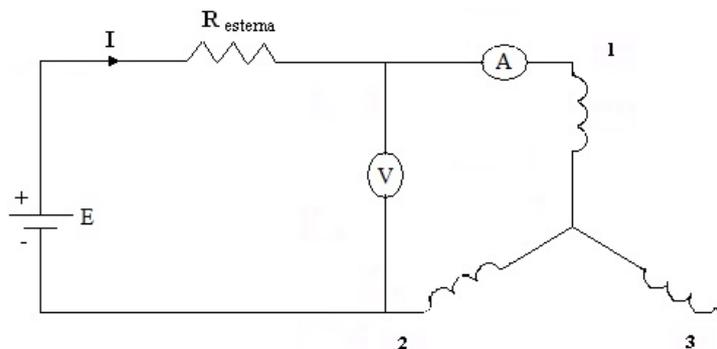


Figura 4.6: Schema di collegamento del circuito per la stima della resistenza.

con due fasi poste in serie. Per avere una maggiore sensibilità di misura si preferisce inserire una resistenza aggiuntiva esterna al circuito del motore.

Si sono eseguite più misure per ciascuna delle quali è stata calcolata la resistenza  $R_s$  con la:

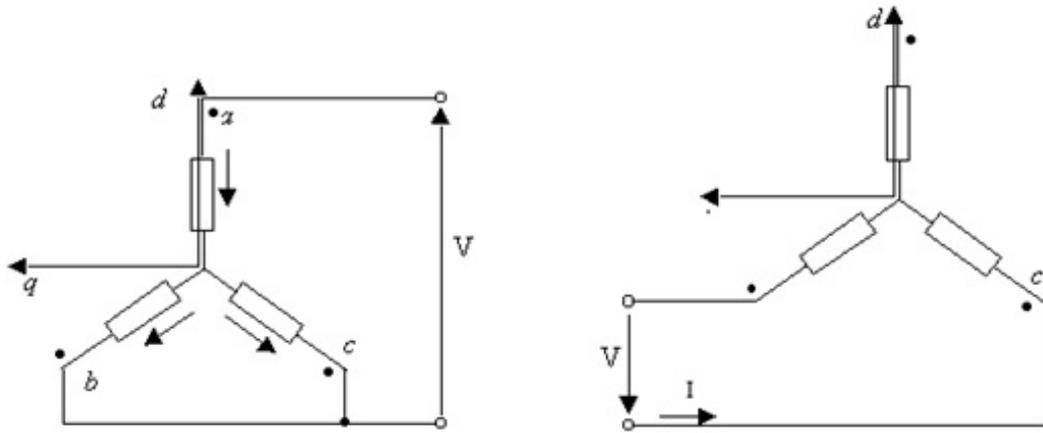
$$R_s = \frac{V}{2A} \quad (4.4)$$

E' stata quindi calcolata una media dei valori ottenuti, determinando un valore  $R_s = 58,15m\Omega$ .

### Stima delle induttanze di asse diretto ed asse in quadratura.

Essendo il motore a flusso assiale ed a magneti superficiali, le induttanze lungo l'asse d e lungo l'asse q sono uguali  $L_d = L_q$ . Comunque sono state stimate entrambe per verificare questa condizione.

Per ottenere le stime delle induttanze sono state eseguite delle prove con il rotore del motore bloccato ed alimentando le fasi 1 e 2 con un gradino di corrente. In queste condizioni il circuito si riduce ad un carico Hommico-induttivo, in cui il valore della resistenza è noto dalla prova precedente. L'andamento della corrente è ottenuto risolvendo l'equazione differenziale:



(a) Schema utilizzato per la stima dell'induttanza lungo l'asse d.

(b) Schema utilizzato per la stima dell'induttanza lungo l'asse q.

Figura 4.7: Schemi di connessione del motore per le misure per le stime delle induttanze.

$$v(t) = R_s i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (4.5)$$

Applicando una tensione a gradino ed ipotizzando le condizioni iniziali nulle, la soluzione della 4.5 dà:

$$i(t) = I \left( 1 - e^{-\frac{R_s}{L}t} \right) \quad (4.6)$$

in cui  $I$  è il valore della corrente a regime dato dal rapporto tra l'ampiezza del gradino  $V$  e la resistenza di statore ( $I = V/R_s$ ), mentre  $\frac{R_s}{L} = \tau$  è la costante di tempo elettrica del sistema. Misurando l'andamento della corrente con l'oscilloscopio, con la 4.6 si riesce a risalire al valore di  $L$ .

Per eseguire le misure bisogna prima disporre il rotore con l'asse d allineato con l'asse della fase a e per fare ciò, si alimenta il motore come da Figura 4.7(a) con tensione continua, il rotore tenderà autonomamente ad allinearsi correttamente, meglio comunque muovere leggermente l'alberino ed aiutarlo a raggiungere la posizione di equilibrio, in modo che gli effetti degli eventuali attriti vengano annullati. Una volta allineato il rotore si provvede a bloccarlo.

Anche per queste misure si è inserita una resistenza esterna per mantenere bassa la corrente, senza diminuire troppo la tensione di alimentazione, in quanto la resistenza degli avvolgimenti di statore è molto piccola. Essendo la  $R_{esterna}$  nota e di valore pari a  $3,10\Omega$ , la resistenza complessiva diventa  $R = R_s + R_{esterna} = 3,15\Omega$ .

La 4.6 può essere rappresentata con lo sviluppo in serie di Taylor:

$$i(t) = 1 - \frac{\left(\frac{R}{L}\right) I}{1!} t + \frac{\left(\frac{R}{L}\right)^2 I}{2!} t^2 - \frac{\left(\frac{R}{L}\right)^3 I}{3!} t^3 + \dots \quad (4.7)$$

Utilizzando il metodo dei minimi quadrati si possono calcolare i coefficienti della 4.7 a partire dai campioni della misura della corrente.

$$c1 = \frac{RI}{L} \Rightarrow L = \frac{RI}{c1} \quad (4.8)$$

Implementando tutta la procedura di calcolo in Matlab si ottengono le stime delle induttanze. I valori ottenuti sono  $L_d = L_q = 10^{-4}H$ .

### Stima dei parametri meccanici del sistema.

Restano da stimare il flusso dei magneti  $\lambda_m$ , il momento d'inerzia  $J$  ed in coefficiente di attrito  $B$  di tutto il sistema fuoribordo, comprensivo del motore elettrico e della trasmissione meccanica. Inizialmente è stato stimato il valore del momento d'inerzia  $J$  in base alle dimensioni geometriche degli alberi rotanti, note dal data sheet del fuoribordo. Si è poi costruito un filtro di Kalman per la stima del coefficiente di attrito. Gli ingressi al filtro sono le misure di tensione e corrente effettuate nelle prove a vuoto e portate nel sistema di riferimento d-q, tramite l'angolo di rotore a sua volta stimato integrando la velocità riportata in Figura 4.5(b).

Si riportano le equazioni interne del motore BLAC, espresse in un sistema di riferimento solidale con il rotore:

$$v_d = R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_e \lambda_q \quad (4.9a)$$

$$v_q = R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_e \lambda_d \quad (4.9b)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_m \quad (4.9c)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (4.9d)$$

$$C = \frac{3}{2} p (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (4.9e)$$

$$C - C_r = J \frac{d\omega_m}{dt} + \omega_m B \quad (4.9f)$$

in cui  $C_r$  è la coppia resistente all'asse (nel nostro caso è nulla),  $\omega_e$  ed  $\omega_m$  sono rispettivamente la velocità elettrica e la velocità meccanica del motore, le due sono legate dal numero di coppie polari  $\omega_e = p\omega_m$ .

Sostituendo le 4.9c e 4.9d rispettivamente nelle 4.9a e 4.9b e la 4.9e nella 4.9f, ponendo  $C_r = 0$ , si ottiene:

$$v_d = R_s i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_e L i_q \quad (4.10a)$$

$$v_q = R_s i_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_e L i_d + \omega_e \lambda_m \quad (4.10b)$$

$$\frac{3}{2} p \lambda_m i_q = J \frac{d\omega_m}{dt} + \omega_m B \quad (4.10c)$$

Dalle 4.10a, 4.10b e 4.10c e tenendo conto della relazione che lega le velocità elettrica e meccanica, si ottiene il sistema differenziale non lineare (esposto in forma normale):

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L}i_d + \omega_e i_q + \frac{v_d}{L} \quad (4.11a)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L}i_q - \omega_e i_d - \frac{\omega_e}{L}\lambda_m + \frac{v_q}{L} \quad (4.11b)$$

$$\frac{d\omega_e}{dt} = \frac{3p^2}{2J}\lambda_m i_q - \frac{B}{J}\omega_e \quad (4.11c)$$

Essendo il sistema differenziale non lineare, si estende il vettore dello stato con le variabili aggiuntive che compaiono nelle equazioni, ottenendo il Filtro di Kalman Estesio.

Il Filtro di Kalman è un algoritmo utilizzato per il filtraggio dei dati costituito sulla base di una media pesata tra il prossimo valore predetto ed il prossimo valore stimato. Questo Filtro è spesso utilizzato per ottenere una migliore valutazione di una variabile, ottenuta dalla lettura di più sensori, ognuno caratterizzato da un rumore di misura avente caratteristiche differenti nel tempo (e quindi nella frequenza).

Per costruire un Filtro di Kalman sono necessari:

- Una serie di misure sul sistema da stimare;
- La conoscenza di un modello matematico lineare descrittivo del sistema;
- Il modello statistico dei rumori sulle misure.

Per l'implementazione del Filtro di Kalman Estesio, di un sistema digitale, è necessario rappresentarlo con un modello discretizzato e lineare.

Si supponga di avere il modello matematico di un sistema nella forma:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), w(t)) \quad (4.12a)$$

$$y(t) = h(x(t), v(t)) \quad (4.12b)$$

in cui:

$x(t)$  = vettore di stato, in genere è composto dalle variabili da stimare e, come si vedrà in seguito, dalle stime delle variabili misurate;

$u(t)$  = vettore degli ingressi: gli ingressi di un sistema rappresentano le fonti di energia affluenti nel processo, che vanno a modificare l'evoluzione dello stato in maniera più o meno significativa;

$y(t)$  = vettore delle misure: lo stato di un sistema è, a volte, direttamente misurabile, a volte deve essere misurato attraverso grandezze equivalenti, o il cui valore rappresenta la combinazione di una o più variabili di stato, possibilmente corrotto da errori di misura o da imprecisione nella modellizzazione matematica del sistema lineare;

$w(t)$  = disturbo sullo stato: rappresenta gli ingressi che agiscono in maniera non controllabile sullo stato del sistema;

$v(t)$  = rumore sulle misure: rumore di lettura presente nel vettore delle misure rispetto al valore che avrebbero in conseguenza al valore attuale dello stato e delle variabili di ingresso;

$f(\dots)$  = funzione dello stato, non è necessariamente di tipo lineare, ma stabile;

$h(\dots)$  = funzione delle uscite, come per la  $f(\dots)$ , non è richiesto sia lineare, ma deve essere stabile.

La 4.12a è detta "Evoluzione dello stato", mentre la 4.12b è detta "Evoluzione della misura".

Per l'implementazione è necessario discretizzare il modello matematico. Utilizzando il metodo di discretizzazione in avanti, le 4.12a e 4.12b si discretizzano nelle:

$$x(k+1) = A_d(x(k)) \cdot x(k) + B_d(x(k)) \cdot u(k) + w(k) \quad (4.13a)$$

$$y(k) = C_d(x(k)) \cdot x(k) + v(k) \quad (4.13b)$$

in cui:

$A_d(x(k))$  = matrice di stato: matrice descrittiva dell'evoluzione libera della variabile di stato rispetto al suo valore attuale;

$B_d(x(k))$  = matrice degli ingressi: matrice descrittiva della forzante;

$C_d(x(k))$  = matrice delle uscite: matrice descrittiva del valore assunto dalle variabili misurate in funzione del valore attuale delle variabili di stato.

Se il sistema non è lineare lo si linearizza intorno ad un punto di lavoro  $\hat{x}$ :

$$\tilde{A}_{k+1} = \frac{\partial}{\partial x} [A_d(x(k)) x(k)]_{x=\hat{x}(k)} \quad (4.14)$$

Note le matrici ed i vettori, il Filtro di Kalman si sviluppa secondo le seguenti equazioni (ponendo  $\hat{x}_0 = \bar{x}_0$ , in cui  $\bar{x}_0$  è il vettore delle variabili di partenza, per il primo loop):

Predizione dello stato:

$$x(k+1) = A_d(\hat{x}(k)) \cdot \hat{x}(k) + B_d \cdot u(k) \quad (4.15a)$$

Varianza dell'errore:

$$P(k+1) = \tilde{A}_{k+1} \cdot P_0(k) \cdot \tilde{A}_{k+1}^T + Q_N \quad (4.15b)$$

Aggiornamento della matrice di correzione dello stato:

$$K(k+1) = P(k+1) \cdot C_d^T [C_d \cdot P(k+1) \cdot C_d^T + R_N]^{-1} \quad (4.15c)$$

Correzione dello stato:

$$\hat{x}(k+1) = x(k+1) + K(k+1)[y(k+1) - C_d \cdot x(k+1)] \quad (4.15d)$$

Aggiornamento della varianza dell'errore:

$$\hat{P}(k+1) = P(k+1) - K(k+1) \cdot C_d \cdot P(k+1) \quad (4.15e)$$

in cui:

$x(k) = \{i_d(k), i_q(k), \omega_e(k), \lambda_m(k), B(k)\}^T$  è il vettore di stato;

$u(k) = \{v_d(k), v_q(k)\}^T$  è il vettore degli ingressi;

$y(k) = \{i_d(k), i_q(k), \omega_e(k)\}^T$  è il vettore delle uscite;

$C_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$  è la matrice delle uscite;

$A_d = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s T_c}{L} & \omega_e T_c & 0 & 0 & 0 \\ \omega_e T_c & 1 - \frac{R_s T_c}{L} & -\frac{\lambda_m T_c}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} \frac{p^2}{J} \lambda_m T_c & 1 - \frac{B T_c}{J} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  è la matrice di stato;

$B_d = \begin{bmatrix} \frac{T_c}{L} & 0 \\ 0 & \frac{T_c}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  è la matrice degli ingressi;

$$Q_N = \begin{bmatrix} V_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_{13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & V_{15} \end{bmatrix} \text{ è la matrice di covarianza del disturbo sullo stato: rap-}$$

presenta la variabilità statistica del vettore dei disturbi sullo stato, ovvero la potenza del disturbo introdotto nel sistema, che devia l'andamento delle variabili di stato rispetto a quello prevedibile dalla conoscenza del vettore degli ingressi e dalla legge lineare che ne governa l'evoluzione;

$R_N = \begin{bmatrix} V_{21} & 0 \\ 0 & V_{22} \end{bmatrix}$  è la matrice di varianza del rumore sulle misure: rappresenta la variabilità statistica del vettore dei disturbi di misura e rappresenta la potenza del disturbo sulla misura, introdotta su ciascuna delle misure accessibili;

$P, P_0$  è la matrice di varianza dell'errore sullo stato: rappresenta la variabilità dell'errore sulla stima dello stato conseguente ai due fattori di disturbo, errore di misura e disturbo dello stato (la matrice  $P_0$  va definita in anticipo);

$K$  è la matrice di correzione della stima: indica il livello di fiducia assegnata alla misura, rispetto alla fiducia assegnata alla stima dello stato, in base al valore precedente ed al modello matematico che ne rappresenta l'evoluzione. Tanto maggiore è il valore di  $K$ , tanto minor fiducia merita la stima basata sul modello, rispetto alla misura riportata.

L'esecuzione dell'algoritmo conduce alla determinazione dei valori  $B = 0,01685 \text{ Kg m}^2/\text{s}$  e  $\lambda_m = 0,01175 \text{ Wb}$ .



## Capitolo 5

# Simulazioni in ambiente congiunto Matlab-Psim.

### Introduzione.

Prima di costruire il convertitore di interfaccia tra le celle a combustibile ed il DC-link, per verificarne il funzionamento ed affinarne il suo progetto, si è ritenuto opportuno realizzare un programma di simulazione. Inoltre si è simulata una tipologia di convertitore diversa da quello realizzato.

In questo capitolo verranno, quindi, descritti i simulatori e presentate le simulazioni dei due convertitori: il primo a tre vie con il quale si interfaccia sia la batteria di accumulatori sia la cella a combustibile con il DC-link e l'altro con il singolo convertitore (il quale è stato realizzato sperimentalmente) in modo da riuscire a confrontarne il funzionamento.

### 5.1 Convertitore a tre vie.

#### 5.1.1 Implementazione della simulazione.

Per risolvere il problema della variazione di tensione in uscita dalla cella quando da vuoto si passa a pieno carico e per riuscire a gestire in modo efficiente i flussi di energia mantenendo la tensione sul DC-link costante, bisogna inserire due convertitori DC-DC o, in alternativa solo uno a "tre vie". Un'unico convertitore a tre vie ha il pregio di risultare meno costoso dei due convertitori.

E' costituito da un trasformatore a tre avvolgimenti (Figura 5.1), il primo ed il terzo avvolgimento sono collegati tramite un ponte ad H bifase, rispettivamente alla cella a combustibile ed alla batteria di accumulatori. Il secondo avvolgimento è collegato tramite un ponte raddrizzatore al carico, simulato da un inverter con motore a magneti permanenti. Si inserisce un diodo aggiuntivo in uscita alla cella, per evitare in qualunque situazione che possa circolare corrente inversa nella cella, pena la sua distruzione.

In ingresso al ponte ad H che alimenta il primo avvolgimento si è inserito il modello circuitale di una cella a combustibile, costituito da un generatore a 46V e da due resistenze in serie, una con in parallelo un condensatore.

Il terzo avvolgimento, alimenta o viene alimentato dagli accumulatori (a seconda del verso del flusso di energia), questi ultimi sono simulati da un generatore da 26V con in serie una resistenza di valore pari alla resistenza interna dichiarata dai costruttori degli accumulatori al piombo usati per le sperimentazioni. Il generatore viene posto a 26V perchè in pratica si inseriscono due accumulatori da 12V nominali in serie, ognuno dei quali fornisce a vuoto (se carico) 13V, circa 1V in più del valore nominale dichiarato dal costruttore.

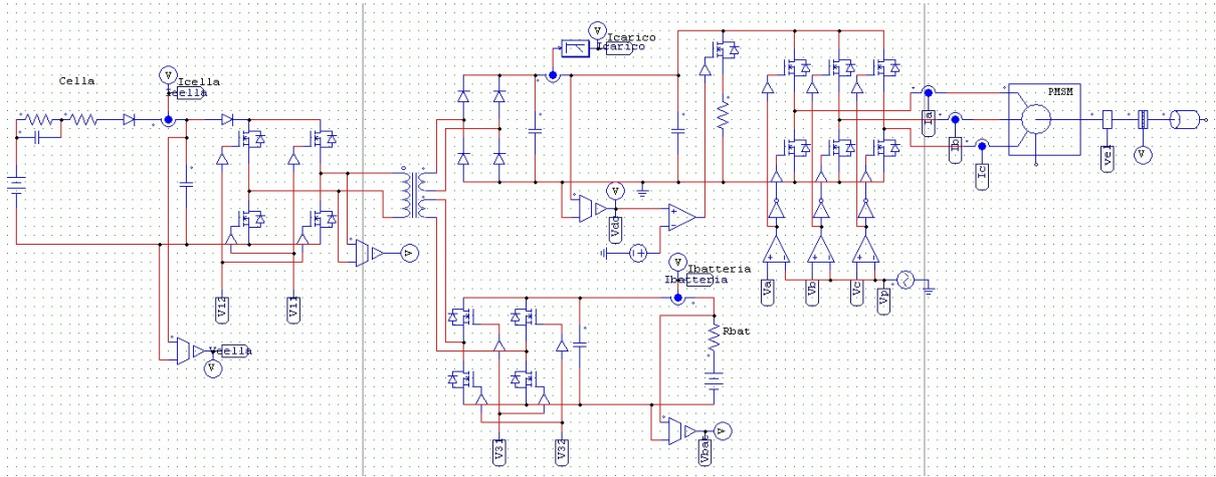


Figura 5.1: Schema in PSim del convertitore a tre vie.

Naturalmente il ponte ad H sul primo avvolgimento verrà fatto lavorare in modo unidirezionale, mentre quello sul terzo avvolgimento in modo bidirezionale, comunque entrambi usano lo stesso sistema di controllo dei mosfet. Viene usata una portante a 16KHz, ad onda a dente di sega asimmetrica, la quale viene confrontata con un riferimento che proviene dai regolatori. Si ottiene

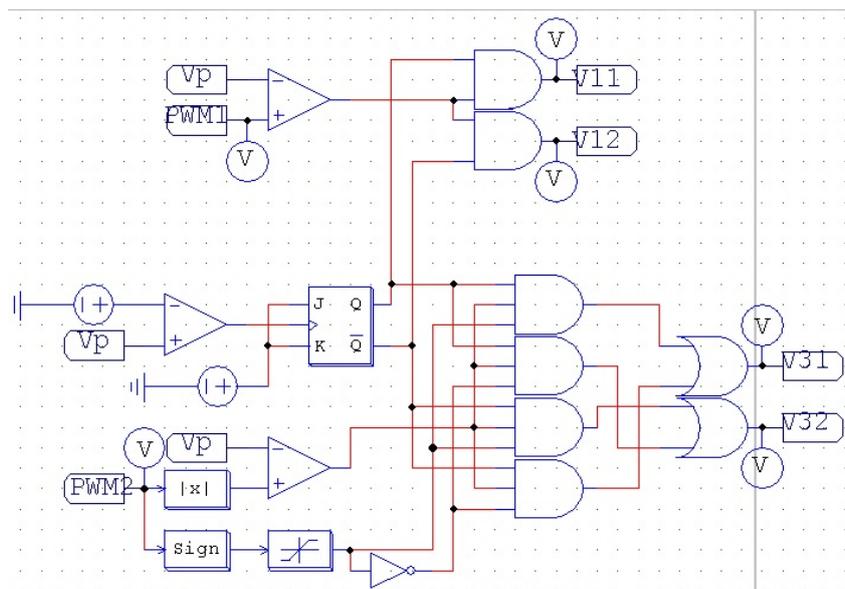
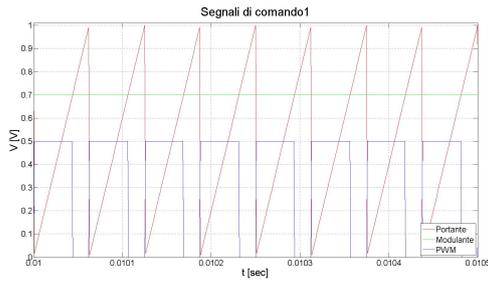
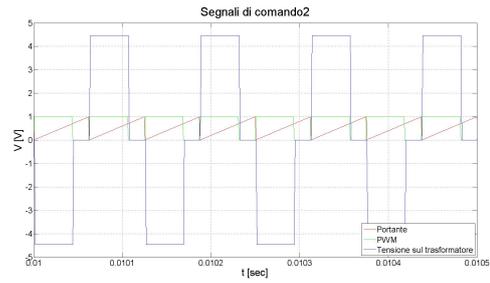


Figura 5.2: Controllo e generazione dei segnali per i mosfet per i ponti ad H bifase.

un treno di onde rettangolari a duty-cycle variabile che pilotano una volta il mosfet alto del ramo 1 e il mosfet basso del secondo ramo ed in seguito gli altri due, ottenendo così una tensione di alimentazione del trasformatore ad onda quadra a valor medio nullo con duty-cycle variabile. Il circuito per la generazione dei segnali è riportato in Figura 5.2, per invertire la corrente sull'avvolgimento del trasformatore viene usato un flip-flop JK, ogni volta che la portante raggiunge il valore 0,95, si genera un impulso che fa invertire il valore delle uscite del flip-flop, le quali comandano gli interruttori opportuni. In Figura 5.3(a) vengono riportati i segnali della portante e del riferimento che vengono confrontati per generare il segnale PWM, una sequenza di onde quadre a duty-cycle variabile. Il segnale "PWM" in Figura 5.3(a) ed il segnale "Tensione sul trasformatore" in Figura 5.3(b) sono stati riscaldati per poterli confrontare con gli altri presenti



(a) Generazione della PWM.



(b) Generazioni segnali per i mosfet.

Figura 5.3: Segnali di comando.

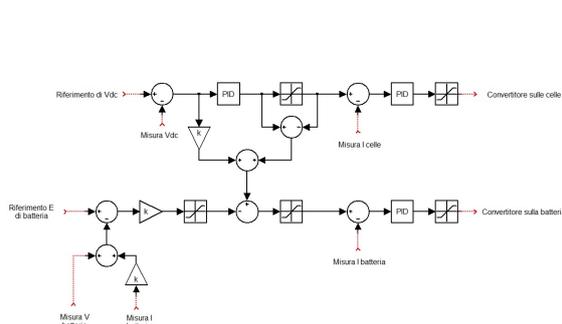
nella stessa Figura.

In Figura 5.2 è visibile anche il circuito per la generazione dei segnali di comando per i mosfet del ponte lato accumulatori, esso è sostanzialmente uguale a quello lato celle a combustibile, salvo la circuiteria logica (porte and) necessaria per invertire l'accensione dei mosfet in caso si desideri recuperare energia ed immagazzinarla negli accumulatori. In questo caso è il segno della modulante che determina il verso della corrente degli accumulatori.

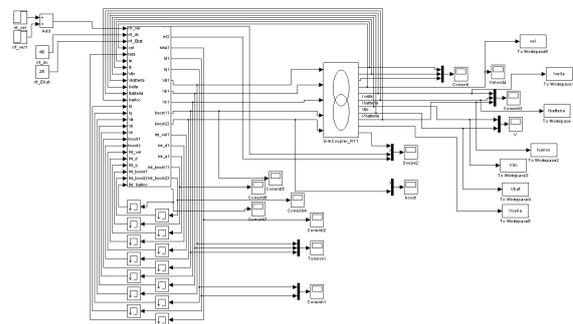
In Figura 5.1 si nota l'inserimento di una resistenza pilotata da un mosfet, che ha il compito di riportare la tensione a 48,5V nel caso in cui il motore non sia alimentato o assorba una corrente bassissima, è un funzionamento particolare critico per il convertitore, in quanto il controllo fa erogare al convertitore la corrente per caricare i condensatori sul DC-link, ma se non c'è corrente richiesta dal carico, la tensione cresce in fretta anche oltre il valore di riferimento. Per far riportare le modulanti a zero, il controllo impiega un certo tempo, che anche se piccolo è sufficiente per portare la tensione  $V_{dc}$  anche a valori fino ai 52V. La resistenza dissipa l'energia in eccesso riportando la tensione a valori corretti.

Le modulanti sono il risultato di un controllo che deve rispettare alcune specifiche: la cella a combustibile è la fonte energetica primaria e come tale deve sopperire all'intero carico finché quest'ultimo non supera la capacità della cella stessa. Le batterie devono intervenire per veloci variazioni di carico e, quando il carico supera la capacità di corrente della cella a combustibile, devono sopperire alla differenza di corrente, in modo da avere tensione costante sul DC-link. Gli accumulatori devono già venir ricaricate quando la cella non è a pieno carico.

In Figura 5.4(a) si può vedere lo schema a blocchi del controllo, ogni ponte ha il suo controllore



(a) Schema di principio del controllo.



(b) Implementazione del controllo.

Figura 5.4: Controllo per il convertitore a tre vie.

di corrente interno, pilotati da un loop di tensione più esterno. L'uscita del loop di tensione è la corrente che le fonti energetiche devono dare al carico. Questa corrente normalmente deve essere fornita interamente dalla cella a combustibile, quando quest'ultima arriva a pieno carico, la com-

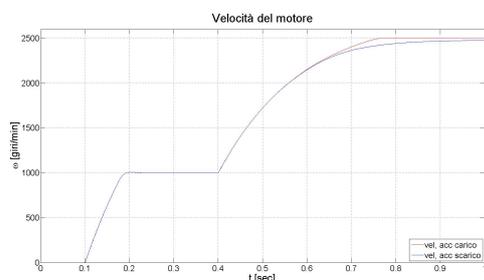
ponente aggiuntiva della corrente deve essere fornita dall'accumulatore comandato dal segnale proveniente dalla differenza tra l'ingresso e l'uscita del saturatore. Naturalmente la batteria deve aiutare la cella nelle veloci variazioni di carico e questo viene garantito da una componente aggiuntiva sul riferimento di batteria data da un semplice controllo proporzionale. La ricarica dell'accumulatore viene garantita da un controllore proporzionale al cui ingresso arriva la differenza tra la  $E$  (tensione a vuoto) di riferimento e la  $E$  stimata attraverso la tensione ai capi della batteria e la corrente che la attraversa (la  $R$  è nota). Quando l'accumulatore è scarico e la cella a combustibile è a pieno carico l'accumulatore non potrà avere una risposta rapida alle variazioni veloci come nel caso di accumulatore carico.

L'implementazione di questo controllo viene effettuata tramite funzione Matlab inserita nell'apposito blocco in ambiente Simulink (Figura 5.4(b)). Il sistema in ambiente PSim viene simulato dal blocchetto "SimCoupler\_R11", opportunamente pilotato dalla funzione Matlab che redige il controllo. Con questa procedura si riesce a simulare anche il funzionamento del DSP, in quanto la funzione Matlab viene richiamata ogni periodo di campionamento della portante.

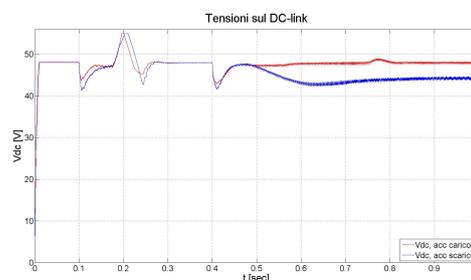
### 5.1.2 Risultati delle simulazioni.

Nelle simulazioni si comanda il sistema con due gradini del riferimento, il primo da 1000 giri/min a 0,1 sec, in modo che possa assorbire sul DC-link una corrente di circa 8A (carica soltanto la cella) ed il secondo da 2500 giri/min a 0,4 sec, assorbe una corrente di circa 50A (carica completamente la cella ed anche un po' l'accumulatore). Naturalmente si è fatto in modo che la coppia di carico del motore dipenda dalla velocità, per simulare la presenza dell'elica nell'acqua. Se la tensione del DC-link è circa 48V ed il DC-link assorbe 50A, il motore può tranquillamente fornire la coppia richiesta, ma se gli accumulatori sono scarichi, entrambi i controlli dei due ponti saturano e non riescono a fornire, in queste condizioni di carico, la tensione e la corrente richieste. La velocità di riferimento logicamente non sarà raggiunta.

In Figura 5.5(a) vengono presentati gli andamenti delle velocità con accumulatore carico e con



(a) Andamento delle velocità.



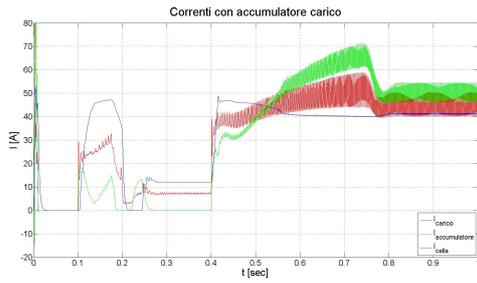
(b) Andamenti della tensione sul DC-link.

Figura 5.5: Andamenti di velocità e tensioni con accumulatore carico e scarico.

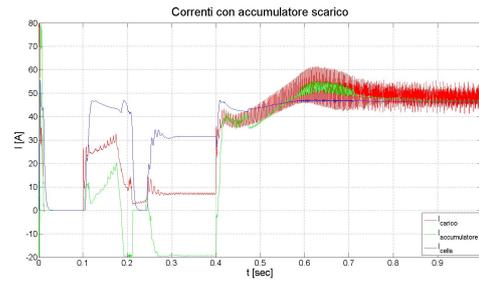
accumulatore scarico. Si nota che con accumulatore carico i riferimenti vengono raggiunti senza problemi, mentre con accumulatore scarico non si riesce ad arrivare ai 2500 giri/min, come ci si aspettava.

In Figura 5.5(b), invece vengono mostrati gli andamenti della tensione sul DC-link nel due casi, come si può vedere nel caso di accumulatore scarico non si riesce a mantenere i 48V, questo spiega perchè non si riesca a raggiungere il secondo riferimento. Altro aspetto importante è che a parità di controllo la velocità di risposta del sistema alle perturbazioni risulta più lenta, se l'accumulatore è scarico non riuscirà a fornire energia sufficiente per mantenere la dinamica richiesta. Analizzando l'andamento comune di entrambi i casi, si notano due picchi che superano la tensione di 48V.

Le correnti misurate per il controllo dei flussi di energia non hanno lo stesso riferimento, in



(a) Andamento delle correnti con accumulatore carico.



(b) Andamenti delle correnti con accumulatore scarico.

Figura 5.6: Andamenti delle correnti sul carico, sull'accumulatore e sulla cella per il convertitore a tre vie.

quanto, la corrente sul carico è misurata sul DC-link, quella sulla cella a combustibile e sull'accumulatore subito all'uscita. Tutte e tre sono legate l'una all'altra dal rapporto spire.

In Figura 5.6 si possono vedere gli andamenti delle correnti, sull'accumulatore, sulla cella e sul carico, per i due casi di accumulatore carico e scarico. Si nota, in entrambi i casi, che l'accumulatore interviene per le brusche variazioni di carico, mentre la cella, più lenta, copre il carico nei limiti del possibile. Per il secondo riferimento di velocità, a regime la cella non riesce a coprire tutto il carico e quindi l'accumulatore deve fornire la corrente mancante.

Le Figure 5.6(a) e 5.6(b) corrispondono rispettivamente ad accumulatore carico e scarico, nel primo caso la cella non ricarica l'accumulatore, mentre nel secondo caso si può notare che, passati i transitori, se la cella ha sufficiente autonomia, ricarica la batteria. Naturalmente la corrente di carica può essere regolata, in questo caso è stata saturata a 20A, in Figura 5.6(b) si nota che è leggermente minore (parte negativa della corrente sull'accumulatore).

### 5.1.3 Considerazioni sul convertitore a tre vie.

Si è implementato un convertitore DC-DC a tre vie per poter collegare una cella a combustibile, un'accumulatore ed un carico costituito da un inverter che alimenta un motore BLAC. Dopo aver eseguito ed analizzato le simulazioni si è arrivati a delle interessanti considerazioni. Questa tipologia di convertitore offre il vantaggio di riuscire ad avere una tensione sul DC-link praticamente costante, se l'accumulatore è sufficientemente carico. Si è visto, infatti che per carichi elevati la cella a combustibile da sola non è sufficiente per garantire una tensione costante. C'è anche da tenere in considerazione il problema della sovratensione, nel caso in cui il carico non assorba o assorba poca corrente. Il vantaggio principale nell'uso di un convertitore con questa struttura, resta comunque la completa controllabilità di tutte le correnti sui singoli dispositivi, anche se per i livelli di potenza in gioco in questo sistema, questa caratteristica riveste un'importanza secondaria.

## 5.2 Convertitore singolo.

La simulazione di questa tipologia di convertitore è stata fatta anche in previsione della realizzazione pratica e quindi i risultati verranno utilizzati per affinare il progetto esecutivo.

### 5.2.1 Implementazione della simulazione.

Il convertitore (Figura 5.7), è costituito da tre rami in parallelo a loro volta comprendenti un semiponte con due mosfet ed un trasformatore con una presa centrale al primario, per riu-

scire ad ottenere una tensione a valor medio nullo e non saturare il trasformatore. I tre rami convergono in una stella costruita collegando opportunamente i secondari dei trasformatori. La

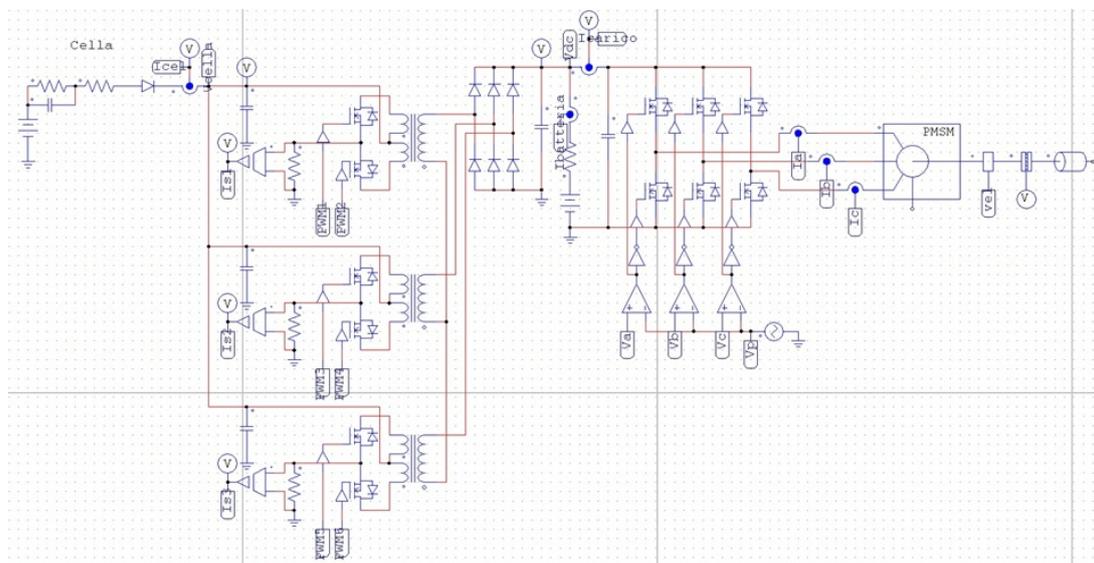


Figura 5.7: **Schema in PSim del convertitore singolo.**

corrente viene poi raddrizzata attraverso un ponte a diodi trifase, se le tensioni vengono sfasate opportunamente, l'ondulazione della tensione in uscita dal ponte sarà molto piccola anche senza l'inserzione di dispositivi atti a contenerla. Nello schema si vede che in questo caso soltanto la cella è collegata al convertitore, l'accumulatore è collegato direttamente al DC-link ed è simulato con una tensione a vuoto di 50V. Naturalmente anche il riferimento della  $V_{dc}$  sarà posto a 50V. La generazione dei comandi per i mosfet è del tutto simile al caso del convertitore a tre vie, si genera una PWM confrontando una portante con una modulante, le portanti dei tre rami sono sfasate di  $120^\circ$  elettrici, la modulante è la stessa per tutti i rami ed è ottenuta dal controllo. Il controllo, che in questo caso si sdoppia, presenta un loop di tensione analogico, in cui viene

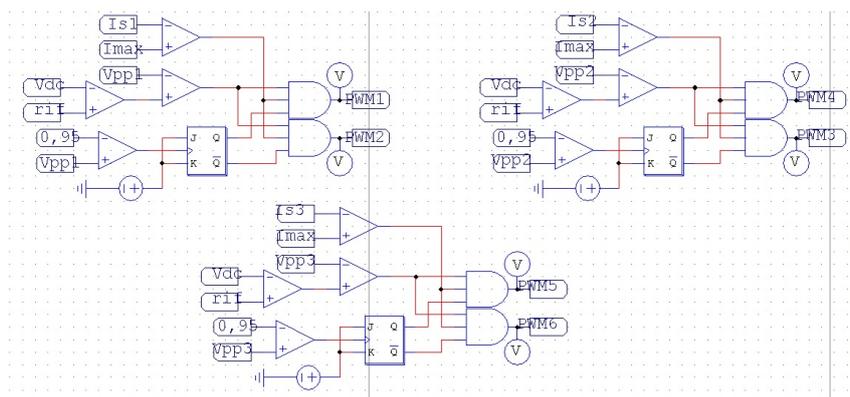


Figura 5.8: **Controllo e generazione dei comandi per i mosfet.**

confrontato il riferimento di tensione con la misura della tensione effettiva sul DC-link. A questo viene affiancato un loop di corrente, anch'esso analogico che può essere usato come protezione ma anche come loop di corrente comandato da un riferimento esterno. Non è necessario realizzare contemporaneamente le due regolazioni di tensione e di corrente, la presenza di una delle due relega l'altra ad una funzione di protezione aggiuntiva. In Figura 5.8 vengono mostrati i circuiti di controllo analogico dei tre rami: la modulante per la PWM, in questo caso, non sarà costante,

ma risulterà un segnale ad onda quadra, in quanto deriva da un confronto tra un riferimento ed una grandezza misurata variabile. La portante serve per dare un riferimento temporale in relazione con gli altri rami.

Anche in questo caso la selezione del mosfet usato viene ottenuta attraverso l'uso di un flip-flop JK che ad ogni periodo della portante commuta l'uscita. La portante ha frequenza di 16KHz, ottenendo così una tensione alternata in uscita dal trasformatore a 8KHz.

Sfasando le portanti di  $120^\circ$  si ottengono le uscite alternate sfasate di  $60^\circ$ : la prima e la seconda sono sfasate di  $60^\circ$ , la prima e la terza sono sfasate di  $120^\circ$ ; per arrivare allo sfasamento corretto occorre invertire la seconda fase e questo si ottiene o invertendo fisicamente l'uscita o, come fatto nella simulazione invertendo i segnali sui mosfet, la Figura 5.8 mostra che i segnali chiamati "PWM3" e "PWM4" sono invertiti.

Anche per queste simulazioni si è utilizzato l'ambiente Simulink, si è usata una routine Matlab per il controllo che genera il riferimento di corrente per il convertitore della cella. Il controllo può essere estrapolato da quello usato per il convertitore a tre vie, riportato in Figura 5.4(a), togliendo le parti dedicate al controllo dell'accumulatore. Si arriva allo schema di principio di Figura 5.9(a), che però non offre la garanzia di un controllo ottimo della corrente. Infatti partecipano al controllo soltanto la corrente sulla cella e la tensione  $V_{dc}$ . Meglio modificare il controllo in modo tale che l'uscita del loop esterno di tensione non sia il riferimento di corrente di carico, bensì il riferimento della corrente sull'accumulatore. Se a quest'ultimo viene sommata la corrente assorbita dal carico, si ottiene il riferimento di corrente per la cella (Figura 5.9(b)). Questo



(a) Schema di principio del controllo estrapolato.

(b) Schema di principio del controllo modificato.

Figura 5.9: Schema di principio del controllo per convertitore singolo.

stragemma permette di controllare meglio le singole correnti, se si fosse usato il controllo di Figura 5.9(a), a fronte di una variazione della tensione sul DC-link il controllo avrebbe reagito richiedendo una corrente aggiuntiva alla cella, tutto funziona bene finché non si deve ricaricare anche l'accumulatore: in questo caso il controllo non conosce quale è la quota parte della corrente per il carico e quella per la ricarica dell'accumulatore. Il controllo di Figura 5.9(b), invece, utilizza anche la misura della corrente sul carico ed impostando opportunamente le saturazioni si riesce all'occorrenza a limitare la corrente di ricarica dell'accumulatore.

In Figura 5.9(b) è mostrata anche la separazione tra la parte analogica e quella digitale. Quella analogica comprende il loop di corrente della cella ed all'occorrenza utilizza il riferimento di corrente fornito dal controllo mantenendo, in questo caso, il loop di tensione soltanto come protezione aggiuntiva.

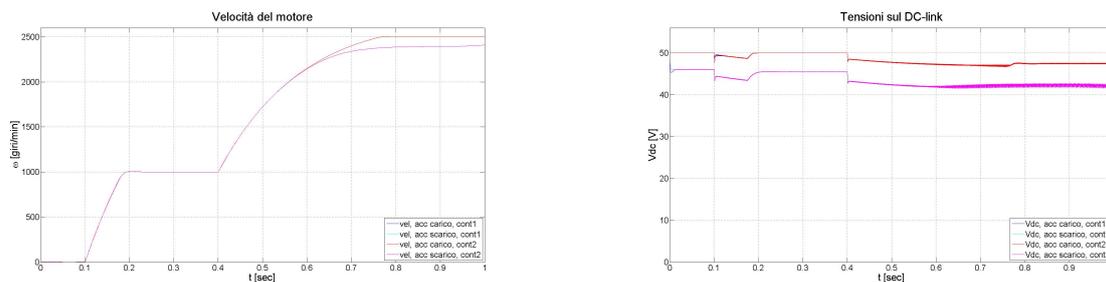
Un'altra soluzione prevede di rinunciare al controllo di corrente ed usare soltanto quello analogico di tensione, lasciando il loop di corrente del convertitore come protezione. In questo modo non si ha una perfetta controllabilità della corrente sull'accumulatore, ma essendo l'accumulatore robusto e le energie in gioco non molto elevate, è improbabile che la corrente di carica dell'accumulatore riesca a diventare talmente elevata da rovinare l'accumulatore stesso (anche perché la cella non è in grado di erogare, nel DC-link una corrente maggiore di 24A, che non sono sufficienti a rovinare un'accumulatore al piombo). Non avendo un controllo dedicato, le correnti di carica e scarica si autoregolano in funzione della tensione sul DC-link, quando quest'ultima è minore del riferimento il duty-cycle del convertitore aumenta facendo in modo da aumentare la corrente

sul carico, fino ad arrivare alla massima corrente che può transitare attraverso il convertitore (corrisponde alla massima corrente erogabile dalla cella). Se il carico lo permette la cella carica l'accumulatore.

### 5.2.2 Risultati della simulazione.

Come per il convertitore a tre vie, anche in queste simulazioni si è sollecitato il regolatore divelocità con un segnale di riferimento con due gradini successivi a livelli diversi.

In Figura 5.10(a) vengono presentati gli andamenti delle velocità del motore con entrambi i controlli ("cont1" identifica il controllo completamente analogico, "cont2" identifica il controllo misto) e con accumulatore prima carico e poi scarico. Gli andamenti non mostrano delle differenze tra



(a) Andamento delle velocità.

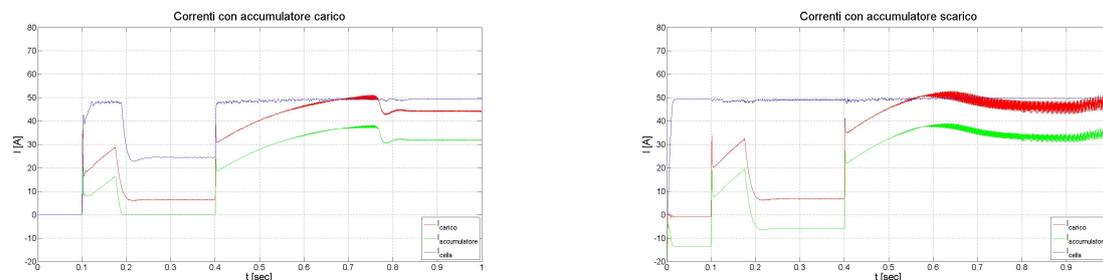
(b) Andamenti della tensione sul DC-link.

Figura 5.10: Andamenti di velocità e tensioni con accumulatore carico e scarico.

i due controlli usati per il convertitore per quanto riguarda le velocità nella fase di accumulatore carico, mentre nella fase di accumulatore scarico, la risposta dinamica peggiora quando si usi il controllo misto analogico-digitale (cont2).

In Figura 5.10(b) sono presentate le tensioni sul DC-link, che confermano la loro dipendenza dal carico. L'intervallo di funzionamento, tenuto conto anche del caso dell'accumulatore scarico, è maggiore di quello del convertitore a tre vie, ma è comunque compreso nel normale intervallo di funzionamento del sistema di propulsione e quindi non costituisce un problema. Per quanto riguarda i controlli, si vede che quello completamente analogico (cont1) migliora le prestazioni del sistema in termini di velocità di risposta, la  $V_{dc}$  risulta leggermente più elevata in seguito a variazioni di carico, evidentemente questo controllo ha una dinamica migliore. Simulando anche, per la parte digitale per il controllo misto (cont2), la presenza del DSP, si introduce un ritardo, che anche se minimo rallenta la velocità di risposta.

In Figura 5.11(a) vengono visualizzati gli andamenti delle correnti sul carico, sull'accumulatore



(a) Andamento delle correnti con accumulatore carico.

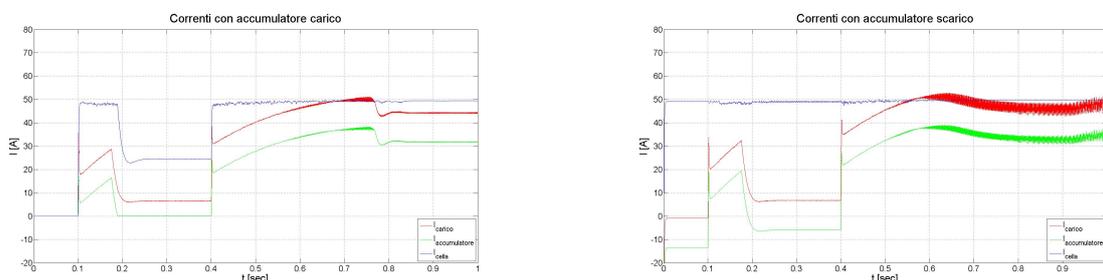
(b) Andamenti delle correnti con accumulatore scarico.

Figura 5.11: Andamenti delle correnti sul carico, sull'accumulatore e sulla cella per il convertitore singolo con controllo misto.

e sulla cella per il convertitore singolo controllato in modo misto, ossia con la parte analogica comandata da quella digitale. Il principio di funzionamento è lo stesso del controllo per il convertitore a tre vie, ma in questo caso la semplicità del sistema rende più veloci e più stabili le risposte di corrente che hanno un'ondulazione minore.

In Figura 5.11(b) è mostrato il caso con accumulatore scarico, quest'ultimo viene caricato con corrente la cui ampiezza è data dal livello di tensione sul DC-link, finché la cella a combustibile non eroga la massima corrente. A 0,01sec, in presenza del primo gradino la tensione sul DC-link cala ed in conseguenza l'accumulatore eroga la corrente richiesta dal carico, aiutando la cella, quando quest'ultimo assorbe meno, la cella continua ad erogare il massimo della corrente, ma questa volta ricaricando anche l'accumulatore.

Se il controllo fosse completamente analogico si avrebbe una maggior velocità di risposta del sistema alle perturbazioni, in Figura 5.12(a) si può vedere che il fronte di salita della corrente sulla cella è più ripido di quello presentato in Figura 5.11(a). Analoga considerazione può essere fatta valutando le simulazioni con accumulatore scarico.



(a) Andamento delle correnti con accumulatore carico.

(b) Andamenti delle correnti con accumulatore scarico.

Figura 5.12: Andamenti delle correnti sul carico, sull'accumulatore e sulla cella per il convertitore singolo con controllo completamente analogico.

### 5.2.3 Considerazioni sul convertitore singolo.

Analizzando i risultati ottenuti è emerso che, per questa particolare applicazione, il convertitore singolo è sicuramente più indicato rispetto al convertitore a tre vie. Oltre a risultare più semplice ed economico si adatta meglio alle esigenze del sistema di propulsione per piccole imbarcazioni, soprattutto in considerazione delle dimensioni e del peso più contenuti. Il controllo si semplifica notevolmente e può essere utilizzata soltanto la parte analogica con il vantaggio di avere una dinamicamente più veloce.



# Capitolo 6

## Realizzazione sperimentale.

### Introduzione.

Il convertitore singolo, descritto nel capitolo nel paragrafo 5.2 è la soluzione più idonea per il sistema di propulsione per una piccola imbarcazione, per cui se ne è intrappresa la sua costruzione in collaborazione con la ditta Elcon Elettronica srl, che opera all'interno dell'Area di Ricerca di Trieste. Per ragioni di limiti di corrente il sistema di conversione è stato diviso in tre sezioni identiche costituite ciascuna da un convertitore. Le tre sezioni lavorano in parallelo, comandate da tre segnali provenienti da un DSP opportunamente sfasati al fine di ottenere un sistema trifase simmetrico di tensioni che raddrizzate danno tensione continua in uscita.

### 6.1 Convertitore DC-DC.

Ogni sezione del convertitore è costituita da un semiponte a mosfet, da un trasformatore e da un controllo. Il cuore del controllo è costituito dal circuito integrato SG3524 il cui schema a blocchi di funzionamento interno è riportato in Figura 6.1. Viene generato un segnale a dente di sega e questo viene comparato con un segnale di riferimento per generare la PWM per i mosfet. Il segnale di riferimento viene generato da due comparatori, uno per la regolazione della tensione

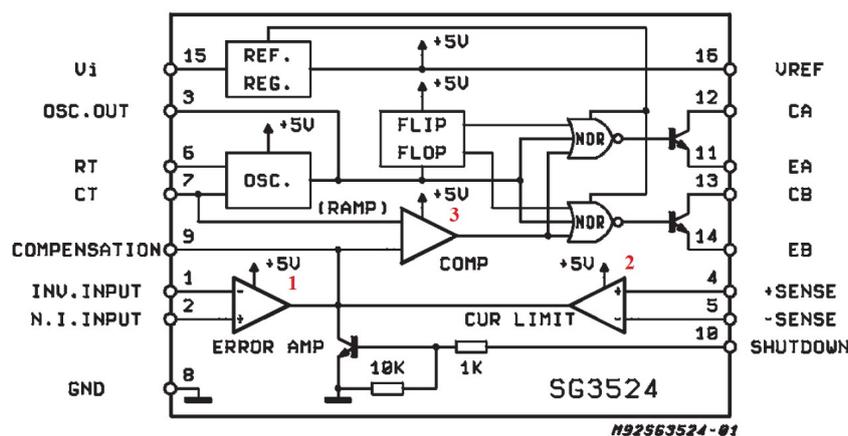


Figura 6.1: Schema interno del cip SG3524.

(comparatore 1) che dà un segnale alto<sup>1</sup> quando la  $V_{dc}$  è minore del riferimento e segnale di uscita basso in caso opposto. Analogamente il comparatore per la corrente, che può essere usato sia

<sup>1</sup>Si intende "segnale alto" quando il relativo valore di tensione è pari alla tensione di alimentazione.

come regolatore di corrente controllato esternamente, sia come protezione interna. Sfruttando il regolatore di tensione come protezione interna si può pensare ad un controllo completamente analogico, si usa il comparatore di corrente (comparatore 2) come protezione in caso di massima corrente e si usa l'altro comparatore (comp. 1) per il controllo della tensione del DC-link. La corrente sull'accumulatore si autoregolerà in funzione della tensione  $V_{dc}$ .

In Figura 6.2 è riportato lo schema elettrico di un ramo del convertitore, mentre in Tabella 6.1

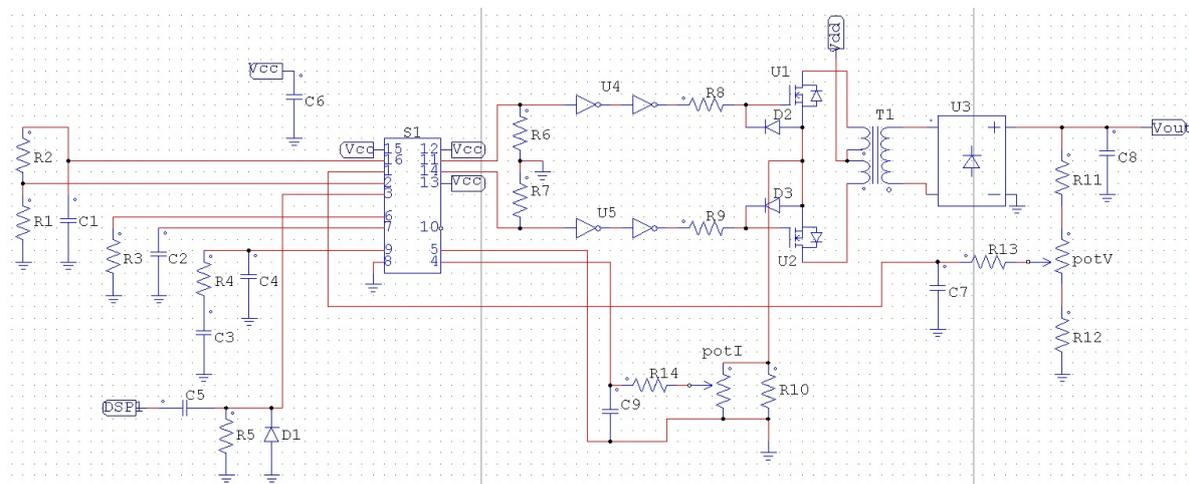


Figura 6.2: Schema di un ramo del convertitore.

sono riportati i valori dei componenti usati. La scelta dei componenti è basata sul datasheet del

R1=R2=R5=R13=4,7K	C1=C6=100n
R3=10K	C2=C3=C5=C7=C9=1n
R4=22K	C4=1 $\mu$
R6=R7=2,2K	C8=1000 $\mu$ elet
R8=R9=10	D1=1N4148
R10=R11=R12= da definire	D2=D3= zener 12V
R14=1K	potV=4,7K
S1=SG3524	potI=1K
U1=U2=IRF4410	T1=trasformatore a tre vie
U3=ponte raddrizzatore	U4=U5=40106

Tabella 6.1: Valori dei componenti usati.

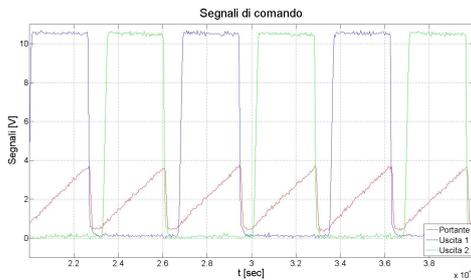
componente SG3524. Nel controllo di tensione, il terminale 2, ossia il riferimento del comparatore 1, viene collegato ad un riferimento di tensione (2,5V), proveniente dal piedino 16 (tensione di riferimento a 5V ottenuto da un regolatore interno) tramite un partitore di tensione. Il circuito integrato non ha tensioni negative, se si ponesse il terminale 2 (non invertente) a massa, non si riuscirebbe a comandare il comparatore e il suo funzionamento corretto regolerebbe soltanto i valori positivi dell'errore di tensione. Al terminale 1 si deve portare un segnale proporzionale alla tensione di uscita, questo si ottiene tramite un partitore costituito da R11, R12 e potV. Scegliendo un potenziometro da 4,7K si dimensionano i due resistori per avere con metà potenziometro inserito 2,5V ed ai capi di quest'ultimo circa 1V. Con questi vincoli, imponendo una corrente sul partitore di 1mA ed ipotizzando una tensione di 50V all'uscita si ricava R11=43,3K e R12=0. R3 e C2 danno la frequenza dell'oscillatore interno per la portante a dente di sega, tramite la formula  $f = \frac{1,18}{R3 \cdot C2}$ , in cui la R è in K $\Omega$ , la C in  $\mu$ F e la frequenza in KHz.

Il piedino 9 è collegato ad un condensatore, il piedino all'occorrenza può essere adoperato come ingresso per la generazione della PWM, se non viene usato lo si connette ad una rete RC (R4 e C3).

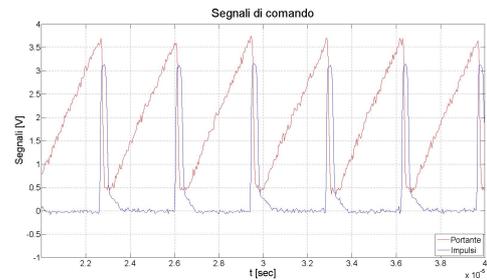
C6 è una capacità di filtro per l'alimentazione del circuito integrato, va posizionata il più vicino possibile al piedino 15, alle volte conviene collegarla direttamente sul piedino stesso.

Tra i terminali 4 e 5 deve arrivare la misura della corrente, ottenuta dalla caduta di tensione ai capi della resistenza di misura R10. R10 deve essere la più piccola possibile ed anti-induttiva per evitare che possa creare problemi al normale flusso della corrente verso massa e l'insorgere di rumore, inoltre deve portare tutta la corrente del trasformatore senza scaldarsi troppo. Considerando una corrente di circa 10A, ai capi della resistenza si devono avere almeno 300mV, tensione alla quale il comparatore interviene. Infatti i due comparatori dello schema di Figura 6.1 hanno una soglia di intervento di circa 200mV (sul datasheet), per cui 300mV li fanno sicuramente commutare. La resistenza di misura da inserire dovrà essere allora di  $0,03\Omega$ , che però andrebbe a dissipare 3W, la soluzione migliore è inserire tre resistenze da  $1/2W$  da  $0.1\Omega$  in parallelo. Per rilevare il segnale di tensione, si inserisce in parallelo un potenziometro, in modo da poter regolare il segnale di tensione proporzionale alla corrente misurata. Occorre inserire una resistenza ed una capacità che facciano da filtro nelle immediate vicinanze del potenziometro, in quanto le correnti che circolano sulle resistenze di misura sono affette da impulsi di corrente e devono essere filtrate. Altra particolarità, il terminale 5 va collegato a massa, non direttamente, ma in prossimità del potenziometro portando le due piste o fili appaiati dai terminali 4 e 5 fino al potenziometro di misura, così facendo si riducono i disturbi di modo comune che possono entrare nel circuito, essendo le tensioni bassissime, 300mV contro i 2,5V della retroazione del loop di tensione.

Un ruolo fondamentale per il corretto funzionamento del parallelo dei rami è rivestito dal terminale 3, se non connesso è un'uscita e fornisce un impulso ogni volta che il flip-flop interno commuta, altrimenti funziona come un ingresso, che può essere pilotato da un treno di impulsi. Ogni volta che il segnale su questo terminale è alto (+5V), si riavvia la rampa del dente di



(a) Segnali PWM in uscita dal chip SG524.



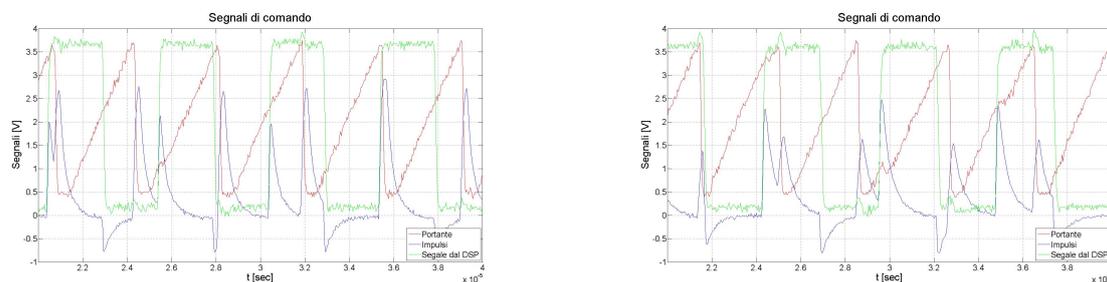
(b) Portante con impulso di reset.

Figura 6.3: Segnali per l'aggancio della portante.

sega della modulante, in Figura 6.3(b) si può vedere la portante che viene azzerata dall'impulso generato direttamente all'interno del circuito integrato. Il terminale 3, opportunamente pilotato, permette di agganciare la portante ad un segnale di riferimento e quindi sincronizzare la fase del ramo. Naturalmente gli impulsi che arrivano al terminale 3 devono essere molto stretti in quanto deve forzare la portante a zero, ma non deve mantenerla in quello stato più del tempo necessario. In Figura 6.3(b) si nota che la portante non va a 0, ma si rileva una soglia di circa 0,5V, questa caduta di tensione è causata dal circuito interno (datasheet). In Figura 6.3(a) vengono mostrati i segnali in uscita rilevati rispettivamente sul terminale 11 e sul terminale 14 con riferimento alla portante, se non è presente la retroazione di tensione, si arriva al 50% del duty-cycle, in questo caso è un po' meno del duty-cycle sperato, in quanto c'è un piccolo intervallo di tempo nel quale

entrambe le uscite risultano nulle che coincide con l'ampiezza dell'impulso di reset.

Per agganciare le tre portanti vengono generati tre segnali ad onda quadra, sfasati di  $120^\circ$  fra

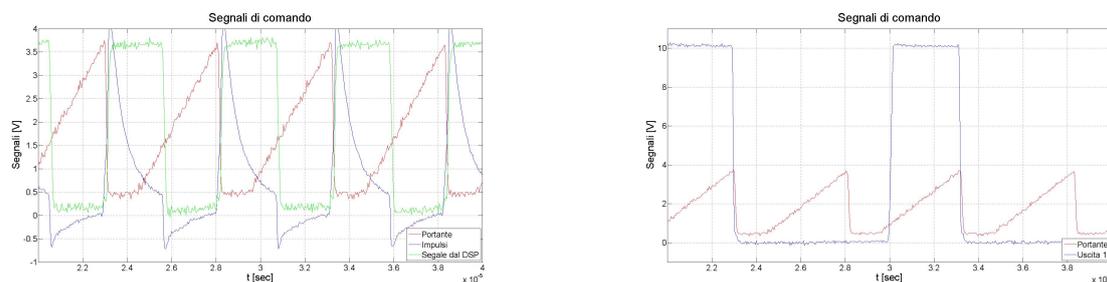


(a) Portante, impulso di reset e segnale proveniente dal DSP.

(b) Portante, impulso di reset e segnale proveniente dal DSP.

Figura 6.4: Segnali per l'aggancio della portante da DSP.

loro, di frequenza pari a 200kHz (uno dei quali è mostrato in Figura 6.4 dal controllore con DSP). Le onde quadre vengono filtrate con un circuito derivativo (C5, R5 e D1, il diodo cancella gli impulsi negativi) ottenendo tre impulsi sfasati di  $120^\circ$  tra loro. Il singolo impulso deve riportare a zero il segnale di portante (a dente di sega). La lunghezza dell'impulso deve essere adeguata per completare il processo di azzeramento, infatti confrontando le Figure 6.4(a) e 6.4(b), nella seconda l'azzeramento risulta più efficace, cambiando i valori di C5 ed R5. Aggiustando i va-



(a) Portante, impulso di reset e segnale proveniente dal DSP.

(b) Portante e PWM sul pin 11.

Figura 6.5: Segnali per l'aggancio della portante da DSP.

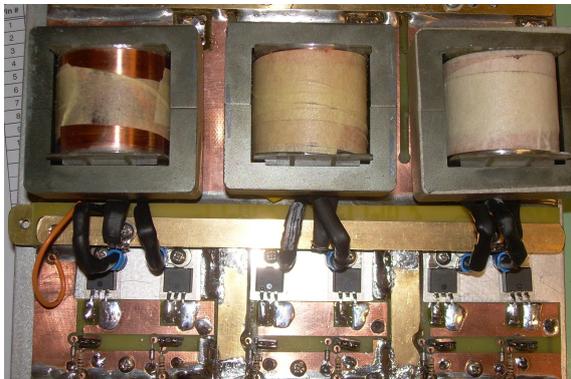
lori di C5 ed R5, si arriva ai segnali di Figura 6.5(a), si vede che la portante è perfettamente agganciata al treno di impulsi di azzeramento dato dall'onda quadra. In questo modo, però, è aumentato l'intervallo di tempo necessario a ridurre a 0,5V il segnale di portante. In Figura 6.5(b) è mostrato, oltre che la portante, anche il segnale di uscita del terminale 11, il fatto di avere l'impulso troppo ampio limita il duty-cycle.

Per il test del trasformatore è necessario usare una frequenza di portante più elevata rispetto al funzionamento normale, perciò la costante di tempo del gruppo R3, C2 va modificata nelle due modalità di funzionamento (test e normale).

All'interno del circuito integrato sono presenti due transistor connessi ad emettitore comune. La coppia di comandi PWM così ottenute, prima di essere inviati ai mosfet, devono essere amplificate usando un buffer invertente (CD40106). All'interno del circuito integrato CD40106 si hanno 6 buffer invertenti e triggerati, utili per squadrare il segnale e per fornire l'energia necessaria al comando del mosfet, infatti se ne usa uno per invertire il segnale ed i restanti 5, inseriti in parallelo (il parallelo è stato omesso in Figura 6.1 per motivi di leggibilità dello schema) per aumentare la corrente effettiva di comando del mosfet.

Le due resistenze R8 ed R9 servono per limitare la corrente in caso di corto circuito sui mosfet, così facendo si limita il rischio di possibili sovraccarichi sui driver. Non devono avere valori troppo elevati, devono permettere il passaggio di una corrente sufficiente per pilotare il mosfet. Un valore di  $10\Omega$  può essere adatto a tutte le configurazioni. Bisogna ancora proteggere i mosfet da eventuali sovratensioni inverse tra il gate ed il source, che portano alla distruzione della giunzione interna (punto debole dei mosfet). Si inseriscono dei diodi zener (D2 e D3) da 12V, che cortocircuitano queste tensioni.

I mosfet di potenza usati sono di tipo veloce, hanno una tensione tra drain e source  $V_{DSS}$  di 100V, è la tensione che il mosfet, in stato interdetto, riesce a tenere senza distruggersi. La corrente che può attraversare il mosfet è di 96A, mentre la resistenza interna in conduzione è di  $8,0m\Omega$ . Una resistenza in conduzione così piccola giustifica le dimensioni ridotte del componente pur mantenendo delle ottime prestazioni (Figura 6.6(a)). I mosfet sono stati collegati sfruttando



(a) Vista dei trasformatori e dei mosfet del convertitore.



(b) Vista dei mosfet e del controllo del convertitore.

Figura 6.6: Particolari del convertitore reale.

l'aletta di raffreddamento, che è connessa al drain, per equilibrare il passaggio della corrente attraverso il componente e quindi distribuire le perdite lungo tutto il corpo del mosfet.

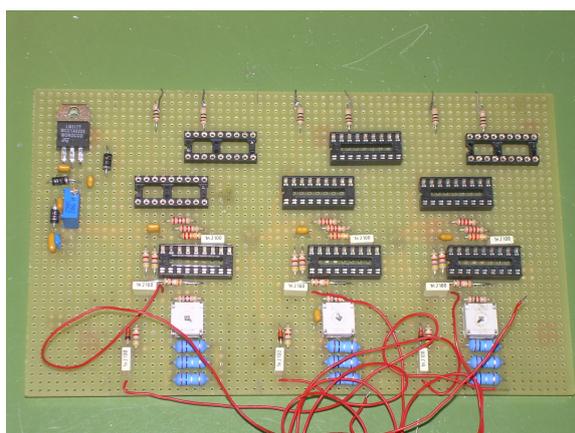
La parte di controllo, comprendente i circuiti integrati SG3524 ed i driver CD40106, viene alimentata a 12V circa, tutti i circuiti hanno tecnologia CMOS che tollera i 12V. Per caricare la capacità interna del mosfet tra gate e source occorre fornire una corrente adeguata, l'aver inserito 5 porte logiche (CD40106) in parallelo è sufficiente per garantire una buona e veloce accensione del mosfet.

In uscita al trasformatore è posto un ponte a diodi veloci, che ha il compito di raddrizzare la tensione. I diodi sono gli RURG3060, sopportano tensioni inverse di 600V, correnti in conduzione di 30A e la commutazione in conduzione avviene in meno di 55ns. Nel lato in continua vengono inseriti tre condensatori elettrolitici (C8 in Figura 6.2) da  $1000\mu F$  dedicati agli alimentatori switching, ossia costruiti con le induttanze parassite ridotte al minimo.

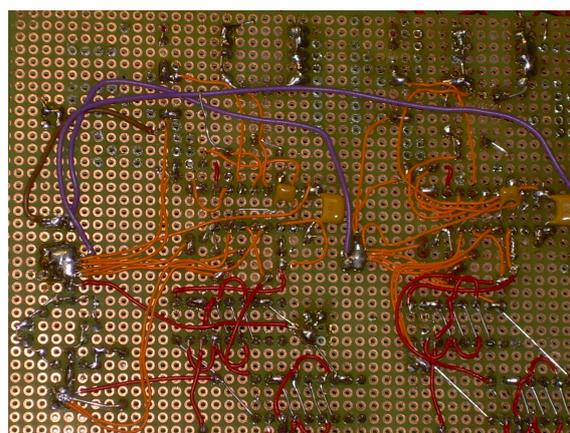
I mosfet alimentano il trasformatore, concepito con doppio primario per ottenere una presa centrale, questo stratagemma permette di poter inserire soltanto due mosfet, invece dei quattro previsti per un normale ponte ad H. Il trasformatore è stato dimensionato in funzione del circuito magnetico, per il quale si sono usate le ferriti, materiali ceramici con polvere magnetica di ferro-alluminio-zinco, i nuclei utilizzati nel progetto sono equipaggiati con il rocchello in plastica come supporto per gli avvolgimenti. Nel nostro caso si è utilizzata una ferrite che permette di ottenere un'induzione magnetica di 4000Gauss, corrispondenti a 0,4T, il primo dimensionamento è stato fatto con un'induzione nominale di 0,2T, imponendo la tensione di ingresso di 25V e quella di uscita di 50V (si tiene conto di 2V di caduta di tensione sugli avvolgimenti) ed una

frequenza di funzionamento di 10KHz. Il dimensionamento del trasformatore con questi dati conduce ad un numero di spire troppo elevato, non si riesce ad inserirle fisicamente sul rocchello. Le soluzioni potrebbero essere due, la prima consiste nell'affiancare due ferriti, costruire un rocchello che contenga due ferriti, raddoppiare il valore di  $B$  ed aumentare le dimensioni del trasformatore. Questa strada, però, non dà i risultati sperati, in quanto anche così lo spazio per gli avvolgimenti è insufficiente. La seconda soluzione è quella di alzare il valore di  $B$  fino al massimo ( $0,4T$ ) ed al contempo aumentare la frequenza nominale per diminuire il numero di spire. Si è scelta una frequenza di lavoro di 100kHz, ottenendo 5 spire per i due avvolgimenti primari ed 11 spire per l'avvolgimento secondario. Purtroppo alla frequenza di lavoro di 100kHz si riscontrano problemi dovuti ai disturbi, gli avvolgimenti non possono essere in conduttore a sezione circolare per l'effetto pelle. Convieni usare piattina o meglio ancora liste di rame, di 30mm di larghezza, ottenute da un foglio di rame avente uno spessore di 0,3mm, la sezione risultante è comunque sufficiente ( $10mm^2$  circa, con una corrente di 15A dà una densità di corrente di  $1,5A/mm^2$  abbastanza bassa per un trasformatore di questo tipo). Le liste di rame sono state isolate con nastro in mylar per la tenuta elettrica irrobustito meccanicamente da nastro adesivo plastificato. In Figura 6.6(a) si vede il particolare degli avvolgimenti del trasformatore a sinistra.

La frequenza di lavoro dei trasformatori (100kHz) comporta problematiche di rumore e di mutui accoppiamenti che possono essere superati solo con una oculata costruzione del circuito stampato di supporto. Infatti una prima realizzazione prototipale (Figura 6.7(a)) ottenuta utilizzando basette millefori e collegamenti "filati", come mostrato in Figura 6.7(a), ha presentato numerosi malfunzionamenti. I segnali di comando dei mosfet, una volta collegata la parte di potenza,



(a) Scheda di controllo su basetta millefori.



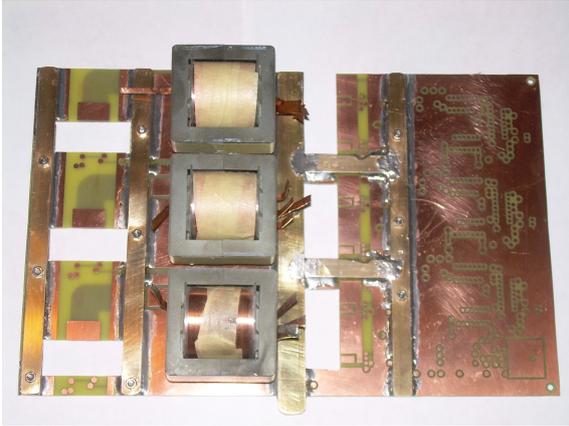
(b) Vista del retro della scheda.

Figura 6.7: Scheda sperimentale del controllo del convertitore.

arrivano distorti, i collegamenti a "filo" hanno un'induttanza che dà cadute di tensione e fanno sorgere disturbi. Questi disturbi sono molto pericolosi, in quanto se presenti nei segnali di accensione dei mosfet, producono commutazioni non corrette, con conseguenti oscillazioni delle tensioni, che assieme alle risonanze tra le capacità parassite dei mosfet e le induttanze degli avvolgimenti del trasformatore portano a perdite elevate. Si può giungere a comportamenti in cui i mosfet si accendono e si spengono, per effetto di queste oscillazioni, con frequenze dell'ordine delle decine di MHz, provocando, con 10A di carico, un surriscaldamento repentino e consistente dei mosfet (in tempi dell'ordine del minuto, i componenti passano dalla temperatura ambiente ad oltre  $100^{\circ}C$ , distruggendosi termicamente e cortocircuitandosi nel giro di una decina di minuti). Naturalmente l'inserzione di snubber, se già il segnale di comando è corrotto, diventa inutile. Per questo motivo si è pensato di sviluppare e costruire un circuito stampato che comprendesse la parte di comando e le parte di potenza di tutto il convertitore. Dimensionando opportunamente le superfici di massa si riesce a risolvere i problemi derivanti dall'utilizzo di una frequenza di

200kHz di portante.

Nel circuito stampato il piano di massa è stato previsto sulla faccia superiore e nelle zone maggiormente soggette al passaggio della corrente si sono stagnate delle barre di ottone da 1mm di spessore, in Figura 6.8(a) si vede lo stampato in fase di costruzione, si notano le barre di ottone imbullonate e poi stagnate sullo stampato, che hanno la funzione di facilitare il passaggio della corrente. In Figura 6.8(b) si vede il circuito nella sua versione finale. La tensione di ingresso



(a) Circuito stampato con barre di massa e trasformatori.



(b) Circuito stampato con tutti i componenti.

Figura 6.8: Circuito stampato sperimentale del convertitore DC-DC.

viene portata ai trasformatori tramite una barra di ottone imbullonata a sandwich con la barra di massa centrale, le due sono isolate tramite una barretta di vetronite.

Il circuito stampato così ottenuto viene montato su un radiatore in alluminio per mezzo di distanziatori.

## 6.2 Alimentatore per le schede di controllo e sonde di misura.

Analogamente al convertitore per le celle a combustibile, è stato dimensionato e costruito un convertitore stabilizzato per alimentare la scheda di controllo con DSP e le sonde di misura. Questo convertitore ha una potenza di 40W circa ed una tensione di uscita di 5V (2A) per la scheda di controllo ed un'uscita bilanciata a  $\pm 15V$  (1A) per alimentare le sonde di misura.

In Figura 6.9 è mostrato lo schema elettrico di connessione del secondario del trasformatore dell'alimentatore, mentre il circuito del primario è uguale a quello di Figura 6.2. In questo alimentatore viene controllata in retroazione solo l'uscita a 5V destinata ad alimentare le schede di controllo con DSP. La retroazione di tensione va collegata al terminale 1 del circuito integrato SG3524 ed in Figura 6.9 è indicata con la scritta "Al pin 1".

In Figura 6.10 viene mostrato il profilo dell'alimentatore nella sua versione finale.

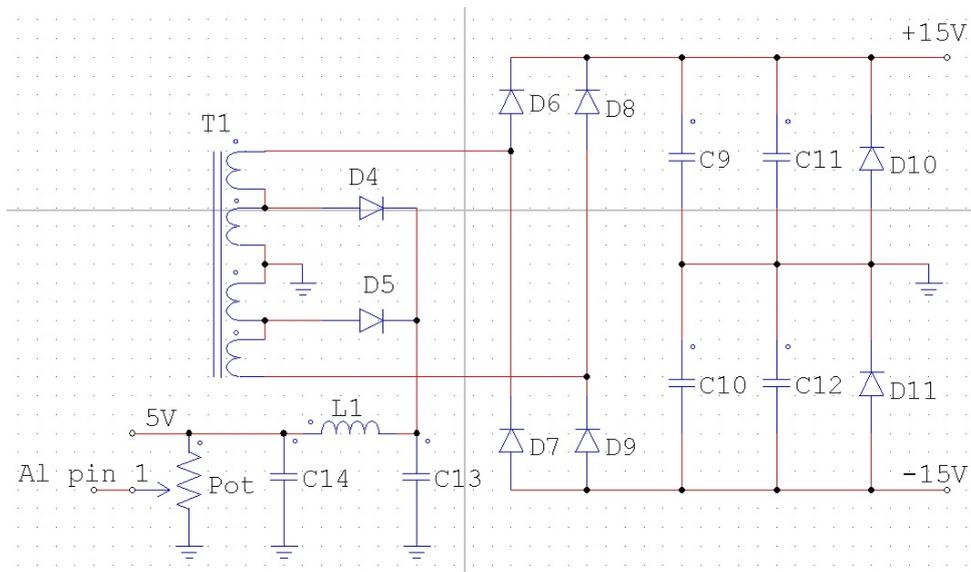


Figura 6.9: Schema del secondario dell'alimentatore.

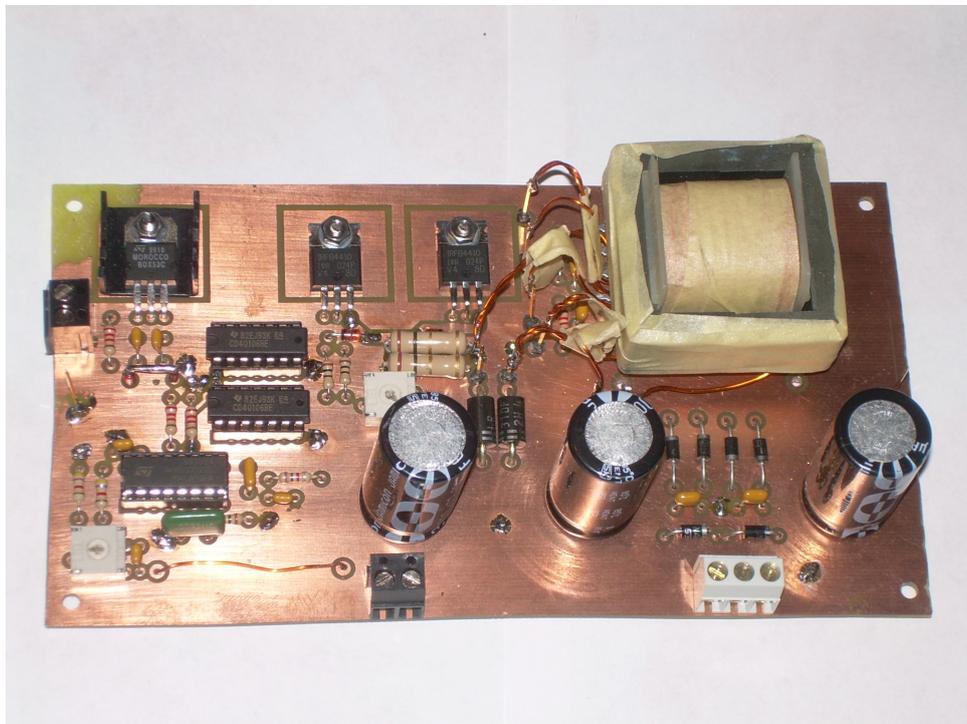


Figura 6.10: Alimentatore per il DSP e le sonde.

# Capitolo 7

## Tolleranza ai guasti.

### Introduzione.

Considerato che nelle piccole imbarcazioni, come quella interessata da questo studio, il sistema di propulsione è unico (se si esclude la forza muscolare umana) è ben evidente la necessità di garantire il più possibile la presenza della propulsione anche in caso di qualche guasto al sistema stesso. Per questo motivo si ritiene opportuno dotare il convertitore che alimenta il motore di propulsione della capacità di tolleranza ai guasti. A questo scopo è stato indagato lo stato dell'arte sui tipi di guasto più comuni e sulle principali tecniche di tolleranza ai guasti degli invertitori di tensione.

Si è poi approfondito lo studio sulle tecniche che non comportano l'uso dei regolatori di corrente, considerando che la tipologia di guasto più frequente è quello che interessa uno degli interruttori del ponte. Di solito l'interruttore si cortocircuita, ma dotando l'inverter di opportuni fusibili si farà l'ipotesi che l'interruttore guasto costituisca un circuito aperto.

### 7.1 Identificazione del guasto.

In caso di guasto il controllo deve rilevare il guasto di un interruttore del ponte ed in secondo luogo deve attuare le contromisure per poter far fronte al guasto stesso. L'algoritmo agisce senza l'intervento dei regolatori di corrente ma fonda la sua azione sulla modifica di ampiezza e fase delle tensioni di alimentazione delle due fasi non interessate dal guasto per ottenere due correnti di uguale ampiezza sfasate di  $60^\circ$  elettrici, in modo da avere una coppia elettromagnetica priva di armoniche (due correnti sfasate di  $60^\circ$  che percorrono due avvolgimenti posti a  $120^\circ$  meccanici danno un campo magnetico perfettamente rotante e privo di componenti pulsanti).

Allo studio teorico-simulativo è stata affiancata l'attività sperimentale, allestendo un banco prova per verificare sperimentalmente la tecnica di tolleranza ai guasti proposta. Lo schema sperimentale è costituito da una scheda di potenza di uso generale della International Rectifier comandata da una scheda di sviluppo basata sul DSP TMS320F2812 della Texas Instruments. Le due schede sono interfacciate da una scheda di condizionamento dei segnali costruita allo scopo. Inizialmente all'invertitore è stato collegato un motore asincrono, più facile da controllare e maggiormente conosciuto, ma in prospettiva l'algoritmo verrà adattato ad un motore brushless. Lo schema di principio del sistema è riportato in Figura 7.1, in cui si vede il motore asincrono trifase, alimentato da un inverter. Il neutro del motore è collegato, tramite l'interruttore elettromeccanico S, al centro dell'alimentazione, costituito da due filtri RC, uno verso massa e l'altro verso il DC-link. Nella prima fase dell'algoritmo bisogna trovare l'interruttore guasto in modo da adottare le corrette contromisure. Per fare ciò, ci si avvale delle misure di corrente sulle tre fasi, valutando la traiettoria descritta dalla punta del vettore spaziale della corrente di statore. In caso di guasto,

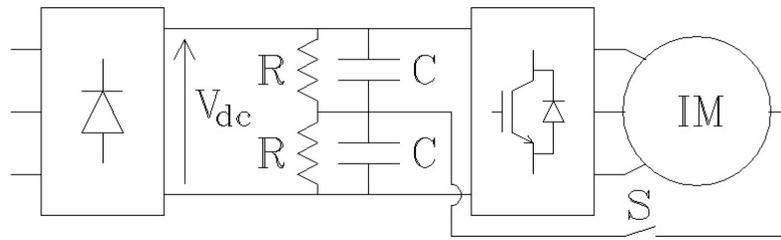


Figura 7.1: **Schema di principio del sistema sperimentale.**

invece di una circonferenza si ottiene una semicirconferenza, è sufficiente valutare la posizione di questa semicirconferenza per risalire all'interruttore guasto. In Figura 7.2 è riportata la traiet-

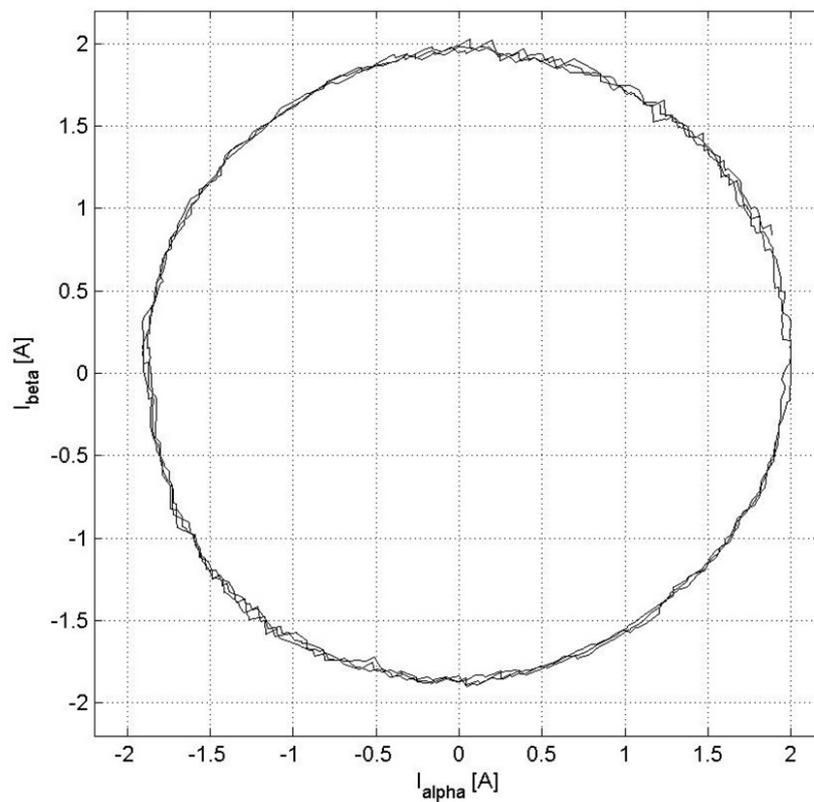
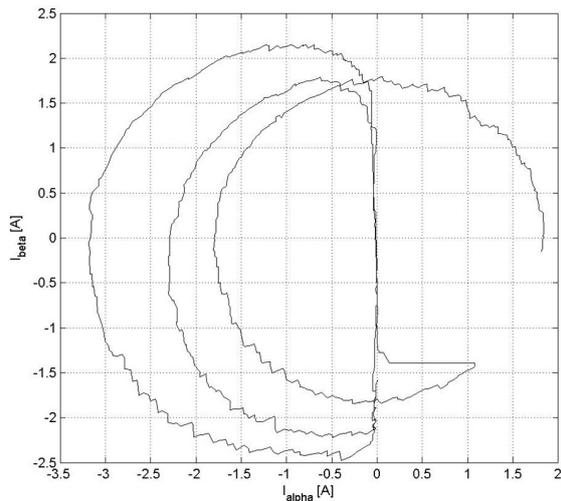
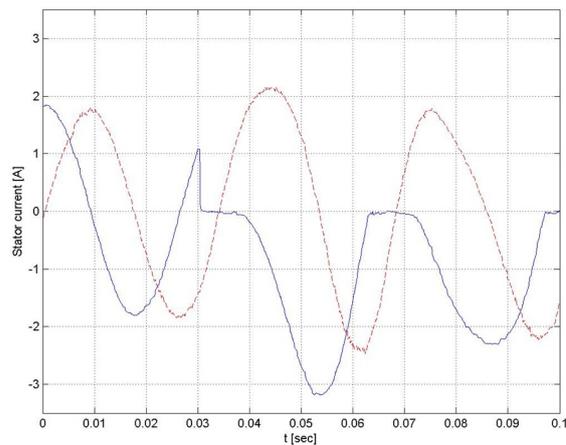


Figura 7.2: **Diagramma  $I_\alpha - I_\beta$  in funzionamento normale.**

toria in caso di funzionamento senza guasto e con l'interruttore S aperto (vedi Figura 7.1), si ottiene una circonferenza regolare e anche se il centro della circonferenza non coincidente con l'origine (per la presenza di un offset). In caso di guasto la situazione cambia, la traiettoria si modifica ed assume la forma di una semicirconferenza orientata secondo l'asse della fase alimentata dal ramo contenente l'interruttore guasto. In Figura 7.3(a) viene riportata la traiettoria del vettore spaziale della corrente di statore in caso di guasto. Il guasto è stato simulato nella realtà forzando lo spegnimento e mantenendolo spento (in questo caso l'interruttore del primo ramo, agganciato al polo positivo dell'alimentazione in continua). In Figura 7.3(a) si nota la solita traiettoria circolare che correttamente viene percorsa quando non c'è guasto (la rotazione segue il senso antiorario), in prossimità dei  $-60^\circ$  si ha il guasto (sul DSP si forza alta l'uscita corrispondente all'interruttore che si vuole spegnere), si vede che la traiettoria si sposta sull'asse



(a) Diagramma  $I_\alpha - I_\beta$  in caso di guasto.



(b) Andamento delle correnti (in tratto continuo  $I_\alpha$  ed in tratto tratteggiato  $I_\beta$ , in caso di guasto.

Figura 7.3: Traiettorie del vettore spaziale ed andamenti delle correnti in caso di guasto.

delle ordinate e la percorre fino a toccare di nuovo la circonferenza, prosegue sulla circonferenza fino a ritornare sull'asse  $y$ . Si vede che la circonferenza si appiattisce lungo l'asse in cui si trova l'avvolgimento collegato al ramo guasto. La semicirconferenza che scompare è legata all'interruttore del ramo, se il guasto interessa l'interruttore alto si appiattisce la semicirconferenza positiva, se il guasto interessa l'interruttore basso, si appiattisce la semicirconferenza opposta alla posizione dell'avvolgimento. In Figura 7.3(b) vengono riportati gli andamenti delle componenti del vettore spaziale della corrente, in caso di guasto, si vede che la componente  $I_\alpha$  va a 0 per un semiperiodo, mentre continua a circolare la componente  $I_\beta$ , che però tende a distorcersi.

Per identificare l'interruttore guasto vengono usate due soglie, in modo da risolvere il problema derivante dall'istante in cui inizia il guasto. Se un guasto avviene sull'interruttore alto del primo ramo, come in Figura 7.3(b), ma in corrispondenza dei  $70^\circ$  (più in ritardo rispetto al caso mostrato in Figura 7.3(b)), la traiettoria si porta sull'asse delle ordinate, ma per un piccolo tratto, che rende difficile l'identificazione. Allora per l'identificazione del guasto, si è utilizzata una prima soglia molto bassa, circa  $1/10$  del valore nominale della corrente. Se il modulo del vettore spaziale della corrente scende sotto questa soglia il controllo capisce che è presente un guasto (così facendo si riesce anche ad evitare che qualche possibile disturbo sulle misure possa compromettere l'identificazione). Se il modulo non riesce a scendere sotto questo limite, il possibile guasto è considerato ancora "tollerabile" dal sistema e si rimanda l'identificazione al periodo successivo, in cui la traiettoria diventerà una semicirconferenza (caso peggiore per il tempo di identificazione).

La seconda soglia serve per identificare esattamente l'interruttore guasto, è regolata con un valore di circa  $1/2$  del valore nominale della corrente, se è già stato identificato un guasto, quando il modulo del vettore spaziale della corrente supera il valore della seconda soglia si valuta il settore di appartenenza del vettore spaziale in quel preciso istante. In Figura 7.4 viene riportato il piano  $\alpha - \beta$  diviso in 6 settori, posizionati secondo le direzioni in cui sono posizionati gli avvolgimenti delle tre fasi. Nel nostro caso il vettore, visibile in Figura 7.4, appartiene al secondo settore, rappresentativo del guasto sull'interruttore alto del primo ramo, se il vettore fosse appartenuto al quinto settore, il guasto avrebbe interessato l'interruttore basso del primo ramo. Analoghe considerazioni possono essere fatte per gli altri interruttori dell'inverter.

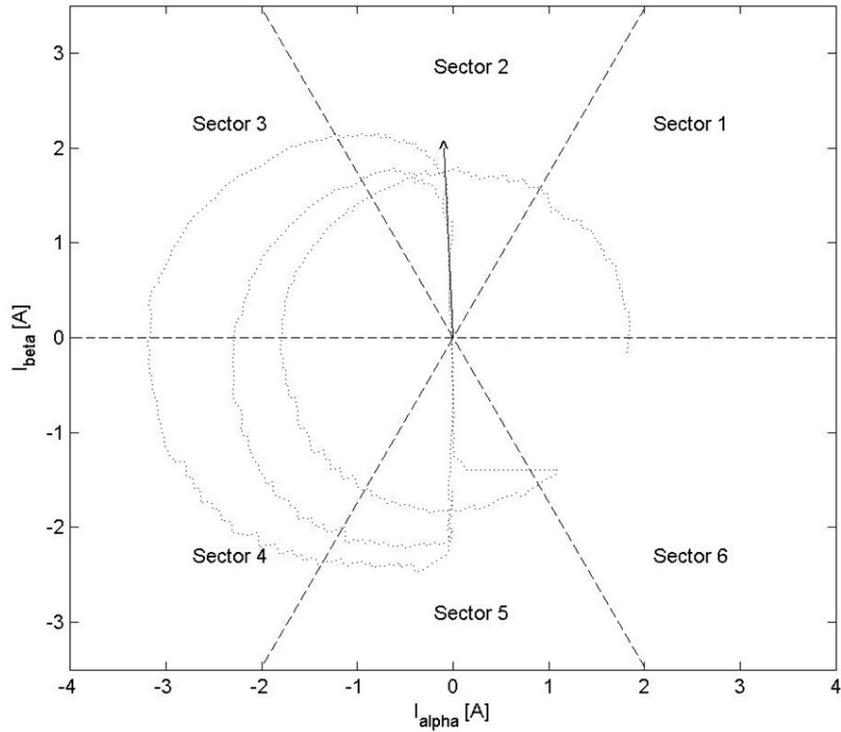


Figura 7.4: Settori nel diagramma  $I_\alpha - I_\beta$ .

## 7.2 Controllo di due fasi in regime di guasto.

In caso di guasto deve essere posta in atto una qualche contromisura alimentando le sole fasi non guaste del motore. Allo scopo di scegliere la configurazione più conveniente ed efficace si sono valutati vari schemi di collegamento dei morsetti delle fasi non guaste: disposizione bifase, bifase con neutro collegato al centro dell'alimentazione, bifase con la terza fase collegata al centro dell'alimentazione. Si è visto che la configurazione che unisce una buona semplicità di implementazione del controllo ad un accettabile funzionamento del motore è quella con disposizione bifase con neutro collegato al centro dell'alimentazione.

Una volta identificato l'interruttore guasto, il controllo reagisce aprendo anche l'altro interruttore del ramo in questione e chiudendo l'interruttore S in Figura 7.1, quest'ultimo è un semplice relè che collega il neutro al centro dell'alimentazione. Il collegamento viene effettuato soltanto in caso di guasto, in quanto se fosse sempre attivo si avrebbero le terze armoniche sulle correnti (si richiudono sul centro dell'alimentazione) e quindi armoniche di coppia aggiuntive.

In caso di guasto il motore deve venir alimentato da due fasi soltanto e per ottenere un campo magnetico perfettamente rotante bisogna fare un modo che i due avvolgimenti risultino percorsi da due correnti di uguale ampiezza e sfasate di  $60^\circ$  elettrici tra loro, senza l'ausilio di controlli sulle correnti. Considerando che si è in regime di guasto, la fase a è staccata ed ipotizziamo ci siano soltanto due correnti sfasate di  $60^\circ$  che percorrono le altre due fasi, il vettore delle correnti di statore può essere così scritto:

$$\bar{I}_s = \begin{pmatrix} \bar{I}_{sa} \\ \bar{I}_{sb} \\ \bar{I}_{sc} \end{pmatrix} = I_s \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ e^{-j\frac{\pi}{3}} \end{pmatrix} \quad (7.1)$$

in cui  $I_s$  è il modulo delle due correnti (i moduli devono essere uguali).

Applicando la teoria delle componenti simmetriche, diretta, inversa ed omopolare al motore

asincrono ed al sistema in cui è inserito, si ottengono le componenti dell'impedenza che sono:

$$\bar{Z}_p = R_s + j\omega L_s + \frac{\omega^2 L_m^2}{\frac{R_r}{s} + j\omega L_r} \quad (7.2a)$$

$$\bar{Z}_n = R_s + j\omega L_s + \frac{\omega^2 L_m^2}{\frac{R_r}{2-s} + j\omega L_r} \quad (7.2b)$$

$$\bar{Z}_0 = R_s + j\omega L_{\sigma s} + \frac{3}{2} \left( \frac{R}{1 + j\omega RC} \right) \quad (7.2c)$$

in cui  $R_s$  è la resistenza di statore,  $L_s$  è l'induttanza di statore,  $L_m$  è l'induttanza di magnetizzazione,  $R_r$  ed  $L_r$  sono rispettivamente la resistenza e l'induttanza di rotore,  $L_{\sigma s}$  è l'induttanza di dispersione di statore ed  $s$  è lo scorrimento. L'equazione 7.2c è scritta nell'ipotesi che la tensione del DC-link non abbia componenti armoniche di pulsazione  $\omega$ .

Applicando la teoria delle componenti simmetriche anche al vettore delle correnti di statore dato dalla 7.1, è immediato calcolare le componenti anche per il vettore delle tensioni di alimentazione del motore, semplicemente moltiplicando le componenti della corrente di statore per le rispettive impedenze. La componente di sequenza inversa della corrente di statore è nulla, in quanto è la condizione per ottenere una forza magneto-motrice rotante di ampiezza costante (due correnti uguali e sfasate di  $60^\circ$  elettrici e fatte circolare in due avvolgimenti sfasati di  $120^\circ$  meccanici creano un campo magnetico rotante perfettamente costante). Di conseguenza anche la sequenza inversa della tensione di alimentazione è nulla. Dalla trasformazione inversa delle componenti si ottengono le espressioni delle tensioni da fornire alle fasi per far circolare le due correnti cercate:

$$\bar{V}_b = \frac{I_s}{\sqrt{3}} \left( \bar{Z}_p e^{j\frac{\pi}{6}} + \bar{Z}_0 e^{-j\frac{\pi}{6}} \right) \quad (7.3a)$$

$$\bar{V}_c = \frac{I_s}{\sqrt{3}} \left( \bar{Z}_p e^{j\frac{\pi}{2}} + \bar{Z}_0 e^{-j\frac{\pi}{6}} \right) \quad (7.3b)$$

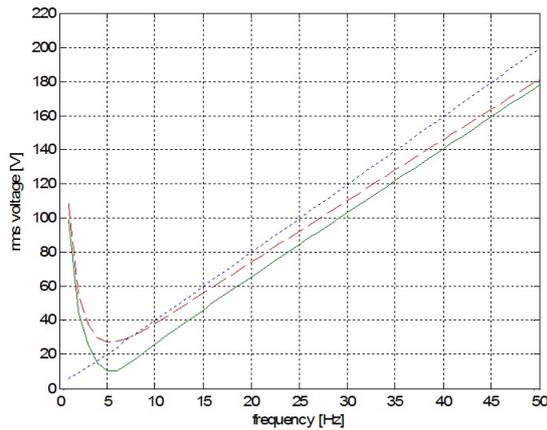
in cui  $\bar{Z}_p$  e  $\bar{Z}_0$  sono rispettivamente l'impedenza del motore diretta ed omopolare (l'inversa non è presente), mentre  $I_s$  è l'ampiezza della corrente di statore.

Dalle 7.3a e 7.3b e ricordando le espressioni delle impedenze  $\bar{Z}_p$  e  $\bar{Z}_0$  date dalle 7.2a e 7.2c, si fa notare che le tensioni sono funzione della pulsazione  $\omega$  dell'alimentazione, della  $s$  scorrimento del rotore e dell'ampiezza della corrente di statore  $I_s$ . Volendo eliminare la  $I_s$  dalle 7.3a e 7.3b, è possibile utilizzare la seguente relazione dedotta dal circuito equivalente nel riferimento rotante di rotore:

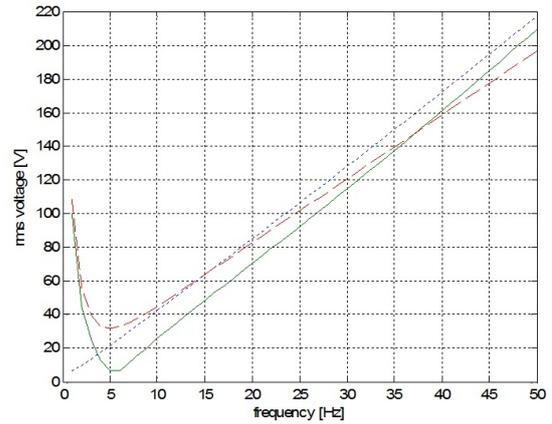
$$\frac{I_s}{\sqrt{3}} = \frac{\Lambda_r}{L_m \sqrt{2}} \sqrt{1 + \left( s\omega \frac{L_r}{R_r} \right)} \quad (7.4)$$

in cui  $\frac{I_s}{\sqrt{3}}$  è l'ampiezza della componente di sequenza diretta della corrente di statore ottenuta applicando la trasformazione simmetrica al vettore dato dalla 7.1. Sostituendo la 7.4 nelle 7.3a e 7.3b ed adattando i parametri del motore utilizzato nelle misure sperimentali è possibile ottenere le curve di Figura 7.5, che mostrano rispettivamente i valori efficaci delle tensioni di alimentazione  $V_b$  (Figura 7.5(a)) e  $V_c$  (Figura 7.5(b)) e lo sfasamento tra le due tensioni (Figura 7.5(c)), in funzione della frequenza di alimentazione per diversi valori di carico. Nelle Figure 7.5(a) e 7.5(b) è riportato anche l'andamento delle tensioni per il normale funzionamento (linea tratteggiata in blu).

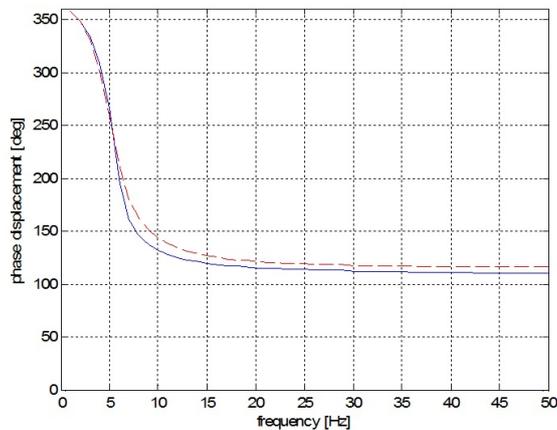
Per frequenze di alimentazione oltre 10Hz, le Figure 7.5(a) e 7.5(b), mostrano che il funzionamento per le due fasi con neutro collegato è simile a quello trifase senza guasto, le caratteristiche  $V/f$  sono ancora lineari, mentre la Figura 7.5(c) mostra che che lo sfasamento tra le due tensioni è quasi costante e abbastanza vicino ai  $120^\circ$  elettrici. Tuttavia, per le frequenze più basse le caratteristiche delle due fasi con neutro divergono dal funzionamento trifase per effetto dell'impedenza del centro dell'alimentazione.



(a) Andamenti dei moduli di  $V_b$  (linea continua nera),  $V_c$  (linea tratteggiata rossa), in funzione della frequenza e per  $s = 1\%$ .



(b) Andamenti dei moduli di  $V_b$  (linea continua nera),  $V_c$  (linea tratteggiata rossa), in funzione della frequenza e per  $s = s_n = 6,7\%$ .



(c) Andamenti degli sfasamenti di  $V_c$  rispetto a  $V_b$ , in funzione della frequenza e per  $s = 1\%$  (linea tratteggiata rossa) ed  $s = s_n = 6,7\%$  (linea continua blu).

Figura 7.5: Andamenti dei moduli e sfasamenti per le due tensioni di alimentazione del motore in caso di guasto.

### 7.3 Risultati sperimentali.

Il motore asincrono trifase usato per la sperimentazione riporta i seguenti dati di targa:

**Potenza nominale:**  $P_n = 3kW$ ;

**Tensione nominale:**  $V_n = 380V$ ;

**Corrente nominale:**  $I_n = 7,3A$ ;

**Frequenza nominale:**  $f_n = 50Hz$ ;

**Velocità nominale:**  $N_n = 1400giri/min$ ;

**Rendimento nominale:**  $\eta_n = 76\%$

Eseguendo la caratterizzazione del motore sono dedotti i relativi parametri stimati:

**Resistenza di statore:**  $R_s = 1,95\Omega$ ;

**Resistenza di rotore:**  $R_r = 1,68\Omega$ ;

**Induttanza di statore:**  $L_s = 243mH$ ;

**Induttanza di dispersione:**  $L_{\sigma s} = 10,5mH$ ;

**Induttanza di magnetizzazione:**  $L_m = 233mH$ ;

**Induttanza di rotore:**  $L_r = 244mH$ ;

**Flusso di magnetizzazione:**  $\Lambda_m = 0,85Wb$ ;

**Flusso di rotore:**  $\Lambda_r = 0,75Wb$ .

Il motore è calettato in asse con un torsiometro per la misura di coppia e con un freno ad isteresi. Il controllo del sistema è affidato ad una scheda (kit evaluation board) della Texas Instruments equipaggiata con il DSP TMS320F2812. La frequenza della PWM, che coincide con la frequenza di campionamento del DSP è di 10kHz. La scheda del DSP è connessa al PC per la programmazione ed ad una scheda di interfaccia, sviluppata e costruita per lo scopo, per adattare i segnali provenienti dal DSP al livello di tensione dei driver per l'inverter. Si sono misurate le correnti attraverso delle sonde ad effetto Hall collegate ad un oscilloscopio digitale, al quale è stato collegato anche il segnale proveniente dal trasduttore di coppia.

La legge  $V/f$  rispondere alla necessità di lavorare con flusso costante, nel nostro caso si ottengono caratteristiche diverse per la fase b e per la fase c, per effetto del contributo dell'impedenza RC del centro dell'alimentazione. Le due caratteristiche vengono approssimate dalle seguenti espressioni:

$$V_b = K_{1b} + K_{2b}f \quad (7.5a)$$

$$V_c = K_{1c} + K_{2c}f \quad (7.5b)$$

dove  $f$  è la frequenza di alimentazione. Per esempio, i coefficienti calcolati per  $s = 5\%$  sono:

$$K_{1b} = -15,5V$$

$$K_{2b} = 4,22V/Hz$$

$$K_{1c} = 5,9V$$

$$K_{2c} = 3,7V/Hz$$

Lo sfasamento di  $V_c$  rispetto a  $V_b$  è approssimato da una funzione quadratica, che meglio si adatta all'andamento in funzione della frequenza:

$$\theta = K_{1\theta} + K_{2\theta}f + K_{3\theta}f^2 \quad (7.6)$$

I coefficienti calcolati per  $s = 5\%$  sono:

$$K_{1\theta} = -15,5139,7^\circ$$

$$K_{2\theta} = -1,53^\circ/Hz$$

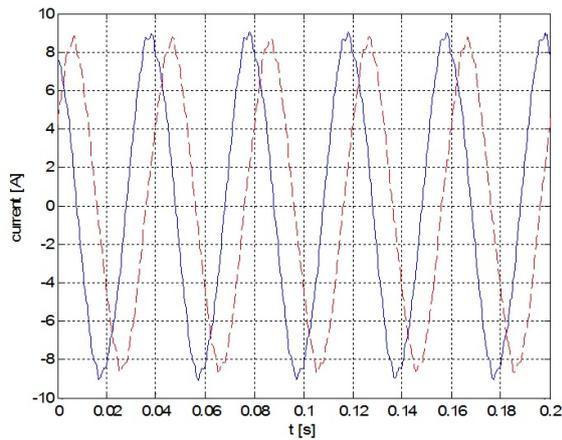
$$K_{3\theta} = 0,022^\circ/Hz^2$$

Durante il funzionamento in caso di guasto le equazioni 7.5a, 7.5b e 7.6 sono usate per determinare le forme d'onda delle tensioni di riferimento a catena aperta, per l'inverter, che è controllato da una PWM a sottoscillazione sinusoidale. Sperimentalmente sono state sviluppate anche altre PWM vettoriali, ad onda simmetrica e asimmetrica, che forniscono gli stessi risultati della PWM a sottoscillazione sinusoidale.

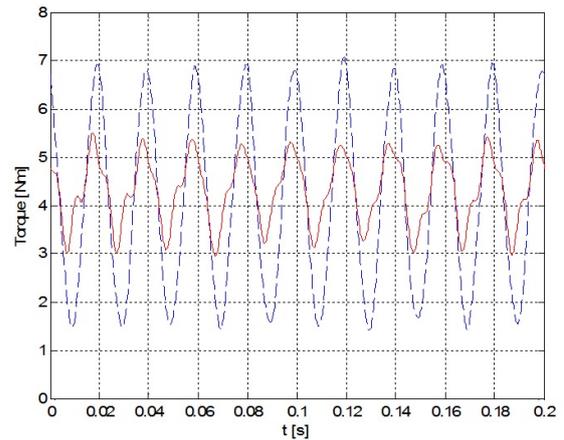
Le forme d'onda delle correnti e della coppia, registrate da un oscilloscopio digitale, con una frequenza di alimentazione di 25Hz e velocità del motore pari a 710giri/min, sono riportate in Figura 7.6. La Figura 7.6(a) riporta gli andamenti delle correnti, si vede che queste hanno valore del modulo molto simile e risultano sfasate di  $60^\circ$  circa. La Figura 7.6(b), in cui è riportato l'andamento della coppia in caso di guasto con e senza il controllo proposto, si nota che l'ondulazione di coppia è più che dimezzata rispetto alla situazione in cui non è stato attuato alcun intervento.

Purtroppo, a causa dell'alimentazione asimmetrica fornita al motore, il controllo in anello aperto rende più difficile controllare le ampiezze delle correnti ed è ancora più difficile controllare il loro sfasamento che dovrebbe essere fisso sui  $60^\circ$  elettrici. In realtà il valore efficace delle due correnti,  $i_b$  ed  $i_c$ , mostrate in Figura 7.6(a) è 6,2A e 5,8A, rispettivamente, ed il loro sfasamento è di circa  $70^\circ$  elettrici, questo spiega perché l'ondulazione di coppia è ancora abbastanza elevata.

La presenza di misure di corrente richieste dal metodo implementato per la diagnosi del guasto



(a) Correnti assorbite dal motore;  $i_b$  linea continua blu ed  $i_c$  linea tratteggiata rossa.



(b) Andamenti della coppia in caso di guasto senza variazioni sul controllo (linea tratteggiata in blu) e con il controllo proposto (linea continua rossa).

Figura 7.6: Andamenti di correnti e coppia.

consentirebbe l'impiego di tecniche di controllo basate su regolatori di corrente (come il controllo vettoriale) o controllo diretto di coppia. Naturalmente queste tecniche andrebbero ulteriormente a migliorare le prestazioni dell'azionamento in condizioni di guasto. Tuttavia, per l'applicazione considerata si sono volute evitare complicazioni eccessive del controllo. Il vantaggio della soluzione proposta è quella di dare al motore la possibilità di operare con prestazioni accettabili per un periodo limitato in condizioni di emergenza, senza l'impiego di sofisticati sistemi di controllo.

## Capitolo 8

# Conclusioni.

Sulla spinta di un sempre maggiore interesse, da parte dell'opinione pubblica, per soluzioni tecnologiche che abbiano un impatto ambientale modesto, nel settore dei trasporti e nei veicoli adibiti al trasporto di persone o cose in particolare si sta diffondendo rapidamente l'adozione della propulsione elettrica. In questo ambito il maggiore ostacolo è, da sempre, l'immagazzinamento dell'energia. I recenti progressi tecnologici dei dispositivi di accumulo dell'energia elettrica (accumulatori al litio, batterie ZEBRA, ecc.), associati all'evoluzione delle celle a combustibile hanno fatto guadagnare terreno alla propulsione elettrica riducendo il divario di competitività che essa aveva nei confronti della propulsione con motore endotermico.

L'obiettivo dell'attività della ricerca conseguito è stato lo studio, la definizione, la progettazione e la costruzione del sistema elettrico, avente una cella a combustibile come fonte primaria di energia, destinato alla propulsione di una piccola imbarcazione. Poiché in certe condizioni di funzionamento l'energia fornita dalla cella a combustibile non è in grado di sopperire all'intero fabbisogno della propulsione (per esempio quando il propulsore richiede picchi di energia) e al fine di dotare il sistema della capacità di recuperare energia è stato inserito anche un accumulatore in grado di svolgere questa funzione. Il difetto principale delle celle a combustibile è costituito dalla rilevante variazione della sua tensione di uscita in funzione della corrente erogata (carico), l'escursione può raggiungere anche il 50% tra funzionamento a vuoto e a pieno carico. Si deve introdurre dunque un convertitore che regoli la tensione del DC-link mantenendola il più costante possibile o almeno all'interno di un intervallo definito a priori in base alle esigenze dell'azionamento di propulsione. Dopo una approfondita analisi di alcuni schemi alternativi è stata scelta la configurazione comprendente un unico convertitore inserito tra la cella a combustibile e il DC-link mentre l'accumulatore è stato collegato direttamente al DC-link. Una oculata gestione dei flussi di energia inoltre garantisce la massima autonomia possibile mantenendo ingombri e pesi adeguati per l'applicazione su piccole imbarcazioni.

La realizzazione sperimentale del sistema di propulsione è stata ottenuta assemblando, per quanto possibile, componenti commerciali reperibili sul mercato con lo scopo di limitare la costruzione di apparecchiature specifiche al solo convertitore elettronico dc/dc che interfaccia la cella a combustibile con il DC-link. La cella a combustibile è stata resa disponibile dal Dipartimento di Energetica dell'Università di Trieste, il fuoribordo comprendente l'azionamento di propulsione è stato acquistato da un'azienda americana (una delle poche nel cui catalogo è inserito un propulsore marino con motore a magneti permanenti), infine gli accumulatori sono quelli al piombo tradizionalmente usati nei veicoli. L'efficacia dello schema scelto e le funzionalità del convertitore elettronico dc-dc e del suo algoritmo di controllo sono state verificate tramite simulazioni numeriche, la progettazione esecutiva e la costruzione del convertitore elettronico sono state realizzate con la collaborazione di una azienda del settore operante presso l'Area di Ricerca di Trieste, infine l'algoritmo di controllo è stato implementato su una scheda con DSP della Texas Instrument dopo esser stato elaborato per mezzo di un opportuno sistema di sviluppo.

L'applicazione oggetto di questo studio comporta un elevato grado di affidabilità garantendo il funzionamento della propulsione, eventualmente con modalità operativa degradata, anche in caso di guasto (l'uso della forza muscolare umana e dei remi deve rappresentare l'estrema risorsa in caso di malfunzionamento). Il convertitore di propulsione è considerato l'apparecchiatura maggiormente soggetta a guasti per cui sono state studiate delle metodologie grazie alle quali sono state limitate le conseguenze di un guasto (capacità di tolleranza ai guasti).

## 8.1 Sviluppi futuri.

Nell'immediato futuro si intende assemblare su un banco prova tutti i componenti del sistema di propulsione dell'imbarcazione. La verifica del funzionamento avrà l'obiettivo di risolvere eventuali problemi di compatibilità tra i componenti, affinare il software dell'algoritmo di controllo del convertitore, il software di gestione del flusso di energia e quello di supervisione che sovrintende al funzionamento dell'intero sistema di propulsione.

Una volta messo a punto al banco, il sistema di propulsione verrà installato su una piccola imbarcazione per le prove finali in mare.

Infine in relazione alla metodologia adottata per la tolleranza ai guasti dell'azionamento di propulsione si vuole integrare l'algoritmo proposto all'interno del software di controllo dell'azionamento stesso.

# Bibliografia

- [1] R. Lawton, J. F. Bash, S. M. Barnett, Marine Application of Fuel Cells, 2002, *IEEE*;
- [2] James Larminie, Andrew Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, Second Edition, Wiley, Reprinted November 2006;
- [3] C. C. Chan, The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles, Proceedings of the IEEE, Vol. 90, N° 2, February 2002, *IEEE*;
- [4] Caisheng Wang, M. Hashem Nehrir, Load Transient Mitigation for Stand-Alone Fuel Cell Power Generation Systems, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, N° 4, December 2007, *IEEE*;
- [5] Ali Emadi, Kaushik Rajashekara, Sheldon S. Williamson, Srdjan M. Lukic, Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 54, N° 3, May 2005, *IEEE*;
- [6] Haile, S.M.; *Acta mater.* 2003, 51(19), 5981-6000;
- [7] Carette L., Friedirch A., Stimming U.; *Chemphyschem.* 2000, 1, 161-193;
- [8] X. Yu, M. R. Starke, L. M. Tolbert, B. Ozpineci, Fuel cell power conditioning for electric power applications: a summary, IET Electric Power Appl., Vol. 1, N° 5, September 2007;
- [9] Morten Nymand, Michael A. E. Andersen, Higt-efficiency isolated boost DC-DC converter for higt-power low-voltage fuel-cell applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, N° 2, February 2010, *IEEE*;
- [10] Ali Emadi, Sheldon S. Williamson, Alireza Khaling, Power Electronics Intensive Solutions for Advanced Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicular Power Systems, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, N° 3, May 2006;
- [11] <http://rivistamotor.com/tecnica/tecnica9.htm>;
- [12] [http://demenziale.altervista.org/idrogeno/batterie\\_veicoli\\_ibridi.php](http://demenziale.altervista.org/idrogeno/batterie_veicoli_ibridi.php);
- [13] [http://www.aei.it/ita/museo/mp1\\_agen.htm](http://www.aei.it/ita/museo/mp1_agen.htm);
- [14] <http://www.project-italia.com/Ita/info.htm>;
- [15] Michael Faraday, *The project Gutenberg e book, experimental researches in electricity*, volume 1, Philosophical Transactions of 1831-1838.
- [16] [http://www.elettricoplus.it/temi/Tecnologia\\_Elettrica/articoli/I\\_supercondensatori.aspx](http://www.elettricoplus.it/temi/Tecnologia_Elettrica/articoli/I_supercondensatori.aspx);
- [17] <http://www.stampolampo.it/dblog/articolo.asp?articolo=125>;

- [18] <http://www.energoclub.it/doceboCms/page/264/Supercapacitori.html>.
- [19] T. J. E. Miller, *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Driver*, Oxford Science Publications, Clarendon Press (Oxford), 1989;
- [20] JW Finch and HMB Metwally, Control aspects of brushless drives using switched reluctance motors, University of Newcastle upon Tyne, UK Zagazig University, Egypt;
- [21] M. J. V. Wimshurst, Variable Frequency Drives - Application to Ships Propulsion Systems, 2002, *IEEE*;
- [22] Namhun Kim, Hamid A. Toliyat, Issa M. Panahi, Min-Huei Kim, BLDC Motor Control Algorithm for Low-Cost Industrial Applications, 2007, *IEEE*;
- [23] D. A. Philips, Switched Reluctance Drives: New Aspacts, 1989, *IEEE*;
- [24] C. Pollock, A. Michaelides, Switched Reluctance Drives: a comparative evaluation, December 1995, *Power Engineering Journal IEEE*;
- [25] Avoki M. Omekanda, Bruno Lequesne, Harald Klode, Suresh Gopalakrishnan, Iqbal Husain, Switched reluctance and permanent magnet brushless motors in highly dynamic situation: A comparison in the context of electric brakes, 2006, *IEEE*;
- [26] James R. Hendershot, AC, Brushless, Switched Reluctance Motor Comparison, *Magna Physics Corporation*;
- [27] Ali Emadi, Mehrdad Ehsani, John M. Miller, *Vehicular Electric Power Systems: Land, Sea, Air and Space Vehicles*, Power Engineering, ABB Inc., 2004.

Typeset by L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X