

**POLITECNICO DI MILANO**

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

# **SVILUPPO DI UNO STIMATORE DI ENERGIA PER UN SISTEMA DI ACCUMULO AL PIOMBO**

Relatore: Prof. Enrico Tironi

Correlatore: Ing. Luigi Pellegrino

Tesi di laurea di:

Marco Vanoncini Matr. 841864

Anno accademico 2015/2016

## **Ringraziamenti**

Ringrazio per primo chi mi ha aiutato fisicamente nella stesura di questa tesi: il professore Enrico Tironi, il tutor Luigi Pellegrino e RSE che mi ha dato l'occasione di svolgere un tirocinio sperimentale.

Ringrazio la mia fidanzata che mi ha sostenuto lungo tutto il percorso di studi e senza la quale forse non sarei arrivato a concludere.

Ringrazio la mia famiglia che mi ha sostenuto anche economicamente.

Infine ringrazio i compagni di viaggio che ho incontrato lungo il mio percorso di studi e che hanno arricchito la mia persona.

## Sommario

Lo State-of-Energy (SoE) è un indicatore molto importante per la gestione efficiente di un accumulo ed è indispensabile per la pianificazione delle risorse di un sistema elettrico. La letteratura si è occupata per la maggior parte di stimare il SoE per le batterie dei veicoli elettrici, invece con questo lavoro di tesi si è realizzato uno stimatore dell'energia per un sistema di accumulo che svolge servizi ancillari alla rete. Lo stimatore realizzato non stima l'energia disponibile ai morsetti di batteria, ma ai morsetti dell'intero sistema di accumulo, in modo da tenere conto delle perdite dallo stadio di conversione che assumono un'importanza rilevante quando il regime di scarica o carica è basso.

Lo stimatore realizzato e la procedura adottata sono implementabili su qualsiasi tecnologia di accumulo elettrochimico; in particolare si è deciso di studiare in modo approfondito gli accumuli al piombo perché sono quelli, per ora, più diffusi, più sicuri e con una rete di distribuzione e smaltimento capillare. Lo stimatore realizzato si basa su un modello elettrico della batteria i cui parametri sono ricavati da prove di parametrizzazione sull'intera batteria. Lo stadio di conversione è stato trattato come una "black box" e caratterizzato attraverso una campagna di misure che considera tutto il suo range di funzionamento. L'intero lavoro è supportato dai risultati sperimentali ottenuti nei laboratori di RSE, che validano l'elevata precisione dello stimatore nel prevedere l'energia che il sistema di accumulo è in grado di erogare o assorbire dato un profilo di potenza attiva e reattiva da rispettare ai suoi morsetti.

Tramite uno stimatore di questo tipo il gestore della rete potrà usare in modo più efficiente l'intero sistema integrando meglio le fonti di energia rinnovabili.

*The State-of-Energy (SoE) is a very important index for the efficient management of storage system and is necessary for the planning of the resources in the electrical system. Many articles present SoE estimators for the batteries of electric vehicles; with this thesis it is developed an energy estimator for a storage system that performs ancillary services to the electrical network. The SoE estimator developed considers all the entire storage system, not only the battery, so it is taken into account the energy lost, by the AC/DC converter, which assume a significant importance, the charge or discharge current is low. The SoE estimator and the procedure adopted could be implemented on every kind of electrochemical technology. In particular, it was decided to consider leads batteries because they are the most established technology, the safest and they have an extensive distribution network and disposal.*

*The SoE estimator developed is based on a battery electric model whose parameters are evaluated by a parameterization test on the entire battery. The AC/DC converter has been considered as a "black box" and characterized through a measurement campaign throughout its operational range. The entire work is supported by the experimental results obtained in the laboratories of RSE, which validate the high precision of the estimator to predict the energy that the storage system is able to deliver or absorb at a given active and reactive power profile.*

*With the estimator developed, the system operator will manage efficiently the entire system integrating renewable sources in the best way.*

## Indice dei contenuti

sviluppo di uno stimatore di energia per un sistema di accumulo al piombo .....	1
Ringraziamenti.....	2
Sommario .....	3
Introduzione.....	11
1 Accumulo elettrochimico per applicazioni stazionarie .....	13
1.1 Tecnologie in commercio .....	13
1.1.1 Batterie al Litio .....	14
1.1.2 Batterie NaS .....	15
1.1.3 Batterie NaCl .....	17
1.1.4 Batterie redox .....	18
1.1.5 Batterie al piombo.....	20
1.2 Classificazione applicazioni .....	24
1.2.1 Applicazioni di breve durata .....	25
1.2.2 Applicazioni di media e lunga durata .....	26
2 Descrizione della Test Facility.....	29
2.1 Test-Facility.....	29
2.1.1 Laboratorio sistema di accumulo con batterie al piombo .....	33
3 Stimatore dello stato di energia.....	36
3.1 Indicatori di stato .....	36
3.2 Stato dell'arte.....	37
4 Modellizzazione della batteria .....	40
4.1 Batteria .....	40
4.2 Modello della batteria .....	41
4.3 Prove di caratterizzazione .....	50
4.4 Implementazione software .....	63
4.5 Validazione del modello della batteria.....	65

5	Modellizzazione stadio di conversione .....	72
5.1	Descrizione .....	72
5.1.1	Modello energetico .....	75
5.1.2	Prove sperimentali .....	84
5.1.3	Validazione del modello energetico dello stadio di conversione .....	92
6	Validazione dello stimatore .....	95
7	Conclusioni .....	99
	Bibliografia .....	100
	Appendice A .....	102
	Appendice B .....	103

## Indice delle figure

Figura 1 Cella agli ioni di litio: reazioni di carica e scarica .....	15
Figura 2 Cella batteria NaS: reazioni di carica e scarica.....	16
Figura 3 Cella NaCl: reazioni di carica e scarica .....	18
Figura 4 Schema batteria redox .....	19
Figura 5 Cella al piombo: reazioni di carica e scarica .....	21
Figura 6 Diversi andamenti della capacità a diverse temperature per le batterie VLA e VRLA .....	22
Figura 7 Influenza della temperatura sulla vita delle batterie al piombo .....	22
Figura 8 Capacità della batteria in relazione all'invecchiamento(espresso in percentuale della vita totale).....	23
Figura 9 applicazioni dei sistemi di accumulo in relazione alla loro modalità di utilizzo in tempo e potenza.....	25
Figura 10 Vista aerea della sede di RSE .....	31
Figura 11 Schema elettrico Test Facility.....	32
Figura 12 Interfaccia per la gestione della Test Facility da remoto.....	33
Figura 13 Batteria al piombo composta da 31 moduli in serie .....	35
Figura 14 Logica di funzionamento del SoE che si è realizzato .....	38
Figura 15 Input e output di un modello di una batteria.....	40
Figura 16 Shema rappresentativo di un modello stocastico .....	43
Figura 17 Modello RC .....	44
Figura 18 Modello PNGV generalizzato.....	45
Figura 19 modello dinamico.....	46
Figura 20 Modello $R_{INT}$ .....	48
Figura 21 Modello DP.....	49
Figura 22 Accuratezza in rapporto agli oneri computazionali dei modelli presi in considerazione..	50
Figura 23 Cadute di tensione sul modello DP che modificano la tensione di cella proporzionalmente alla corrente.....	51
Figura 24 Andamento della tensione e della corrente del modulo 1 durante la scarica completa.....	52
Figura 25 Dipendenza della capacità disponibile,della batteria in oggetto, in funzione della corrente erogata .....	54
Figura 26 Andamento della tensione e della corrente durante la prova di parametrizzazione .....	55
Figura 27 Andamento della tensione di cella nel tempo in risposta ad un gradino di corrente.....	56

Figura 28 Andamento della media di $R_1$ dei moduli al variare della corrente di parametrizzazione e del SoC .....	58
Figura 29 Andamento del parametro $C_1$ per tutti i moduli ottenuto dalla parametrizzazione a 15 A	60
Figura 30 Andamento del parametro $C_2$ per tutti i moduli ottenuto dalla parametrizzazione a 15 A	61
Figura 31 Andamento del parametro $R_0$ per tutti i moduli ottenuto dalla parametrizzazione a 15 A	61
Figura 32 Andamento del parametro $R_1$ per tutti i moduli ottenuto dalla parametrizzazione a 15 A	62
Figura 33 Andamento del parametro $R_2$ per tutti i moduli ottenuto dalla parametrizzazione a 15 A	62
Figura 34 Logica con cui vengono individuati i parametri ad un determinato SoC e I.....	64
Figura 35 Andamento del parametro $R_0$ calcolato a 45 A per moduli con capacità diversa.....	64
Figura 36 Andamento della OCV del modulo 1 in funzione del SoC .....	65
Figura 37 Tool per la stima iniziale del SoC.....	66
Figura 38 Implementazione del rendimento amperometrico in Simulink®.....	67
Figura 39 Modello batteria con cadute di tensione durante la carica.....	68
Figura 40 Andamento del coefficiente $k$ , che moltiplica il valore dei parametri resistivi in carica, in funzione del SoC .....	69
Figura 41 Prova di carica e scarica a diverse correnti (con corrente positiva la batteria è in scarica, con corrente negativa in carica). Lo scarto quadratico medio della tensione di batteria alla fine della prova è 1,4 V .....	70
Figura 42 Prova di parametrizzazione a 15 A. Lo scarto quadratico medio della tensione di batteria alla fine della prova è 1,36 V.....	70
Figura 43 Prova di parametrizzazione a 30 A. Lo scarto quadratico medio della tensione di batteria alla fine della prova è 2,7 V.....	71
Figura 44 Prova di parametrizzazione a 45 A. Lo scarto quadratico medio della tensione di batteria alla fine della prova è 1,7 V.....	71
Figura 45 Schema elettrico semplificato del laboratorio batterie al piombo .....	73
Figura 46 Armadio laboratorio batterie al piombo con inverter, filtro LC e trasformatore .....	74
Figura 47 Circuito equivalente inverter .....	76
Figura 48 Modulazione PWM sinusoidale .....	78
Figura 49 Circuito equivalente del trasformatore .....	83
Figura 50 Configurazione trasformatore in corto circuito .....	84
Figura 51 Schema del sistema con evidenziati i punti .....	85
Figura 52 Curve caratteristiche standard $Q=f(V)$ (CEI 0-21 2016-07).....	86
Figura 53 Modello energetico sistema di conversione.....	86
Figura 54 Bilancio potenze ai morsetti del trafo .....	88



Figura 55 Potenza reattiva assorbita dal trafo in funzione della corrente circolante in 4 .....	89
Figura 56 Potenza attiva persa dal trafo in funzione della corrente circolante in 4.....	90
Figura 57 Potenza attiva erogata dall'inverter in funzione del set point di potenza reattiva richiesta .....	91
Figura 58 Potenza continua ai morsetti di batteria data la potenza trifase misurata ai morsetti dell'inverter .....	91
Figura 59 Corrente stimata e misurata ai morsetti di batteria. Lo scarto quadratico medio della corrente di batteria alla fine della prova è 0,7 A.....	92
Figura 60 Prova di parametrizzazione a 15 A. Lo scarto quadratico medio della corrente di batteria alla fine della prova è 0,08 A.....	93
Figura 61 Prova di parametrizzazione a 30 A. Lo scarto quadratico medio della corrente di batteria alla fine della scarica è 0,25 A .....	93
Figura 62 Prova di parametrizzazione a 45 A. Lo scarto quadratico medio della corrente di batteria alla fine della scarica è 0,29 A .....	94
Figura 63 Set point di potenza attiva e reattiva ai morsetti di rete (per valori positivi la potenza esce dal sistema, per valori negativi entra) .....	96
Figura 64 Confronto tra energia stimata e energia misurata per la prova riportata in Figura 63. Errore 5% .....	96
Figura 65 Set point di potenza attiva e reattiva ai morsetti di rete (per valori positivi la potenza esce dal sistema, per valori negativi entra) .....	97
Figura 66 Confronto tra energia stimata e energia misurata per la prova riportata in Figura 65. Errore 1% .....	97

## Indice delle tabelle

Tabella 1 Prestazioni delle principali tecnologie di accumuli elettrochimici in commercio .....	14
Tabella 2 Caratteristiche tecniche moduli del laboratorio batterie al piombo .....	34
Tabella 3 caratteristiche tecniche modulo .....	41
Tabella 4 Capacità moduli .....	53
Tabella 5 Andamenti di tutti i parametri in funzione della corrente e del SoC. Per le curve di interpolazione tra SoC 0,9 e 1 di $R_0$ e $R_1$ si rimanda all' Appendice A. ....	59
Tabella 6 Rendimenti amperometrici .....	68
Tabella 7 Dati tecnici inverter <i>AFE OPDE S70 - TDE MACNO</i> .....	72

## Acronimi

FER: Fonti di Energia Rinnovabile.

VLA: Vented Lead Acid (batterie al piombo aperte).

VRLA: Valve regulated Lead Acid (batterie al piombo ermetiche).

AGM: Absorbed Glass Material (tipo particolare di batterie al piombo ermetiche in cui l'elettrolita è assorbito in un supporto microporoso come fibra di vetro).

GEL: tipo particolare di batterie al piombo ermetiche in cui l'elettrolita è assorbito in un supporto tipo gel.

SoC: State of Charge (stato di carica).

SoE: State of Energy (stato di energia).

DoD: Depth of Discharge (profondità di scarica).

OCV: Open Circuit Voltage (tensione a circuito aperto).

## Introduzione

Nell'ultima decade il pianeta ha visto aumentare notevolmente il fabbisogno energetico, soprattutto a causa dello sviluppo dei mercati asiatici. Ciò non ha fatto altro che accentuare il problema del riscaldamento globale dovuto alla produzione di energia tramite le fonti fossili. Una maggior sensibilità della popolazione a questo tema e il rischio di un ulteriore innalzamento repentino della temperatura ha portato vari stati, tra cui l'Italia, a sostenere con forza politiche che incentivassero la produzione di energia tramite fonti rinnovabili. Gli ultimi anni hanno visto quindi un notevole aumento di centrali di questo tipo (soprattutto fotovoltaiche ed eoliche) che hanno modificato profondamente il mercato dell'energia. Lo sconvolgimento, per quanto riguarda in particolare l'Italia, è stato epocale e va dal livellamento del costo dell'energia nelle varie fasce orarie, al cambiamento della logica di gestione dell'intera rete. Infatti le fonti energetiche rinnovabili hanno goduto di incentivi fiscali, che hanno causato un aumento della potenza installata in pochi anni. Il 19-09-2016 Enel ha annunciato che chiuderà 23 centrali termoelettriche che equivalgono a circa 25 GW. Notizia a dimostrazione del fatto che la potenza installata di FER (fonti energetiche rinnovabili) è aumentata così tanto da escludere dal mercato centrali termoelettriche (che oggi sono costrette a lavorare per poche ore equivalenti annue per i loro standard).

Le fonti rinnovabili, non controllabili a differenza delle vecchie centrali termoelettriche, hanno una produzione difficilmente prevedibile e irregolare che richiede la presenza di qualche altra centrale pronta ad intervenire nel caso in cui la loro produzione cali improvvisamente. I problemi di rete sorgono non solo in caso di mancata produzione, ma anche nel caso di sovrapproduzione: al sud, nei mesi più soleggiati, nelle giornate particolarmente ventose oppure nei momenti della giornata (pausa pranzo) in cui non c'è un grande consumo, si verificano congestioni di rete. Esse causano fenomeni di *courtement*: cioè diminuzione della produzione di energia. Questo può essere un grave danno per il produttore da fonti rinnovabili che sostiene grandi investimenti iniziali per poi produrre a costi bassissimi, poiché non ha nessuna spesa per approvvigionarsi il combustibile.

In questo panorama trovano un logico impiego gli accumuli, che sono in grado di funzionare da "polmone", immagazzinando energia quando essa è prodotta in eccesso e restituendola quando le circostanze causano una diminuzione della produzione. Gli accumuli di tipo elettrochimico sono di particolare efficacia per la loro densità di energia e scalabilità e duttilità di utilizzo; infatti possono passare da assorbimento a erogazione di energia in tempi impensabili per altre fonti. Per una efficace integrazione degli accumuli nel sistema è tuttavia necessario essere a conoscenza in modo preciso dell'energia immagazzinata nelle batterie, in modo che si possa tenere conto di tale energia

nel mercato elettrico del giorno prima e gestire con più efficienza l'intero parco centrali nazionale ottimizzando risorse e costi. Non è facile stimare con esattezza tale energia poiché i parametri su cui ci si può basare sono fortemente variabili nel tempo, in modo non lineare, a seconda dello stato di funzionamento. Per questo motivo si è deciso di intraprendere uno studio sullo State of Energy (SoE) delle batterie al piombo per applicazioni stazionarie, in modo che attraverso un semplice tool sia possibile stimare l'energia presente nel proprio sistema di accumulo e prevedere come e per quanto tempo esso sarà in grado di soddisfare una determinata curva di carico.

La tesi dunque seguirà questo schema: nel capitolo 1 sono presentate le varie tipologie di accumulo elettrochimico presenti sul mercato e sono esposti i vantaggi e gli svantaggi di ogni tecnologia, evidenziando il motivo per cui si è deciso di concentrare gli studi sugli accumuli al piombo. Nel capitolo 2 è descritta la Test Facility di RSE illustrando in dettaglio la composizione del laboratorio batterie al piombo, oggetto su cui si è realizzato lo stimatore. Nel capitolo 3 si riporta una ricerca bibliografica sugli indicatori di stato. Successivamente si illustra la tipologia di stimatore adottato e la sua logica di funzionamento che si basa sul modello della batteria.

Nel capitolo 4 è descritta in dettaglio la batteria usata per le prove in laboratorio e sempre facendo riferimento alla bibliografia esistente si esporranno le varie tipologie di modelli con cui si può rappresentare una batteria illustrando i punti di forza e di debolezza di ognuno e i motivi che hanno portato alla scelta di adottare il modello elettrico del secondo ordine. In seguito sono esposte le prove eseguite per determinare i parametri della batteria e i risultati sperimentali.

Nel capitolo 5 si è realizzato un modello energetico dello stadio di conversione che consideri tutte le perdite. In particolar modo si è analizzato il rendimento dell'inverter, del filtro LC e del trasformatore. Alla fine di questo capitolo sono presentate le prove fatte per parametrizzare il sistema e i risultati ottenuti.

Nel capitolo 6 è mostrato il software usato per simulare il funzionamento del SoE in Simulink®, la sua implementazione in laboratorio con Labview® e i risultati ottenuti dalle prove di validazione.

La metodologia di lavoro può comunque essere adottata anche per altre tipologie di accumulo elettrochimico.

# 1 Accumulo elettrochimico per applicazioni stazionarie

In questo capitolo si esporranno le varie tipologie di accumuli elettrochimici presenti sul mercato illustrando i pregi e i difetti di ogni tecnologia. Si chiarirà il motivo per cui, tra le tante possibilità, si è deciso di elaborare uno stimatore di energia proprio per le batterie al piombo: una scelta che potrebbe sembrare anacronistica in un contesto in cui le batterie al litio sono sempre più diffuse e performanti, ma che ha le sue motivazioni soprattutto nella capillare diffusione che la rete di produzione e di smaltimento di tali batterie ha sul mercato. Infatti, la solidità della catena produttiva e la conoscenza ormai centenaria di tale tecnologia permette di avere costi contenuti e buone prestazioni per applicazioni di tipo stazionario. In conclusione verranno esposte i principali servizi che un accumulo di questo tipo può fornire alla rete.

## 1.1 Tecnologie in commercio

In commercio esistono svariate tipologie di accumuli elettrochimici e, anche se ogni sistema ha le sue peculiarità, per la maggior parte sono concettualmente simili. Essi sono tutti costituiti da due elettrodi, anodo (elettrodo negativo) e catodo (elettrodo positivo), costituiti dai materiali di reazione e immersi in un elettrolita che permette la conduzione ionica. Tra anodo e catodo è inoltre posto un separatore che non lascia passare gli elettroni, ma è permeabile agli ioni. L'energia immagazzinata o erogata dai generatori elettrochimici deriva dalle reazioni di ossidoriduzione al loro interno, in cui una specie chimica (riducente) perde elettroni e si ossida e una seconda specie chimica (ossidante) acquista gli elettroni persi dal riducente e quindi si riduce. Ogni reazione di ossidoriduzione spontanea può essere potenzialmente una sorgente di energia elettrica. Per sfruttarla è necessario costruire un circuito esterno che permetta di intercettare il flusso di elettroni attraverso un conduttore che collega i due elettrodi dove si genera differenza di potenziale. In alcuni casi, applicando un campo elettrico dall'esterno è possibile invertire il percorso degli elettroni e il verso della reazione, riportando il sistema nello stato iniziale e trasformando l'energia elettrica in energia chimica [1]. Nel corso degli anni sono state adottate diverse soluzioni per i materiali anodici, catodici ed elettrolitici, in quanto la scelta di tali materiali influenza fortemente le prestazioni quali la potenza specifica, l'energia specifica, la vita utile e la sicurezza [2].

Così accanto alle batterie classiche come quelle al piombo si sono diffuse altre tecnologie come quelle al litio, batterie a flusso di elettrolita o batterie ad alta temperatura come le NAS o le NACL. Di seguito verranno analizzati i principi di funzionamento di ogni tecnologia e i principali vantaggi e svantaggi per le applicazioni attuali.

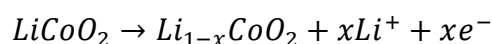
Accumulo	Potenza specifica [W/kg]	Energia specifica [Wh/kg]	Efficienza energetica [%]	Efficienza amperometrica	Autoscarica mensile [%]	Vita attesa (cicli)
Piombo	20÷40 VLA 70÷80 VRLA	15÷25 VLA 20÷50 VRLA	70÷90	80	1÷2	500
NAS	150÷230	150÷250	89	100	0	4500
NACI	170	160	90	100	0	3000-3500
Redox	100	10÷30	70÷90	80÷90	0 sistema fermo 100 sistema in stand-by	10.000÷12.000
Litio	75÷3000	40÷200	80÷98	100	0	>3000

Tabella 1 Prestazioni delle principali tecnologie di accumuli elettrochimici in commercio

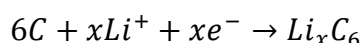
### 1.1.1 Batterie al Litio

Una batteria al litio è composta da sottili strati costituenti il catodo, il separatore e l'anodo, immersi in un elettrolita che permette il trasporto degli ioni litio. Il catodo è solitamente costituito da un ossido litiato di un metallo di transizione, come nichel, cobalto o manganese, che garantisce una struttura a strati o a tunnel dove gli ioni litio possono essere inseriti ed estratti facilmente. L'anodo è generalmente costituito da grafite allo stato litiato, in cui ogni atomo è legato ad altri tre in un piano composto di anelli esagonali fusi assieme. L'elettrolita è composto tipicamente da sali di litio, come l'esaffluorofosfato di litio (LiPF<sub>6</sub>), disciolti in una miscela di solventi organici (carbonato di dimetile e di etilene) e la membrana separatrice è costituita normalmente da polietilene o polipropilene.

In tutte le batterie al litio, durante le reazioni di ossidoriduzione associate ai processi di carica e scarica, gli ioni litio migrano da un elettrodo all'altro reversibilmente. Quando la cella è completamente scarica tutto il litio presente è contenuto nel catodo. Durante il processo di carica dell'accumulatore gli ioni di litio vengono estratti dall'ossido metallico costituente il catodo e trasferiti all'anodo, mentre gli elettroni migrano dal catodo all'anodo attraverso il circuito esterno. Il catodo viene quindi ossidato secondo la seguente relazione (con x compreso tra 0 e 1):



All'anodo, il processo di carica determina l'intrappolamento dello ione litio, che si riduce a litio nella matrice di grafite acquisendo gli elettroni provenienti dal circuito esterno.



Dunque la reazione complessiva è:

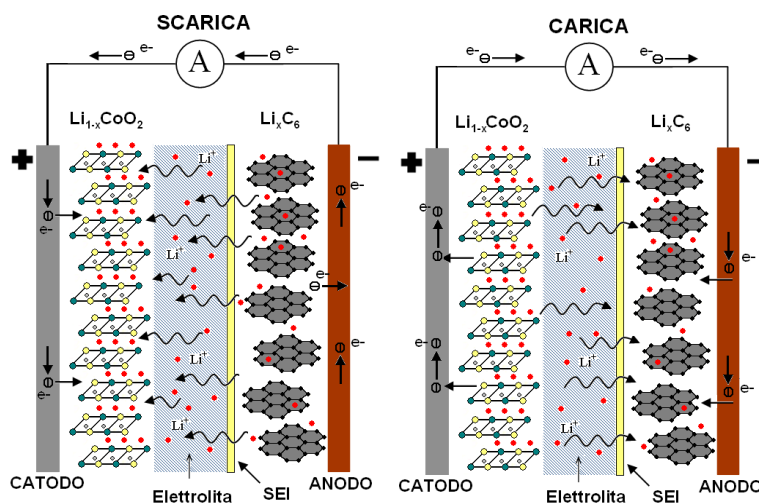
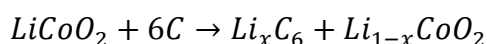


Figura 1 Cella agli ioni di litio: reazioni di carica e scarica

Uno dei principali vantaggi della batteria al litio è proprio che le reazioni che avvengono in essa non coinvolgono direttamente gli elettrodi; infatti il processo di carica e scarica si basa sull'intercalazione degli ioni di litio negli elettrodi stessi, aumentandone o diminuendone la concentrazione [1]. Ciò consente a questi accumuli di avere un degrado molto lento (alto numero di cicli di vita) [2] e di non risentire dell'effetto memoria, sopportando cicli di carica molto flessibili. Questo vantaggio insieme al fatto che il litio è un elemento molto leggero e piccolo rende le batterie al litio la tecnologia più promettente tra gli accumuli elettrochimici soprattutto nel campo dell'automotive e dell'elettronica di consumo. Infatti, grazie alla sua leggerezza può raggiungere elevate densità di energia.

### 1.1.2 Batterie NaS

Le batterie sodio/zolfo fanno parte delle batterie ad alta temperatura. Infatti la cella lavora a una temperatura di circa 300°C. La temperatura elevata serve a mantenere gli elettrodi allo stato liquido e aumentare la conducibilità dell'elettrolita ceramico di solito costituito di  $\beta^n$ -allumina drogata con ossidi. Questo consente di raggiungere una densità più alta di energia (quattro volte quella del piombo) usando comunque materie prime a basso costo. Di seguito il principio di funzionamento di una cella sodio/zolfo durante una scarica e una carica.

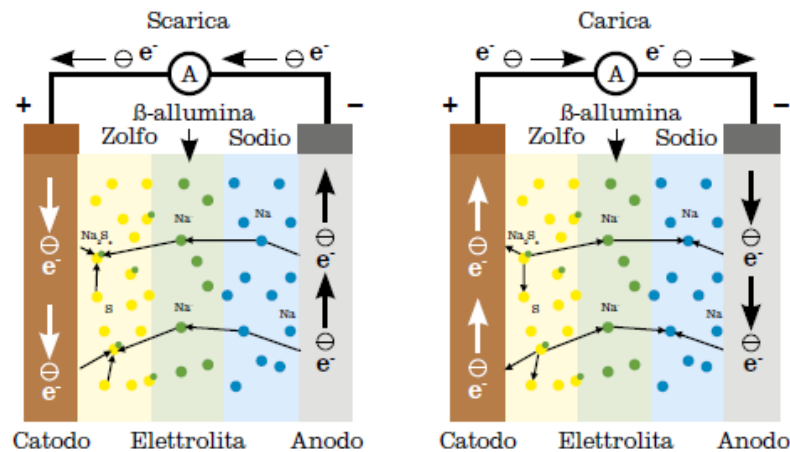
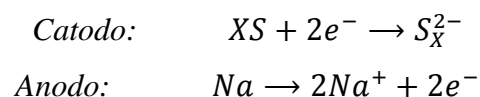


Figura 2 Cella batteria NaS: reazioni di carica e scarica

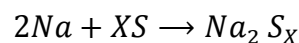
Nelle batterie sodio/cloruri metallici durante le reazioni di ossidoriduzione associate ai processi di carica e scarica, gli ioni sodio migrano reversibilmente da un elettrodo all'altro.

Durante la scarica, in corrispondenza della superficie di contatto sodio-elettrolita, il sodio viene ossidato liberando elettroni. Gli ioni sodio, attraverso l'elettrolita, migrano verso il comparto catodico, dove gli elettroni provenienti dal circuito esterno riducono il cloruro di nichel formando cloruro di sodio e nichel. Durante la carica le reazioni descritte procedono in senso inverso.

Le reazioni che avvengono sugli elettrodi sono [1]:



La reazione complessiva è quindi:



Le batterie NaS hanno un rendimento amperometrico praticamente unitario perché non presentano reazioni parassite. Tuttavia presentano qualche controindicazione dovuta alla loro elevata temperatura di esercizio. Uno dei principali problemi è mantenere appunto la temperatura costante. Infatti, durante la carica la reazione che avviene è endotermica, quindi la batteria deve essere riscaldata in modo che gli elettrodi non si solidifichino. Per tale motivo, questo tipo di accumulo



deve sempre funzionare in tampone<sup>1</sup> se si vuole che sia pronto ad intervenire istantaneamente. Infatti se la batteria usasse la sua energia per mantenersi calda, nonostante la coibentazione di cui è provvista, si scaricherebbe in pochi giorni. Nel caso in cui non si voglia tenere l'accumulo pronto ad intervenire lo si può lasciare raffreddare in modo che l'autoscarica sia nulla perché l'elettrolita ceramico allo stato solido tra i due elettrodi è un ottimo isolante elettrico. Si osservi però che per poter riscaldare completamente la batteria e quindi sfruttare l'energia accumulata in essa, è necessario attendere che la batteria raggiunga di nuovo la temperatura di lavoro. Questa procedura può richiedere fino a qualche ora [3].

Un problema non indifferente di sicurezza è costituito dalla rottura del separatore ceramico tra gli elettroliti poiché ciò avvierebbe una forte reazione esotermica senza controllo, con conseguente pericolo di incendio. Per questo le stringhe di cui sono composte sono ermetiche.

### **1.1.3 Batterie NaCl**

Come le batterie sodio/zolfo anche le batterie NaCl fanno parte di quelle ad alta temperatura. In una cella sodio/cloruri metallici il catodo è costituito da un cloruro di un metallo di transizione (nichel o ferro) allo stato liquido, l'anodo è costituito da sodio allo stato fuso, mentre il separatore ceramico è costituito da  $\beta''$ -allumina drogata con ossidi che le conferiscono una struttura caratteristica in cui si muovono gli ioni sodio. L'elettrodo positivo, dove sono presenti i cloruri che garantiscono una struttura molto porosa, è addizionato con un solvente liquido ad alta temperatura, tetracloroalluminato di sodio ( $\text{NaAlCl}_4$ ), che non partecipa alla reazione e che costituisce un elettrolita secondario che permette di aumentare la mobilità degli ioni sodio. Le reazioni che avvengono al suo interno e che permettono la generazione di corrente sono l'ossidazione del sodio che forma ioni sodio ed elettroni. Gli ioni sodio passano attraverso l'elettrolita verso il catodo e si ricombinano con i cloruri metallici che si sono ridotti con gli elettroni provenienti dalla reazione all'anodo attraverso il circuito esterno.

---

<sup>1</sup> Funzionamento in tampone: la batteria viene mantenuta connessa alla rete anche quando è carica o in stand-by (cioè pronto a erogare potenza) in modo che assorba dalla rete l'energia necessaria a compensare le perdite di carica o a mantenere la temperatura (nel caso di batterie ad alta temperatura)

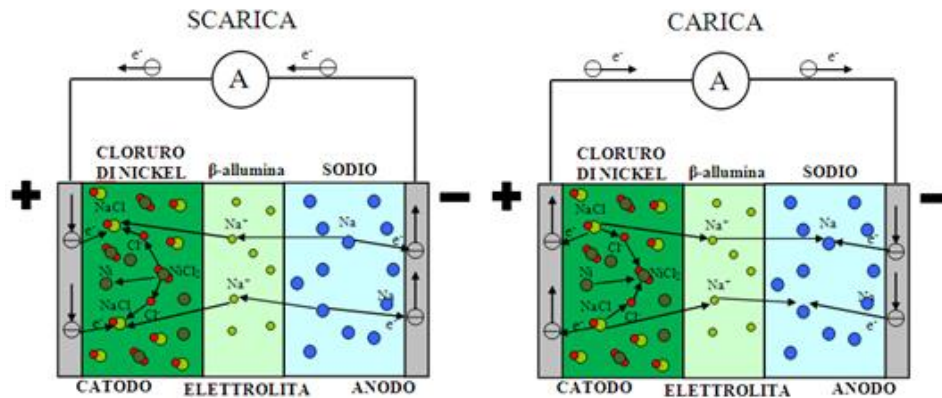
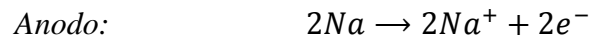
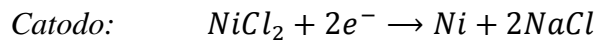
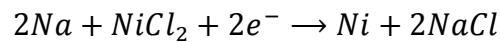


Figura 3 Cella NaCl: reazioni di carica e scarica

Le due reazioni di semicella sono [1]:



La reazione complessiva di cella è:

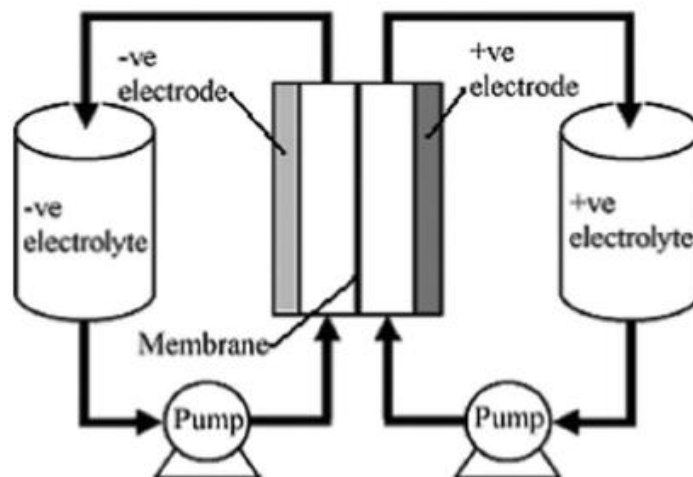


Rispetto alle batterie NaS le batterie NaCl godono di una sicurezza maggiore. Infatti nel caso di rottura di una cella essa viene cortocircuitata non compromettendo l'esercizio dell'accumulo e riducendo il rischio di incendio. Grazie alla sua sicurezza intrinseca essa è nata per l'automotive, ma è attualmente usata per applicazioni stazionarie.

L'aspetto più oneroso di tale tecnologia, come per tutti gli accumuli ad alta temperatura, è che se si vuole la batteria pronta ad erogare energia essa va tenuta calda. Perciò è fatta funzionare quasi sempre in tampone mantenendo sempre il collegamento con la rete che fornisce l'energia per tenerla in temperatura.

#### 1.1.4 Batterie redox

Le batterie redox a flusso di elettrolita hanno una struttura leggermente diversa da quelle fin qui analizzate. Esse infatti sono composte da due serbatoi in cui sono contenuti gli elettroliti in forma ionica completamente disciolti in soluzione acquosa e da uno stack, che è la zona dove avviene l'ossidazione.



**Figura 4 Schema batteria redox**

La differenza sostanziale del principio di funzionamento rispetto alle altre tecnologie di accumulo elettrochimico è che l'energia viene accumulata sotto forma di riduzione od ossidazione di una specie elettroattiva nell'elettrolita, mentre negli altri casi essa è accumulata nella struttura degli elettrodi. Questa soluzione dà il grande vantaggio di disaccoppiare completamente la sua energia e la sua potenza. Infatti aumentando la densità o il volume di stoccaggio degli elettroliti è possibile aumentare la capacità<sup>2</sup> di accumulo, mentre aumentando il numero di celle in uno stack e la grandezza degli elettrodi si aumenta la potenza nominale [2].

Parte fondamentale di un accumulo di questo tipo sono le pompe, che vanno opportunamente comandate al fine di contenere l'autoscarica. Infatti, l'efficienza energetica del sistema è fortemente influenzata dalle modalità di gestione delle pompe [1]. Nei vecchi sistemi le pompe lavoravano a velocità costante, che comportava una riduzione del rendimento del sistema nei periodi di lavoro con basso carico e con fasi di stand-by. Nei sistemi attualmente disponibili in commercio è stata implementata una modalità di gestione delle pompe a velocità variabile in funzione del carico, che permette di migliorare l'efficienza del sistema. La modalità di funzionamento delle pompe influenza anche l'autoscarica della batteria che è nulla se il sistema è fermo, essendo gli elettroliti

---

<sup>2</sup> La capacità di una batteria è definita come la corrente costante che è in grado di erogare per il tempo per il quale è in grado di erogarla. La sua unità di misura sono gli Ah. Nel caso di correnti variabili per calcolare la capacità scaricata si considera la somma di tanti intervalli in cui la corrente è considerata costante (discretizzazione). La capacità scaricata durante una scarica a correnti diverse sarà dunque:

$$C = \sum_j I \cdot \Delta t$$

In cui  $\Delta t$  rappresenta l'intervallo di tempo in cui la corrente ha un valore costante.

tenuti separati in due serbatoi diversi, mentre si scarica in pochi giorni se la batteria viene tenuta in stand-by, poiché le pompe devono continuare a mantenere in circolazione l'elettrolita.

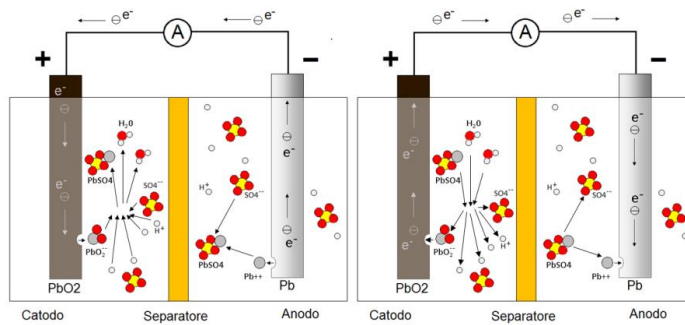
### **1.1.5 Batterie al piombo**

Le batterie al piombo hanno una tecnologia semplice e ormai affermata da più di un secolo. I primi esperimenti risalgono già al 1859 quando Gaston Planté cercò di inventare una prima batteria a scopo commerciale stazionario. Dagli anni '70 dell'800 le batterie di Planté venivano già usate nelle prime centrali elettriche del tempo per il bilanciamento dei carichi e il livellamento dei picchi.

Nel 1881 Emile Alphonse Faure ebbe l'intuizione che il materiale attivo poteva non essere realizzato direttamente in piombo, che era molto fragile, ma con una pasta di sostanza diversa messa su una piastra di supporto. Questo portò un abbassamento dei costi e dei tempi di produzione. Prima della fine dell'800 comparvero oltre alle classiche celle a piastra piana anche le celle a tubetto in cui i conduttori paralleli sono circondati da un tubetto poroso imbevuto della pasta attiva. Oggi le ultime leghe usate per gli elettrodi sono al calcio e all'antimonio che conferiscono più consistenza al piombo e ne migliorano la reattività [4].

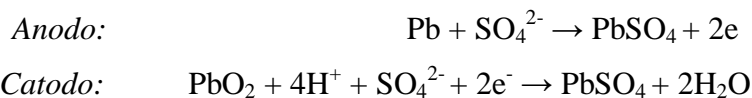
L'infrastruttura di produzione delle batterie al piombo venne ulteriormente consolidata all'inizio del '900 quando tale tecnologia venne impiegata su larga scala dall'industria automobilistica per l'avviamento del motore a scoppio (SLI-*Starting Lighting Ignition*). Le batterie al piombo, anche per uso stazionario, non ebbero rivali fino agli anni '50 quando vennero introdotte le batterie al Nickel-Cadmio.

Negli anni '70 lo sviluppo delle batterie al piombo ricevette una nuova spinta grazie allo sviluppo delle batterie ermetiche VRLA-*Valve Regulated Lead Acid*. Le batterie precedenti (VLA- *Vented Lead Acid*) infatti richiedevano una manutenzione costante a causa del problema della solfatazione: durante il processo di carica si produce dalle reazioni parassite idrogeno e ossigeno che vengono dispersi all'esterno, provocando la diminuzione di acqua nell'elettrolita. La batteria quindi deve essere rabboccata periodicamente.



**Figura 5** Cella al piombo: reazioni di carica e scarica

Le reazioni di semicella sono [1]:



La reazione complessiva è dunque:



Con le nuove batterie ermetiche l'idrogeno prodotto sulla piastra negativa viene convogliato verso la positiva dove si ricombina con l'ossigeno ricostituendo acqua. In questo modo la manutenzione della batteria è ridotta praticamente a zero.

Tuttavia i gas si ricombinano interamente solo fino ad un certo valore della corrente di carica, oltre il quale i gas vengono evacuati all'esterno tramite le valvole di sicurezza (dry out) per prevenire pericolose esplosioni. Tuttavia in questo caso concentrazioni troppo elevate di acido aumenta la corrosione delle griglie e il degrado anomalo della batteria. Quindi la durata è inferiore rispetto agli accumulatori aperti.

Esistono due tipologie di batterie ermetiche:

- AGM (absorbed glass material) in cui l'elettrolita è assorbito in un supporto microporoso come la fibra di vetro;
- GEL in cui l'elettrolita è assorbito in un supporto tipo gel.

Il modo di carica e scarica in ogni caso deve essere controllato attentamente in modo da ridurre al minimo la produzione di gas. Esperimenti sulla durata di tali batterie hanno mostrato come la vita

attesa sia molto inferiore rispetto alle VLA poiché sono meno tolleranti alla scarica e alla carica con correnti elevate e alle variazioni di temperatura [5].

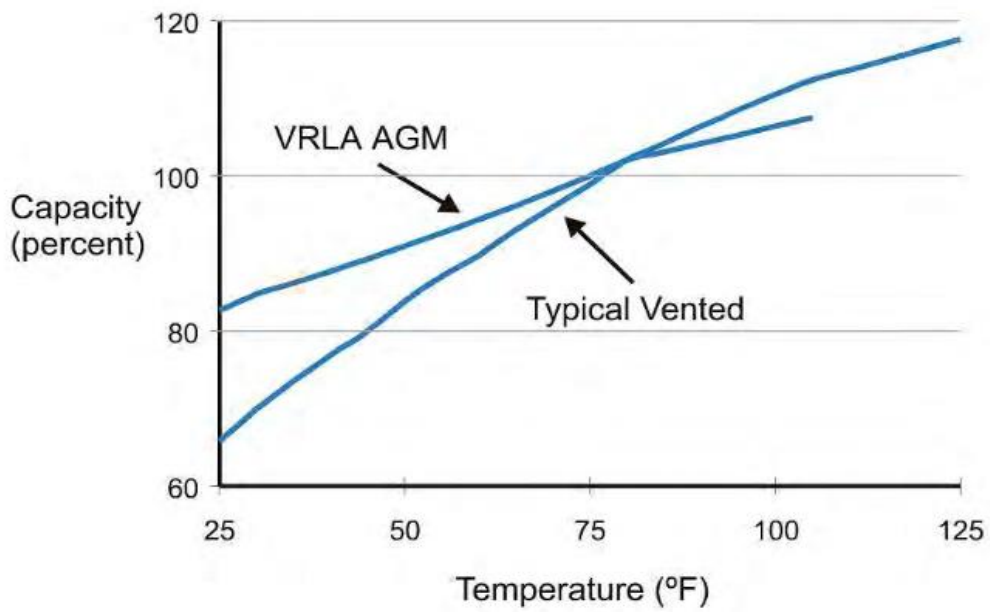


Figura 6 Diversi andamenti della capacità a diverse temperature per le batterie VLA e VRLA

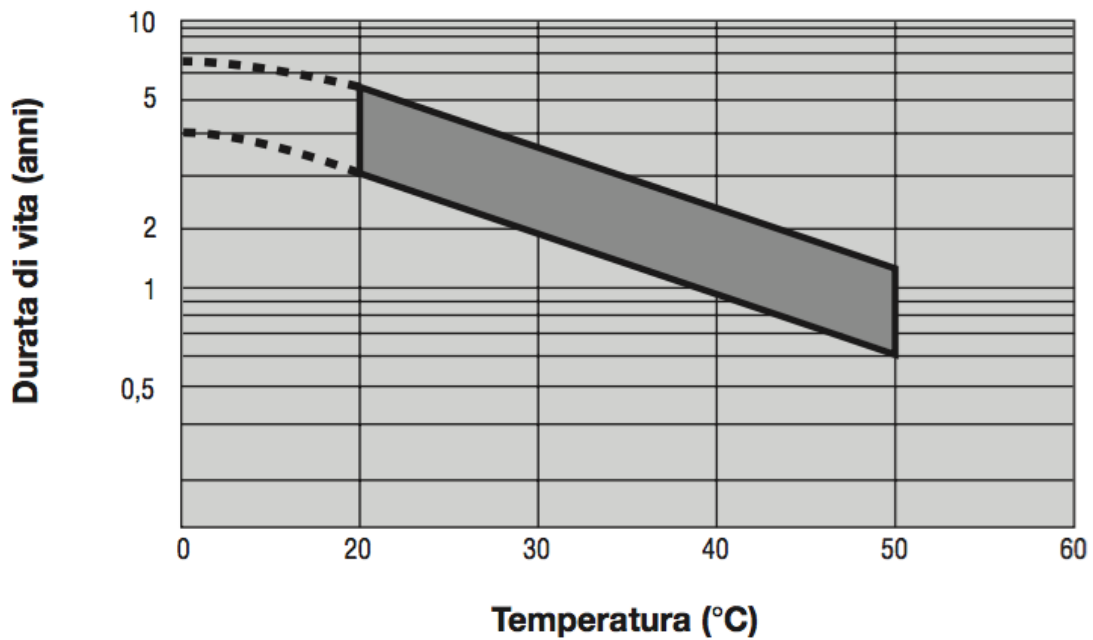
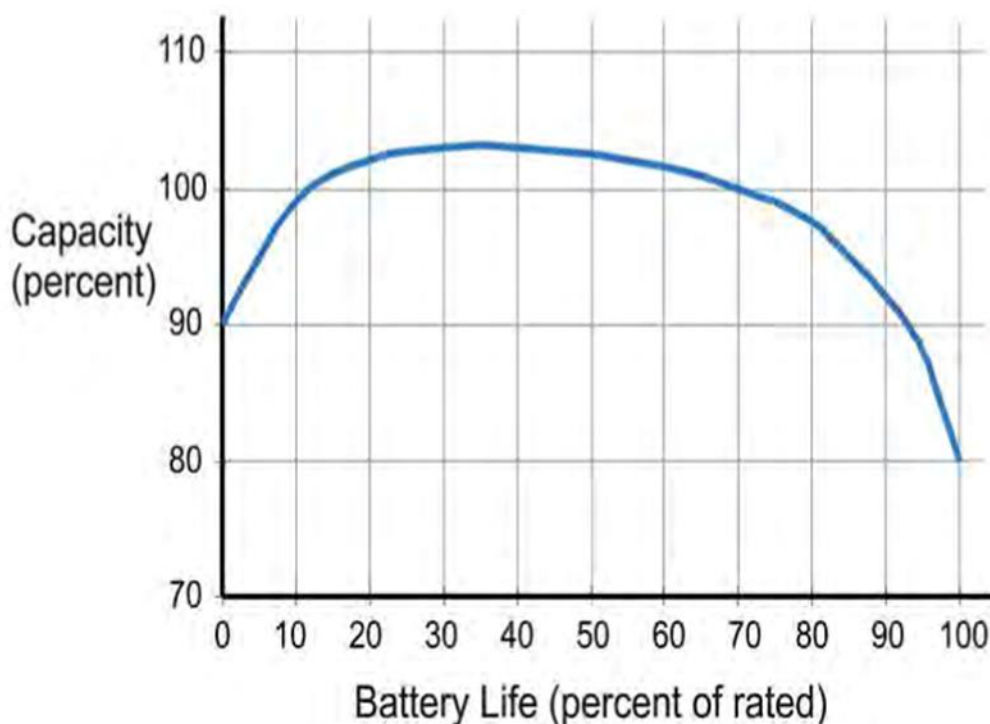


Figura 7 Influenza della temperatura sulla vita delle batterie al piombo

Un fenomeno molto importante nelle VRLA è quello della Coup de Fouet (colpo di frusta). Spesso quando la batteria ha funzionato a lungo in tampone, all'inizio della scarica la tensione mostra una rapida oscillazione [5] molto marcata che aumenta con l'invecchiamento della batteria. Questo calo di tensione potrebbe causare problemi alla strumentazione elettronica che la batteria alimenta.

L'efficienza della cella è abbastanza alta 75-85% grazie all'elevata tensione di cella (2V). Le principali perdite sono legate all'elettrolisi dell'acqua nell'elettrolita. Infatti quando la batteria è completamente carica ma viene mantenuto il collegamento (funzionamento in tampone), tutta la corrente viene impiegata nell'elettrolisi e quindi l'efficienza della batteria è 0%.

La capacità degli accumuli al piombo non è costante, ma è legata tra le altre cose, anche all'età della batteria come anche per altre tecnologie di accumulo. Infatti inizialmente la capacità cresce grazie alla formazione di nuovo materiale attivo e alla sua diffusione verso i pori più piccoli dell'elettrolita. Il medesimo fenomeno tuttavia causa a lungo andare la corrosione del supporto stesso e rappresenta una delle principali cause di rottura.



**Figura 8** Capacità della batteria in relazione all'invecchiamento(espresso in percentuale della vita totale)

Inoltre anche la profondità di scarica influenza l'andamento della capacità nel tempo. Infatti, cicli di scarica profondi stressano maggiormente a livello meccanico gli elettrodi che sono più soggetti al cedimento.

Costruttivamente le celle che compongono una batteria non sono mai perfettamente uguali. Questo porta alcune celle ad andare incontro al fenomeno dell'overcharging, disperdendo energia attraverso l'elettrolisi, e altre celle a non completare la carica. Questo problema si risolve per le VLA caricando periodicamente la batteria ad alto voltaggio, mentre rimane irrisolvibile per le VRLA poiché la produzione di gas per elettrolisi delle celle cariche sarebbe inaccettabile e il liquido perso non potrebbe essere reintegrato.

Il problema della solfatazione, una vita attesa abbastanza breve, una autoscarica non trascurabile (2-3% al mese) e una non elevata densità di energia e potenza non rendono tuttavia ancora obsoleta tale tecnologia.

Infatti essendo una tecnologia affermata da più di un secolo gode di una rete di servizio e smaltimento capillare e quindi i costi di produzione sono molto bassi e ottimizzati. Inoltre l'impiego su larga scala da molti decenni di tale tecnologia ha permesso di acquisire un know how completo risolvendo anche tutte le criticità di sicurezza e riducendo al minimo i rischi.

Perciò ancora oggi interessante ed attuale lo studio delle batterie al piombo, soprattutto per quello che riguarda la ricerca di uno stimatore di energia. Infatti la molteplicità di reazioni che avvengono al loro interno rendono difficile stabilire con precisione l'energia immagazzinata, che varia in modo considerevole in funzione delle condizioni di funzionamento, rispetto a quella nominale.

## **1.2 Classificazione applicazioni**

Nell'ambito dell'utilizzo di batterie per applicazioni stazionarie, gli accumuli elettrochimici hanno da sempre rappresentato un ottimo modo per garantire la continuità del servizio e soprattutto la sicurezza nel caso venisse a mancare l'alimentazione primaria. Infatti hanno il pregio di erogare o assorbire potenza istantaneamente senza avere lunghi tempi di avviamento, come per esempio, quelli di un motore diesel, che sarebbero inaccettabili in determinate occasioni come nel caso di un data center. Con lo sviluppo tecnologico sono diventati sempre più efficienti riuscendo ad immagazzinare notevoli quantità di energia, ad erogare potenze consistenti e a sopportare maggiormente cicli di scarica sempre più profondi. Questo ha fatto sì che si aprissero per loro nuove possibilità di impiego diverse dal classico funzionamento in tampone come alimentazione di emergenza. Possiamo dividere tali applicazioni tra quelle di lunga e di breve durata [6], come illustrato in Figura 9.



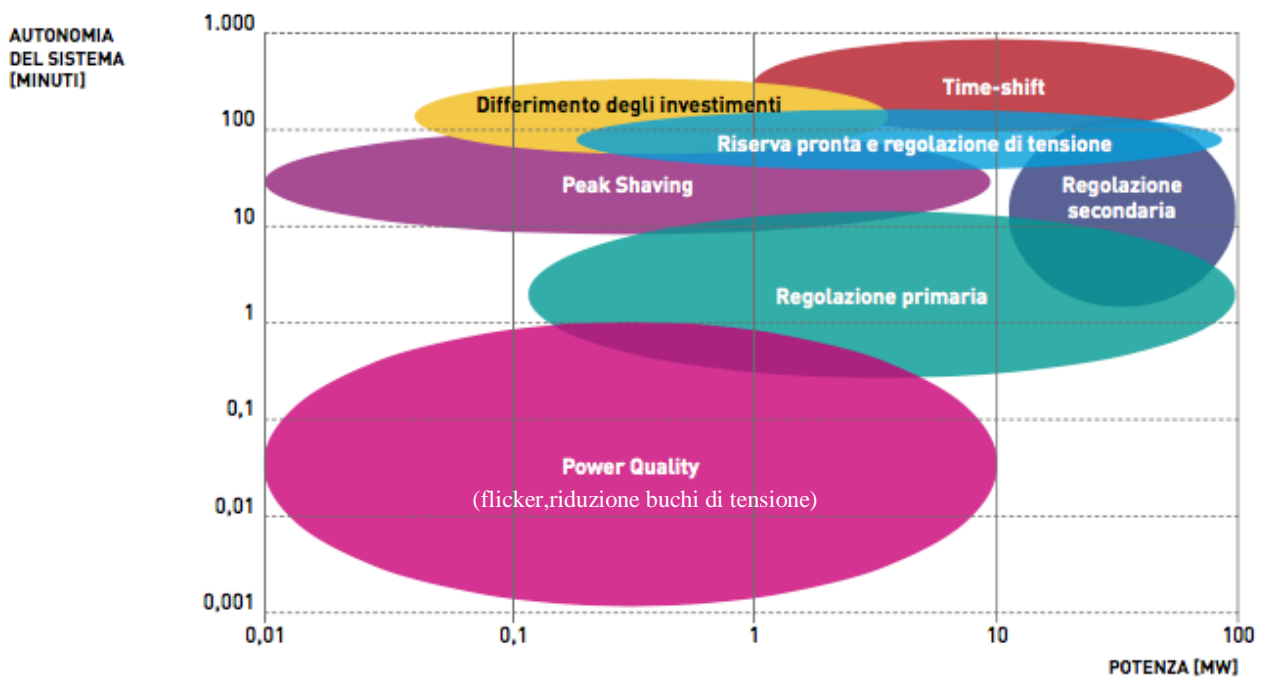


Figura 9 applicazioni dei sistemi di accumulo in relazione alla loro modalità di utilizzo in tempo e potenza

### 1.2.1 Applicazioni di breve durata

Per applicazioni di breve durata si intendono quelle applicazioni che richiedono una autonomia minore di un minuto. Di seguito si riporta un elenco delle principali applicazioni.

**Grid angular stability:** attraverso l'iniezione o l'assorbimento di potenza attiva a bassissima frequenza (0.5-1 Hz) vengono limitate le oscillazioni del rotore dei generatori. I tempi di intervento devono essere molto rapidi, infatti va misurato il disturbo e si deve intervenire entro 20 ms da quando è stato rilevato.

**Grid voltage stability:** regolazione della tensione tramite la generazione o l'assorbimento di potenza reattiva. Sono più efficienti dei banchi di condensatori che si usavano in precedenza in quanto la potenza è continuamente regolabile tramite gli inverter con cui si interfacciano con la rete. Inoltre è stato ricavato da prove sperimentali che se l'iniezione di potenza reattiva è associata anche ad una piccola parte di potenza attiva, la regolazione risulta più efficiente. Questo tipo di regolazione sarebbe impossibile da realizzare con i soli condensatori.

**Riduzione dei flicker di tensione:** i flicker sono piccole variazioni repentine della tensione di rete (0.9-1.1 p.u.) che si verificano spesso su reti deboli, in cui è dominante la presenza di fonti rinnovabili non programmabili, oppure su reti con numerosi carichi fluttuanti, come per esempio i forni ad arco delle acciaierie.

**Riduzione dei buchi di tensione:** consistono in una riduzione dell'ampiezza della tensione a valori compresi tra 0.1 e 0.9 p.u. di durata fino al minuto.

**Risposta alle interruzioni:** intervalli sotto il minuto in cui la tensione scende sotto lo 0.1 p.u.. Tipicamente sono gli UPS degli utilizzatori a farsi carico di questo genere di scompensi.

**Inerzia sintetica:** la diffusione su larga scala di impianti di produzione da fonti rinnovabili non programmabili ha causato una diminuzione della stabilità della rete. Anche perché questi impianti di solito sono connessi alla rete tramite inverter per riuscire a sfruttare al meglio tutta l'energia prodotta. La conseguente diminuzione di generatori sulla rete ha reso la rete stessa meno performante di fronte a quelle piccole variazioni di carico a cui fino ad ora facevano fronte i generatori stessi con la loro inerzia meccanica (diminuendo o aumentando leggermente il numero di giri al minuto), mantenendo così l'equilibrio tra potenza prodotta e consumata. Gli inverter non possono avere per loro natura questa caratteristica poiché sono componenti puramente elettronici. In un futuro in cui i generatori classici sono destinati a diminuire sempre di più, sarà di vitale importanza abbinare ad ogni inverter un sistema di accumulo in grado di mantenere l'equilibrio della rete istante per istante. [7]

### 1.2.2 Applicazioni di media e lunga durata

Le applicazioni di media e lunga durata sono quelle di una durata superiore a qualche decina di secondi.

**Regolazione primaria frequenza:** la trasmissione di energia elettrica si basa su un delicato equilibrio tra generazione e assorbimento. Tutta l'energia prodotta in ogni istante deve essere consumata nello stesso momento. L'indicatore di tale equilibrio è la frequenza di rete: a pari potenza generata, quando il carico aumenta, la frequenza di rete tende ad abbassarsi, mentre quando il carico diminuisce la frequenza tende ad aumentare. Storicamente si occupano di stabilizzare la frequenza i gruppi termoelettrici che entro 15 secondi devono essere in grado di fornire la metà della potenza dedicata alla regolazione primaria e dopo 30 secondi tutta. L'intervento dei dispositivi che regolano la frequenza deve essere il più rapido possibile per evitare che essa si discosti troppo dal valore nominale e causi disservizi agli utilizzatori e, nel peggiore dei casi, un black out. Gli accumuli elettrochimici sono molto più portati per questo compito grazie alle loro notevoli prestazioni dinamiche.

**Regolazione secondaria frequenza:** attraverso la regolazione secondaria la frequenza viene riportata al suo valore nominale dopo che attraverso la regolazione primaria questa è stata riportata all'equilibrio ad un valore diverso. Questo è un aspetto molto attuale, infatti con l'aumento delle fonti rinnovabili non programmabili a parità di potenza richiesta dal carico va aumentata la riserva rotante pronta a entrare in regolazione in caso di necessità. Per tale motivo molti impianti

termoelettrici lavorano vicino al minimo tecnico con costi economici ed ambientali non trascurabili. Anche questo problema potrebbe essere risolto con l'uso di accumuli elettrochimici che inoltre interverrebbero molto più velocemente e rispetto ai 100-200 s degli impianti tradizionali.

**Area control:** in questo genere di applicazione gli accumuli servono a fare in modo che non vengano superati i limiti commerciali delle linee di trasmissione in seguito a regolazione primaria.

**Rampa di variazione di carico:** durante la giornata ci sono momenti in cui il diagramma di carico presenta un'impennata molto ripida dovuta all'inizio delle attività produttive durante la mattina o al rincasare della maggior parte delle persone durante la sera. Far fronte a queste rampe è una sfida tecnica, infatti si devono avere nel parco di generazione impianti in grado di sopportare un gradiente di potenza di almeno 50 MW/min causando comunque un forte stress alle centrali. In Italia, a causa della diffusione di impianti fotovoltaici, la pendenza di tale rampa, soprattutto alla sera, diventa ancora più ripida, perché l'aumento del carico coincide con la diminuzione di produzione di energia da fotovoltaico. Gli accumuli potrebbero moderare la variazione di carico e stressare meno le centrali.

**Peak shaving:** Ci sono momenti della giornata in cui, per poco tempo, si hanno picchi di consumo molto più elevato rispetto al normale. Per far fronte a questi picchi entrano in funzione impianti da bassi costi fissi ma alti costi operativi come i turbo-gas. Per limitare questa problematica si dovrebbe avere una curva di carico più piatta possibile. Per questa ragione sarebbero utili gli accumuli che potrebbero intervenire ad "appiattare" i picchi smorzando le oscillazioni del carico.

#### **Livellamento dell'output d'impianti a fonti rinnovabili non programmabili:**

Questa applicazione permette alle fonti di energia rinnovabili di fare il definitivo salto di qualità. Infatti tramite gli accumuli è possibile gestire e programmare anche le fonti rinnovabili che per la maggior parte sono aleatorie per definizione.

**Black start:** tale servizio consiste nell'energizzare porzioni di rete MT quando la sua sottostazione va fuori servizio. Ciò serve ad evitare transitori di inserzione che sono molto onerosi dal punto di vista elettro-meccanico.

**Black start up:** consiste nel poter riavviare una centrale che è andata in black out senza la necessità di alimentazione esterna.

**Load shifting:** è un genere di applicazione di logica simile al peak shaving, ma duale rispetto ad esso. Mentre con il peak shaving si interviene lato produttore, con il load shifting si interviene dal lato della domanda. Infatti durante le ore in cui il costo dell'energia è maggiore la batteria viene usata per alimentare il carico, mentre quando l'energia costa di meno l'accumulo viene caricato.

**Differimento degli investimenti di rete:** può capitare che per l'inadeguatezza strutturale della rete

o per una scelta sbagliata degli impianti produttivi un tratto di rete saturi la sua capacità di trasmissione. Questa situazione comporta l'entrata in servizio di impianti non economicamente convenienti per cercare di distribuire su altre linee il passaggio dell'energia. La durata tipica delle congestioni varia da 2 a 6 ore. Installando invece a valle del tratto congestionato un sistema di accumulo, in grado di immagazzinare energia quando l'elemento di rete non sia sovraccaricato e di evitarne il sovraccarico generando nei momenti critici, è possibile evitare o differire nel tempo gli investimenti per incrementarne adeguatamente la capacità.

## 2 Descrizione della Test Facility

In questo capitolo si descrive la composizione della rete di test presente in RSE, come viene gestita e da cosa è costituita. Si partirà dalla descrizione della struttura dell'intera rete fino a illustrare nel dettaglio il laboratorio batterie al piombo dove si sono svolte le prove sperimentali.

### 2.1 Test-Facility

Le prove sperimentali sono state eseguite nel laboratorio sistema di accumulo con batterie al piombo inserito all'interno della rete di test di RSE denominata Test Facility. L'impianto Test Facility di Generazione Distribuita è costituito da una rete in bassa tensione cui sono collegati differenti sistemi di generazione, accumulo e carichi.

In particolare l'impianto è costituito da [8]:

- 1) Cabina di trasformazione da 23 kV a 380 V di raccordo con la rete esterna;
- 2) Limitatore di corrente a superconduttori SFCL che aumentano la flessibilità, l'affidabilità e la sicurezza del sistema di protezione. Al crescere della corrente aumenta la temperatura del sistema (mantenuta a condizioni criogeniche) e diminuisce di conseguenza la conducibilità del sistema che riduce i valori di picco della corrente stessa. Il limitatore deve operare per un tempo limitato (pena il danneggiamento del sistema) sino all'intervento delle protezioni elettromeccaniche;
- 3) Generatore di buchi di tensione permette la simulazione nella Test Facility di buchi di tensione di durata e profondità prefissata;
- 4) Quadri di distribuzione "QBT Dispower ed Ampliamenti" ha lo scopo di garantire l'interconnessione della rete in bassa tensione della Test Facility alla cabina di trasformazione (media/bassa), di configurare la rete della Test Facility e connettere i differenti sistemi. Il quadro SDS di acquisizione e supervisione della Test Facility permette l'acquisizione dati ed il controllo di impianti da remoto;
- 5) Sistema Ibrido ad energie rinnovabili che è costituito da un generatore fotovoltaico da circa 10 kWp, un generatore eolico asincrono simulato da 8 kVA, un gruppo elettrogeno asincrono da 8 kVA, un sistema di accumulo elettrochimico da 110 kWh, inverter bidirezionali sincroni da 10 kVA e un sistema di carichi da circa 10 kVA, con gestione basata su un bus in corrente alternata;
- 6) Campo fotovoltaico di potenza complessiva pari a 14 kW, posto sui telai in carpenteria, è composto complessivamente da 400 moduli fotovoltaici in silicio monocristallino da 30 celle e dotati di cornice in alluminio, di cui solo 396 collegati elettricamente;

- 7) Campo fotovoltaico innovativo di potenza nominale 7.7 kW, è destinato a produrre energia elettrica in collegamento alla rete elettrica di distribuzione di bassa tensione in corrente alternata. L'impianto fotovoltaico viene connesso elettricamente alla parte della rete di proprietà dell'utente a valle del punto di consegna dell'energia;
- 8) Un generatore elettrico basato sulla tecnologia Dish Stirling che converte l'energia solare in energia elettrica per via termodinamica, mediante la concentrazione della radiazione solare diretta. Il generatore ha una potenza netta nominale di 10 kW;
- 9) Batterie al Piombo ed Inverter da 22kW Loccioni;
- 10) Impianto Trigenerativo con microturbina basato su una microturbina a gas; in particolare l'impianto permette di valutare le prestazioni del sistema in assetto cogenerativo durante i mesi invernali ed in assetto trigenerativo (con utilizzo del calore di cogenerazione in un frigorifero ad assorbimento) durante i mesi estivi.;
- 11) Batteria Redox ed inverter;
- 12) Sistema di Power Quality con volano. È stato installato per verificare le potenzialità di tale tecnologia per aumentare la qualità del servizio per peak-shaving e per load-leveling;
- 13) Batterie al Litio ed inverter da 150 kVA;
- 14) Batterie Zebra ed inverter da 100 kVA;
- 15) Celle a combustibile e/o sistemi di micro cogenerazione sperimentano il funzionamento di micro generatori connessi alla rete AC della Test Facility;
- 16) Inverter I-Power per rete secondaria. Il sistema definito come I-Power è costituito da un inverter trifase bidirezionale che ha lo scopo di trasferire potenza (attiva e reattiva) tra la sbarra 1 della Test Facility di GD, alimentata dalla rete AEM tramite il trasformatore MT/BT, e la sbarra 2, che è alimentata dall'impianto IPOWER. Il sistema comprende due inverter trifase bidirezionali da 200 kVA, collegati back-to-back, in grado di garantire un funzionamento sui 4 quadranti e da un interruttore di by-pass che collega elettricamente in modo diretto la sbarra 1 e la sbarra;
- 17) Rete in corrente Continua;
- 18) Carichi elettrici;
- 19) Prolungamento linee elettriche realizzato per modificare la configurazione della rete mediante l'inserzione di prolungamenti di linee;
- 20) Casa Domotica sviluppata per lo studio di una gestione ottimale dei generatori e dei carichi all'interno di una normale utenza domestica.;
- 21) Batterie al Litio ed inverter da 32kW Loccioni;
- 22) Impianto MCI, motore a gas 6kW;

23) Impianto Sistema Minieolico 3 kW;

L'impianto, ubicato presso la Sede RSE di Via Rubattino in Milano, è per sua natura distribuito; si è riportata la posizione di installazione dei componenti principali in accordo alla planimetria generale degli edifici CESI. Inoltre, nella seguente figura, la posizione dei suddetti componenti è identificata mediante la numerazione progressiva dell'elenco precedente.



**Figura 10 Vista aerea della sede di RSE**

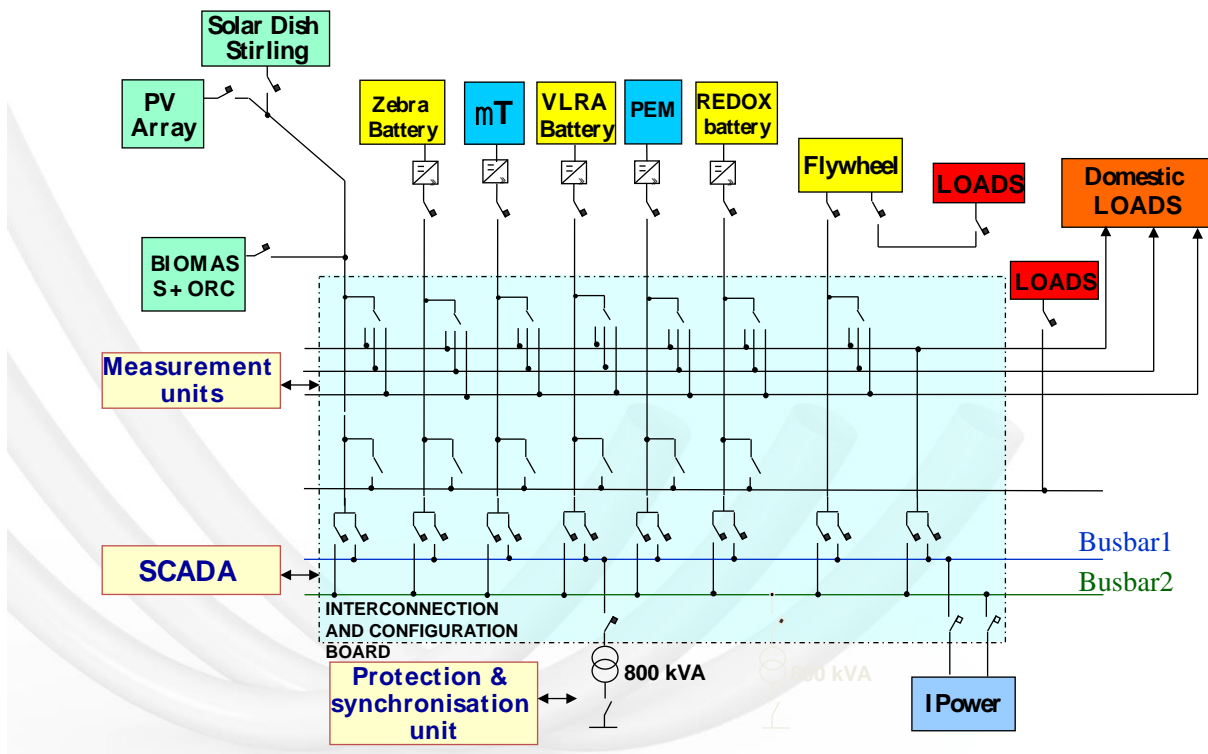


Figura 11 Schema elettrico Test Facility

L'intera rete è controllata da remoto attraverso una semplice interfaccia da cui è possibile avere una visione d'insieme del sistema con informazioni istantanee in ogni nodo della test facility come per esempio l'assorbimento o la produzione di potenza attiva o reattiva, la corrente e la tensione (Figura 12).

Per una gestione ancora più efficiente di tutta la rete è evidente che sarebbe particolarmente utile uno stimatore di energia (come quello realizzato con questo lavoro di tesi per le batterie al piombo) per avere un'indicazione chiara e veritiera dell'energia immagazzinata negli accumuli elettrochimici. Questo consentirebbe di prendere decisioni con maggiore consapevolezza in caso di funzionamento in isola e di poter sfruttare l'energia prodotta dalle rinnovabili nella sua interezza.



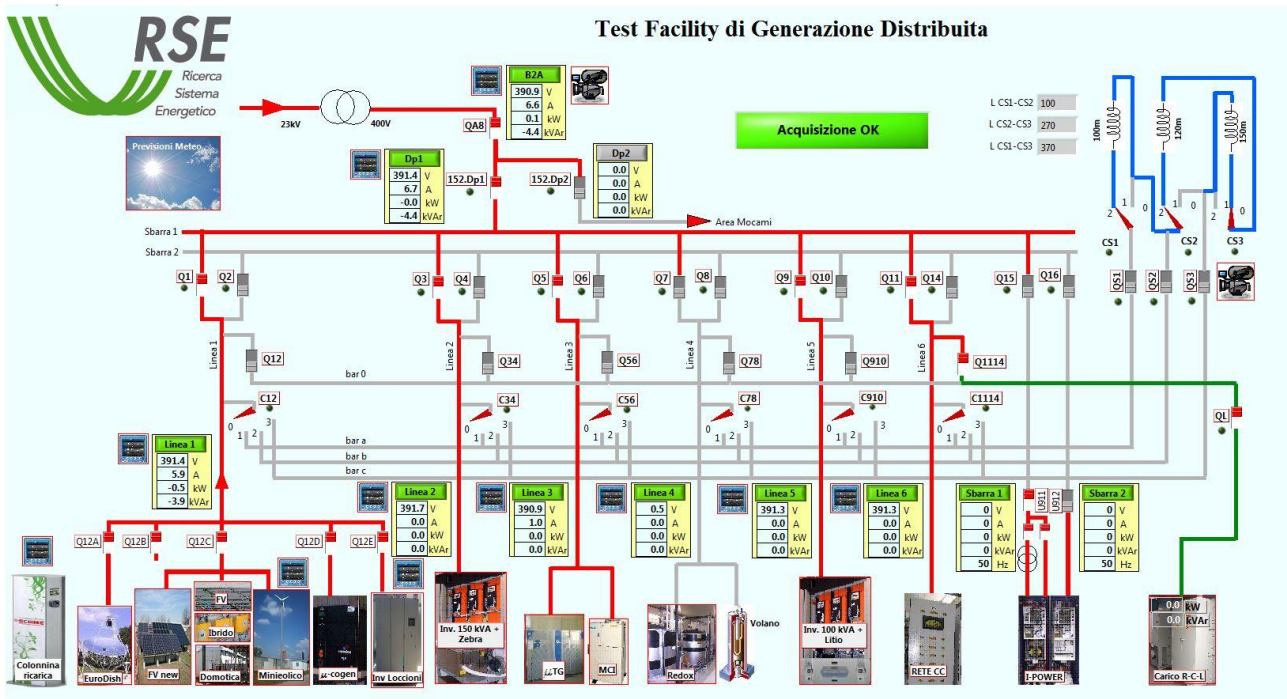


Figura 12 Interfaccia per la gestione della Test Facility da remoto

### 2.1.1 Laboratorio sistema di accumulo con batterie al piombo

Il laboratorio dedicato al sistema di accumulo al piombo è caratterizzato da una potenza continuativa di 20 kW ed una energia complessiva di 50 kWh, è costituito dall'integrazione di un sistema di accumulo con batterie al piombo VRLA della Fiamm ed un sistema di conversione bidirezionale della Loccioni.

Nella tabella seguente si riportano le caratteristiche principali del sistema.

**Tabella 2 Caratteristiche tecniche moduli del laboratorio batterie al piombo**

<b>Batterie</b>	
Costruttore	FIAMM
Modello	12FIT150 monolite
Tipo	Piombo VRLA –AGM
Tensione nominale	12 V
Capacità	150 Ah
Dimensioni (LxAxP)	558x126x282 mm
Tensione “float” carica in standby	13.62 V (@20°C), 13.56V (@25°C)
Tensione carica “Boost”	14.1-14.4 V
Compensazione temperatura tensione “float”	-15 mV/°C (blocco)
Peso	48.5 kg
<b>Sistema accumulato</b>	
N° batterie	31
Tensione nominale	372 V
Tensione minima	298 V
Tensione tampone	422 V
Tensione massima	446 V
Capacità	150 Ah
Energia	57.6 kWh
Potenza massima continuativa	20 kW (C/3)
<b>Sistema di conversione</b>	
Costruttore	Loccioni
Potenza nominale	22 kW
Convertitore	TDE MACNO mod AFE OPDE S70
Efficienza di conversione	> 93%
Tensione uscita convertitore	181 V (3Ph +N)
Corrente Nominale convertitore	71 A
Funzionamento	Su 4 quadranti; A P=22 kW, $\cos\phi$ min = 0.86; corrente reattiva max = 50% Inom
Tensione uscita nominale	400 V (3ph+N)
Dimensioni (L x P x A)	1.200 x 800 x 2.000 mm



**Figura 13** Batteria al piombo composta da 31 moduli in serie

In particolare il sistema di accumulo è stato collegato alla linea 1 (Busbar 1) della Test Facility corrispondente alla linea di connessione dei generatori da fonti rinnovabili.

La scelta di collegare il sistema di accumulo a tale linea permette di realizzare una sottorete con generatori fotovoltaici, accumulo e carichi particolarmente utile per effettuare attività sperimentali su autoconsumo e gestione integrata di rinnovabile ed accumulo.

Il controllo del sistema di accumulo è realizzato in ambiente Labview® e permette il controllo locale del sistema, l'acquisizione dati e l'interfacciamento con il sistema di supervisione e controllo della Test Facility.

La comunicazione viene effettuata mediante rete ethernet. Il controllo dell'inverter è gestito mediante protocollo Modbus RTU su linea seriale RS485 utilizzando un convertitore Ethernet-RS485. Il medesimo convertitore (dotato di due linee di comunicazione seriale RS485) viene utilizzato anche per l'acquisizione dati dagli analizzatori di rete (lato corrente continua ed alternata).

Il controllo degli interruttori e degli azionamenti viene gestito mediante attuatore Beckhoff (collegato su linea ethernet) che acquisisce lo stato degli interruttori e dell'inverter, le temperature di batteria e dell'armadio del sistema di conversione, e controlla i comandi di apertura e chiusura dell'interruttore principale e di funzionamento dell'inverter (Run, Enable e Reset).

### 3 Stimatore dello stato di energia

Le applicazioni elencate nel capitolo 1.2 possono effettivamente essere svolte in una rete elettrica solo se il gestore dell'accumulo è in grado di sapere con una buona sicurezza per quanto sarà in grado di svolgere tali servizi. Sarebbe poco sfruttabile un accumulo di cui non si conosce l'energia residua. Conoscere con precisione lo stato di una batteria permette di dimensionarla adeguatamente, senza doverla sovradimensionare per sicurezza e di usarla nel modo corretto per evitare problemi di sicurezza (è successo più di una volta che per esempio una batteria difettosa scatenasse un incendio). Il modello descritto nel seguito potrebbe essere usato anche per la diagnostica.

Proprio perché questo lavoro è stato fatto per applicazioni in energia di un accumulo al piombo, si è cercato di immedesimarsi in un trader che deve conoscere con precisione l'energia che è in grado di iniettare o prelevare direttamente dalla rete. Per questo il SoE (State of Energy) elaborato non darà come output l'energia residua nella batteria, ma l'energia residua nel sistema, che comprende anche uno stadio di conversione, in modo che il provider (possessore del SDA) sia in grado comunicare al gestore di rete quanta energia può realmente mettere a disposizione.

Valutare l'energia di una batteria tuttavia non è immediato poiché il comportamento della batteria è fortemente non lineare e variabile nel tempo a seconda della sua usura, della temperatura e della corrente.

#### 3.1 Indicatori di stato

State-of-energy (SoE) è un indicatore molto importante per la gestione della batteria ed è indispensabile per garantire affidabilità e sicurezza dell'accumulo.

Prima di approfondire i vari modi con cui si può arrivare alla stima del SoE è necessario fare chiarezza ed evidenziare le differenze tra SoE (State of Energy) e SoC (State of Charge). Infatti quasi tutti SoE basano la loro stima sul SoC ma essi sono indicatori di due variabili diverse della batteria. Il SoC viene indicato in percentuale rispetto alla capacità massima e di solito si stima partendo da un SoC noto (per esempio 1 a batteria completamente carica) e viene calcolato attraverso il Coulomb counting, cioè si contano, attraverso la misura della corrente, quante cariche entrano o escono effettivamente dalla batteria. Il SoE stima l'energia che la batteria può effettivamente erogare o assorbire. Infatti, come verrà spiegato nel capitolo 4.3, la quantità di energia estraibile da una batteria dipende dalla potenza alla quale la si richiede. C'è dunque una quantità di carica, più o meno grande a seconda della potenza richiesta, che rimane immagazzinata nella batteria e di cui il SoE tiene conto [9]. Non ha quindi significato esprimere il SoE con una percentuale rispetto ad una energia di riferimento poiché essa cambia a seconda delle

condizioni. Inoltre lo stimatore è in grado di dire se la batteria può eseguire un determinato ciclo di carica e scarica a potenza variabile senza raggiungere dei limiti operativi o di modulo.

Per la stima del SoC esistono in letteratura svariati approcci: proporzionale integrale (PI) [10], Luenberger, in cui il guadagno dello stimatore è regolato in modo adattativo usando un gradiente stocastico che riduce l'errore tra tensione stimata della batteria e tensione misurata[11], Sliding-mode, in cui il modello della batteria è semplificato per rendere meno onerosi i calcoli e l'errore derivato è compensato con uno sliding mode observer [12] (struttura variabile in retroazione di stato, che modifica il comportamento di un sistema non lineare forzandolo con un segnale di controllo in alta frequenza), e algoritmi basati sul filtro di Kalman [13]. Invece, per quanto riguarda la stima dell'energia, la letteratura è molto più scarna.

### 3.2 Stato dell'arte

Per la stima del SoE esistono in letteratura due approcci differenti: uno “data driven” e uno attraverso la realizzazione di un modello della batteria e quindi la stima del SoC.

Per esempio in [14] sono presenti studi che basano la stima del SoE su una rete neurale che vede la batteria come una “black-box”. In questo caso si ha bisogno di un gran numero di dati sperimentali per ricavare i parametri della rete. Il più grande svantaggio di questo metodo è che l'errore di stima è strettamente connesso agli esperimenti compiuti che devono essere molto numerosi e riprodurre tutte le possibili condizioni di funzionamento, cosa assai difficile.

Alternativamente esiste un approccio basato su un modello della batteria e la stretta relazione che c'è tra la sua tensione a circuito aperto e il SoE.

Visto il legame che c'è tra il SoE, SoC e la OCV [15] è importante che anche la stima dello stato di carica sia fatta nel modo corretto e più preciso possibile. È meglio quindi non basarsi sul semplice Coulomb counting, poiché un piccolo errore di offset sulla corrente può portare alla saturazione dell'integrale e ad una stima completamente sbagliata del SoC. La formula per stimare la carica in questo modo è:

$$SoC = SoC(t_0) + \frac{\int i \cdot dt}{C_{max}}$$

Dove  $C_{max}$  è la capacità massima della cella.

In [16] per esempio al fine di stimare correttamente il SoC viene usato un metodo chiamato central difference Kalman filter (CDKF), molto efficace per modellizzare comportamenti non lineari. Questo metodo sfrutta la relazione tra lo stato di carica della cella e la sua tensione a circuito aperto.

Tale metodo è stato validato su più tipologie di celle e si è giunti ad un errore inferiore all'1%. Il CDKF presenta però un problema: richiede un pesante onere computazionale.

Per cercare di trovare un compromesso tra precisione e rapidità di calcolo, si è cercato di basare lo stimatore su un modello di batteria che non richiedesse procedure di parametrizzazione troppo lunghe e che fosse in grado di prevedere la tensione di batteria nei suoi vari stati di funzionamento, in modo da poter risalire al SoE. Infatti sono numerosi in bibliografia gli esempi di studi che basano la stima del SoC e quindi del SoE su un modello della batteria [16][9][17][18].

Anche il tool che ci accingiamo a realizzare sarà basato su un modello della batteria, ma sarà più completo in quanto comprenderà il rendimento dello stadio di conversione in modo tale che si tenga conto dell'energia che esso disperde.

Si vuole realizzare un programma con la logica di funzionamento illustrata in Figura 14.

- Nel punto 1 evidenziato in figura, ai morsetti di rete, viene impostato il setpoint di potenza attiva e reattiva.
- Nel punto 2 giunge la potenza al netto delle perdite dello stadio di conversione.
- La potenza nel punto 2 viene divisa per la tensione ottenuta dal modello della batteria (punto 3) in modo da ottenere la corrente di carica o scarica.
- Dalla stima della corrente di batteria si mantiene aggiornato il SoC a cui è collegata la variazione della tensione a vuoto e dei parametri di batteria.e
- Attraverso questo schema è possibile risalire all'energia scambiata con la batteria al netto di tutte le perdite (punto 4).

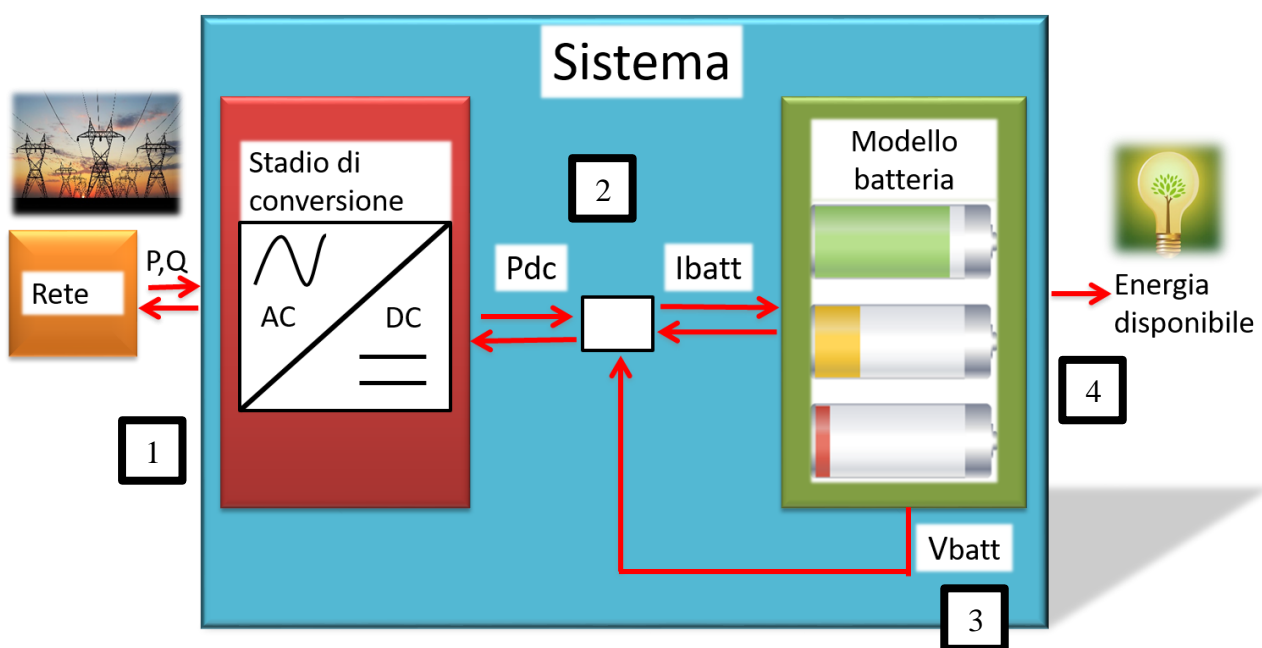


Figura 14 Logica di funzionamento del SoE che si è realizzato

Si ottiene che sia l'approccio neurale sia il modello della batteria non potranno mai riprodurre il comportamento della batteria in qualsiasi situazione perché possono descrivere solo un numero limitato di esperimenti circoscritti a determinare le condizioni operative.

Nel capitolo seguente si cercherà tra la bibliografia esistente un modello di batteria che rispetti i requisiti di affidabilità, robustezza, richieda una parametrizzazione più breve possibile e non comporti un elevato onere computazionale in modo che il tool possa essere eseguito in real time.

## 4 Modellizzazione della batteria

Per la stima del SoE si è deciso di basarsi sullo stato di carica della batteria. Per poter stimare il SoC efficacemente è necessario costruire un modello della batteria in grado di restituire tensione e SoC finale ricevendo in ingresso SoC iniziale e corrente erogata dalla cella. In questo capitolo si descrivono le caratteristiche tecniche del sistema di accumulo oggetto della tesi e si discutono i modelli che possono essere applicati ad una batteria. Dopo una breve ricerca bibliografica si è scelto un modello che non richieda un onere computazionale troppo elevato (poiché deve essere eseguito in real-time). Infine sarà illustrata l'implementazione in Simulink® del modello scelto e la sua validazione con le prove in laboratorio.

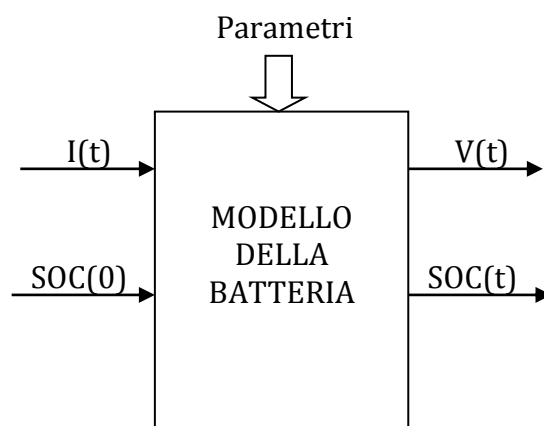


Figura 15 Input e output di un modello di una batteria

### 4.1 Batteria

La batteria in prova è costituita da 31 moduli elementari (mod. 12FIT150 monolite della FIAMM), a loro volta composti da sei celle, collegati in serie. I moduli sono del tipo VRLA con elettrolita completamente assorbito in separatori in fibra di vetro (AGM) ad elevatissima porosità. Gli elettrodi sono realizzati con piastre impastate, le griglie di supporto sono realizzate con una lega di piombo calcio stagno di elevata qualità. Le batterie sono dunque ermetiche con il coperchio sigillato al contenitore tramite termosaldatura per evitare che vi siano perdite. Per questo ogni elemento è equipaggiato con valvole di sicurezza unidirezionali che permettono ai gas in eccesso di uscire in caso di sovraccarica e conseguente solfatazione. Sia coperchio che contenitore sono realizzati con spesse pareti realizzate con plastiche ABS ritardanti alla fiamma per avere una elevata resistenza meccanica e sicurezza.

Le connessioni intercella e le barre di collegamento sono ampie in modo da garantire basse perdite anche con elevate correnti di scarica. I terminali filettati con inserti in ottone garantiscono alta conduttività. Tutti questi accorgimenti consentono alla batteria di avere un'autoscarica inferiore al



2% al mese a 20°C (dichiarata dal costruttore) con 6 mesi di stoccaggio garantito senza necessità di carica.

Caratteristiche elettriche:

- Tensione tampone a 20°C: 13,62 V/monobl. (2,27 V/el)
- Tensione di ricarica: 14,4 V/monobl. (2,40 V/el)
- Compensazione per la temperatura: -15 mV / °C / monobl.
- Alte prestazioni per scariche da 30 minuti a 10 ore

**Tabella 3 caratteristiche tecniche modulo**

Modello	Tensione nominale (V)	Capacità (Ah) a 20°C	Corrente di corto circuito (A)	Resistenza interna (mOhm)	Dimensioni (mm)			Peso (kg)	Terminali
		1,80 V/el in 10 ore	IEC 60896 21-22	IEC 60896 21-22	Lunghezza	Larghezza	Altezza		
12 FIT 150	12	150	2950	4,1	558	126	282	48,5	Femmina M8

## 4.2 Modello della batteria

In letteratura sono presenti numerosi articoli che trattano modelli delle batterie che permettano di monitorare lo stato di salute e di carica residua. Lo scopo di questo lavoro è trovare un modello più affidabile possibile e indipendente dalle condizioni di test per prevedere la sostituzione di una batteria esausta o l'energia residua che può ancora erogare. La procedura da utilizzare per ricavare i parametri deve essere semplice e facilmente implementabile, per esempio su sistemi di accumulo già realizzati come gli UPS presenti nelle sottostazioni AT/MT. Inoltre, il modello non deve richiedere un onere computazionale troppo elevato per avere una stima dello stato della batteria in tempi brevi. Esistono svariate tipologie di modelli, ognuno con un approccio diverso [6]. La scelta del modello è basata sulle osservazioni che vogliamo fare e quindi sui fenomeni che si ritiene di dover prendere in considerazione per la valutazione finale.

Di seguito si elencano vari modelli di una cella elementare presenti in letteratura:

- 1) **Modello elettrochimico:** sono i più accurati, poiché descrivono i processi elettrochimici che avvengono nella cella in maniera rigorosa. Richiedono una conoscenza molto approfondita della cella, dei materiali di cui è costituita e di quelli che prendono parte alle reazioni poiché nel modello vanno inseriti i loro parametri di natura chimica e fisica. Risolverli richiede di solito un grande onere computazionale poiché si utilizzano numerose equazioni differenziali non lineari. Per questa loro complessità tali modelli non possono essere usati per

applicazioni real-time, ma vengono usati per migliorare la progettazione della cella a livello di geometrie e materiali.

2)**Modelli analitici:** sono caratterizzati da un elevato grado di astrazione che tuttavia consente di semplificare il processo risolutivo che si esaurisce in poche equazioni. Uno di questi modelli è la Legge di Peukert il cui ragionamento di base è che la carica rimanente  $L$  di una batteria, sottoposta a un carico costante caratterizzato da una corrente  $I$  sarebbe proporzionale a:

$$L = \frac{a}{I^b}$$

Dove  $a$  è un valore vicino alla capacità nominale della batteria, mentre  $b$  ha valori compresi di solito tra 1.2 e 1.7 a seconda della tipologia di batteria. La legge di Peukert può essere estesa anche al caso in cui la corrente di scarica non sia costante considerando il valore medio:

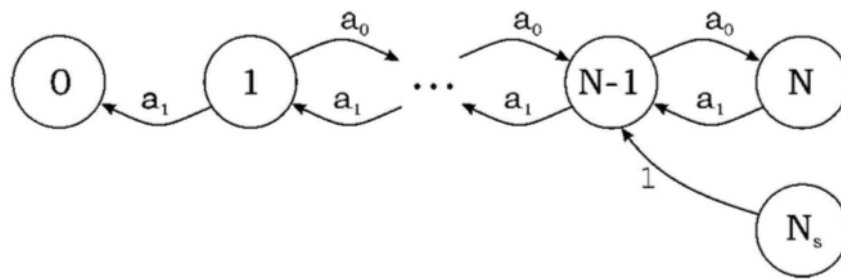
$$L = \frac{a}{\left(\frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot dt\right)^b}$$

Questa semplificazione comporta tuttavia un grande errore, perché dà per scontato che correnti di scarica dello stesso valore medio comportino la medesima durata della cella, il che è falso. Tale modello, pur avendo il pregio di essere estremamente semplice, comporta errori elevati, specie in presenza di carichi variabili nel tempo, in quanto non tiene conto del recovery effect<sup>3</sup>.

3)**Modelli stocastici:** anche questi modelli presentano un elevato grado di astrazione e mirano a rappresentare i fenomeni di carica/scarica e del recovery effect come processi stocastici Markoviani a tempo discreto. Secondo questo modello ogni stato della cella è attribuibile unicamente allo stato immediatamente precedente e non dal come si è giunti a tale stato.

---

<sup>3</sup> Recovery effect: detto anche effetto memoria. È un fenomeno osservato nelle batterie dove l'energia disponibile in un dato istante è minore della differenza tra energia totale caricata durante una carica completa e l'energia scaricata fino ad un istante prima.



**Figura 16** Shema rappresentativo di un modello stocastico

Gli stati di carica di una cella sono  $N+1$ , numerati da 0 a  $N$ . Il numero associato allo stato della cella corrisponde alla quantità di energia di carica direttamente disponibile a fronte di una scarica continua. Ad ogni step temporale è inoltre associata una probabilità  $q$  che indica la probabilità che una carica venga consumata e la probabilità  $1-q$  che indica invece la probabilità che tale carica venga recuperata. La cella risulta essere scarica quando  $N=0$  o quando sono state scaricate un massimo di  $T$  cariche, in cui  $T$  è il numero di cariche teoricamente accumulabili nella cella. Questo modello però risulta essere troppo semplice per descrivere condizioni operative reali, in quanto il tasso di recupero non è costante durante la scarica e in molte applicazioni la corrente di scarica è tempo variante. Per questo è stato migliorato aggiungendo la dipendenza della probabilità di carica dallo stato di carica. Inoltre, è stato preso in considerazione il fatto che in uno step temporale possano essere consumate più unità di carica e la probabilità non nulla che la cella rimanga nello stesso stato senza che si carichi o scarichi. Tale modello riesce a descrivere qualitativamente bene il comportamento di una cella sottoposta a scariche impulsive, ma non è chiaro quale sia il suo comportamento quantitativo per altri profilo di carico, in quanto si focalizza solo sul recovery effect, fornendo come risultato solo i valori del guadagno tra scarica impulsiva e continua, ma non il valore della durata residua della batteria. Infine non fornisce alcuna informazione sulla tensione ai morsetti come il modello analitico presentato precedentemente.

- 4) **Modelli circuitali:** questi modelli si basano sulla costruzione e parametrizzazione di un circuito elettrico tramite l'uso di elementi ideali come generatori, resistori e condensatori, in modo che esso restituisca ai morsetti esterni esattamente ciò che è in grado di erogare la cella. Per identificare i parametri sono richieste varie misure, tuttavia la loro stima è molto più semplice che nei modelli elettrochimici. Come grado di accuratezza e complessità sono un buon compromesso tra i modelli elettrochimici e i modelli analitici. È evidente che all'aumentare della complessità del modello aumenta l'accuratezza, ma diminuisce la

semplicità di comprensione delle dinamiche del sistema e l'applicabilità.

Di seguito sono stati descritti i principali circuiti equivalenti che possono essere utilizzati per descrivere il comportamento dinamico delle celle al piombo.

### Modello RC

Il modello RC (Figura 17) tramite l'inserimento di due condensatori stima in modo separato la carica accumulabile dal dispositivo attraverso la capacità  $C_b$  di valore elevato e gli effetti superficiale della batteria tramite  $C_c$  di piccolo valore. I resistori  $R_e$ ,  $R_t$ ,  $R_c$  stimano invece le perdite associate alle varie sezioni circuitali.

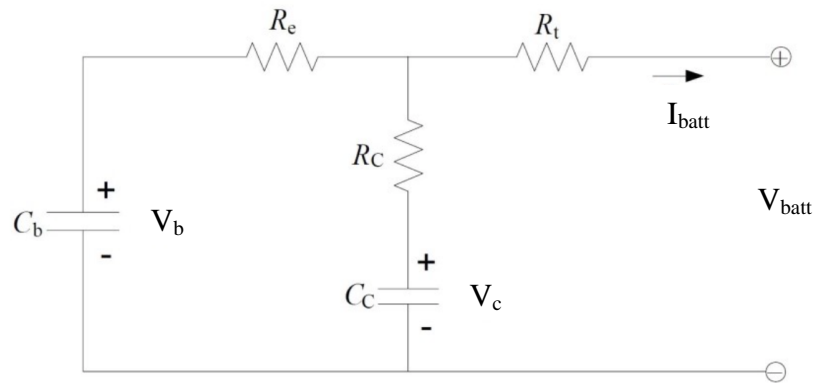


Figura 17 Modello RC

La presenza dei due condensatori consente di modellare il recovery effect quando la batteria rimane a vuoto per un periodo abbastanza lungo.

Le equazioni costitutive sono:

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b \cdot (R_e + R_c)} & \frac{1}{C_b \cdot (R_e + R_c)} \\ \frac{1}{C_b \cdot (R_e + R_c)} & \frac{-1}{C_b \cdot (R_e + R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_c}{C_c \cdot (R_e + R_c)} \\ \frac{-R_c}{C_c \cdot (R_e + R_c)} \end{bmatrix}$$

$$V_{batt} = \begin{bmatrix} \frac{R_c}{R_e + R_c} & \frac{R_c}{R_e + R_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ V_c \end{bmatrix} + \left( -R_t - \frac{R_e \cdot R_c}{(R_e + R_c)} \right) (I_{batt})$$

### Modello PNGV generalizzato

L'aggiunta del condensatore in serie al generatore di tensione, come illustrato in Figura 18, consente di modellizzare il cambiamento della tensione a vuoto durante il processo di carica. Anche questo modello grazie al gruppo RC prende in considerazione il recovery effect.

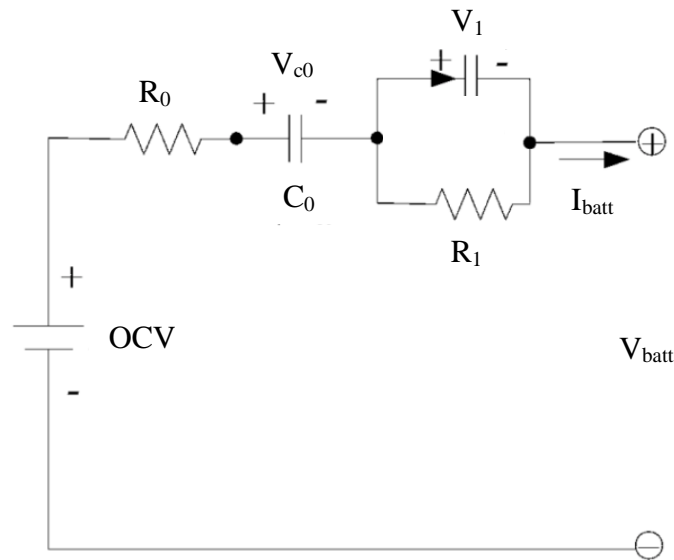


Figura 18 Modello PNGV generalizzato

Le equazioni costitutive sono le seguenti:

$$\begin{cases} \dot{V}_{c0} = OCV' \cdot I_L \\ V_1 = -\frac{V_1}{R_1 \cdot C_1} + \frac{I_L}{C_1} \\ V_{batt} = OCV - V_{c0} - V_1 - I_{batt} \cdot R_0 \end{cases}$$

## Modello dinamico

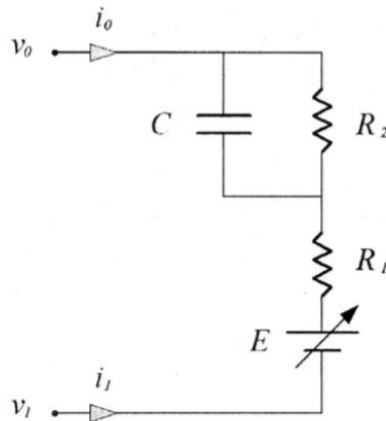


Figura 19 modello dinamico

Il circuito in Figura 19 è composto da parametri costanti tranne per quanto riguarda il generatore di tensione variabile  $E$  a cui spetta l'onere di rappresentare il comportamento non lineare della batteria in funzione del SoC e della temperatura. Per modellizzare i parametri bisogna seguire dei passaggi precisi nel giusto ordine:

- Si sceglie una corrente di scarica arbitraria (di solito la corrente nominale definita come la corrente costante necessaria a scaricare completamente la batteria in un'ora) e si associa ad essa, per ogni valore del SoC, la tensione di cella.
- La corrente precedentemente usata viene assunta come corrente di riferimento e viene stabilita la sua dipendenza dal DoD (Depth of Discharge complemento a 1 del SoC) tramite il fattore  $\alpha(i)$  definito come il rapporto tra la capacità scaricabile alla corrente nominale e la capacità scaricabile ad una generica corrente. Le capacità sono considerate alla stessa temperatura.
- Tale temperatura viene assunta come riferimento e la dipendenza del DoD dalla temperatura viene stimata tramite il parametro  $\beta(T)$  definito come rapporto tra la capacità scaricabile a corrente nominale e temperatura  $T$  di riferimento e quella sempre a corrente nominale ma ad una generica temperatura.
- Infine si introduce il termine correttivo  $\Delta E(T)$  dovuto alla possibile variazione del potenziale della cella a vuoto al variare della temperatura.

I valori di  $\alpha(i)$ ,  $\beta(T)$  e  $\Delta E(T)$  per una condizione generica di esercizio sono ottenuti interpolando i valori memorizzati mediante prove sperimentali. Le equazioni costitutive che descrivono il comportamento di tale modello costituiscono il seguente sistema:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{[i(t),T(t),t]} = v_{[i(t),T(t),t]} - R_{int}i(t) \\ v_{[i(t),T(t),t]} = \sum_{k=0}^n c_k D^k D_{[i(t),T(t),t]} + \Delta E(t) \\ D^0 D_{[i(t),T(t),t]} = \frac{1}{Q_r} \int_0^t \alpha_{[i(t)]} \beta_{[T(t)]} i(t) dt \\ i(t) = \frac{1}{R_2} [v(t) - E_{[i(t),T(t),t]} - R_1 i(t)] + C \frac{d}{dt} [v(t) - E_{[i(t),T(t),t]} - R_1 i(t)] \\ mc_p \frac{dT(t)}{dt} = i(t)^2 R_1 + \frac{1}{R_2} [v(t) - E_{[i(t),T(t),t]} - R_1 i(t)]^2 - h_c A [T(t) - T_a] \end{array} \right.$$

Si nota che le prime quattro equazioni sono di natura prettamente elettrica, mentre la quinta si occupa di modellare il comportamento termico della cella. Tale modello ha il vantaggio di essere molto semplice e di tenere conto della temperatura, fattore che influenza pesantemente il comportamento di una batteria e che è molto variabile a seconda delle condizioni operative e ambientali. Esso è dotato di una buona accuratezza, a patto di operare a temperature medio-alte e con correnti contenute.

Infatti, a basse temperature e/o a correnti elevate, si hanno errori sulla tensione stimata piuttosto alti, dovuti soprattutto al considerare costanti tutti i parametri circuitali, specie la capacità, ad eccezione del generatore di tensione.

### Modello $R_{INT}$

Il modello  $R_{INT}$  in Figura 20 è il più semplice ed è costituito da un generatore ideale di tensione, che rappresenta la tensione a vuoto, e da una resistenza serie.

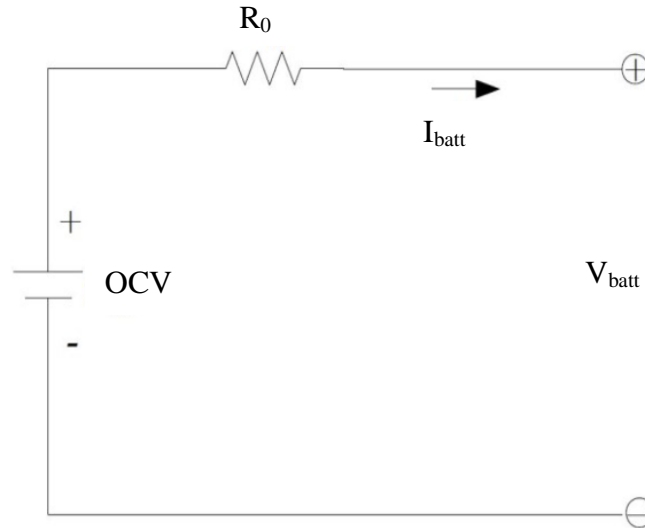


Figura 20 Modello  $R_{INT}$

Esso modella il fenomeno del salto ohmico e non è in grado di rappresentare la dinamica di cella o di simulare correttamente il recovery effect. Può comunque essere adottato per modellizzare sistemi di accumulo anche in applicazioni molto veloci, quali la Power Quality. Affinché tale modello dia buoni risultati sulla tensione stimata ai morsetti è necessario che entrambi i parametri dipendano dal SoC, dall'invecchiamento e dalla temperatura di cella.



### Modello DP (Double Polarization)

Tramite l'aggiunta del gruppo resistenza-condensatore in parallelo si riesce a modellizzare in modo migliore la dinamica della batteria. Il modello elettrico equivalente è riportato in Figura 21.

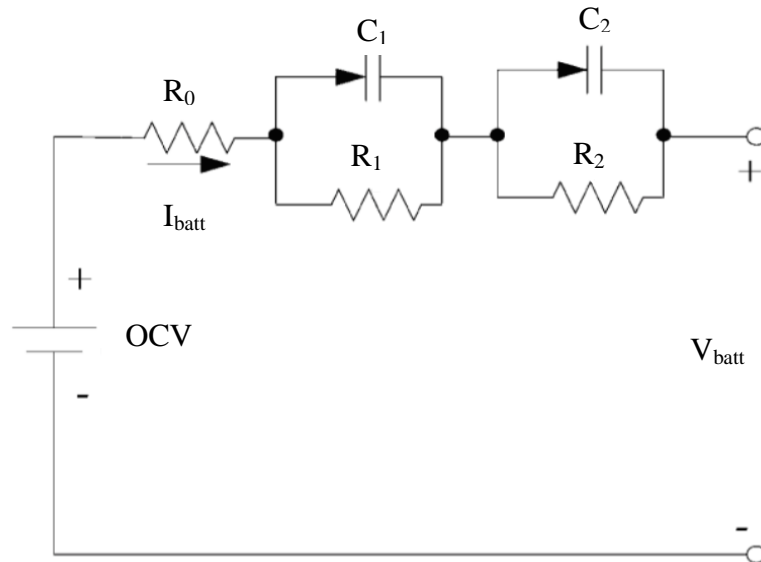


Figura 21 Modello DP

Dove:

- $OCV$  è la tensione a circuito aperto della cella (open circuit voltage) misurata a diversi SoC dopo un periodo abbastanza lungo da considerare esaurito il transitorio della tensione
- $I_{batt}$  è la corrente di batteria uguale per tutti i moduli collegati in serie
- $V_{batt}$  è la tensione di cella

Il primo gruppo RC rappresenta rispettivamente la resistenza e la capacità associate alla polarizzazione elettrochimica, permettendo così di stimare il recovery effect. Il secondo gruppo approssima la polarizzazione dovuta ai processi di concentrazione [19]. Come si può dedurre, nel caso in cui ci sia un numero di gruppi RC maggiore, si avrà anche una maggiore accuratezza del modello, a discapito della semplicità con cui si determinano i parametri.

Il tipo di modello che si ritiene più adatto alle nostre esigenze è sicuramente quello elettrico, in particolare quello a doppia polarizzazione, poiché rappresenta il miglior compromesso tra rapidità di calcolo e accuratezza, come verrà mostrato di seguito nei risultati sperimentali.

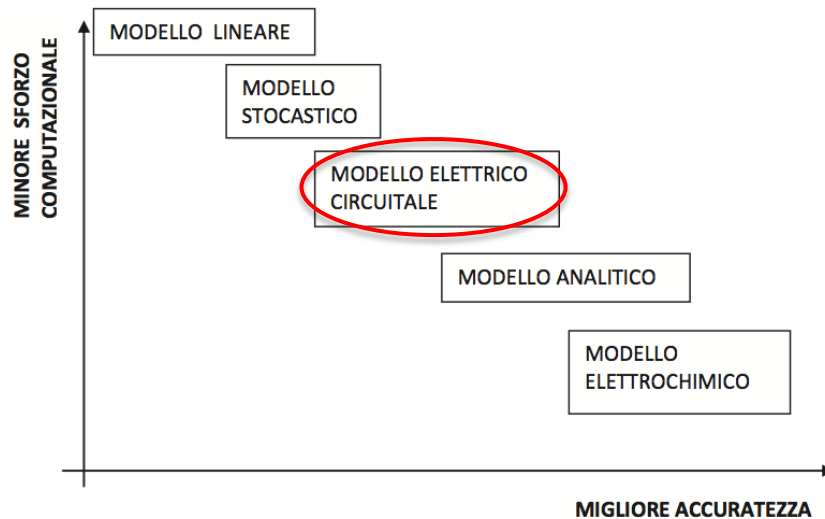


Figura 22 Accuratezza in rapporto agli oneri computazionali dei modelli presi in considerazione

### 4.3 Prove di caratterizzazione

Prima di illustrare come sono stati calcolati i parametri del circuito è necessario fare una premessa. Per eseguire una analisi in modo rigoroso si ipotizza un comportamento non lineare dell'accumulo [20]. I parametri quindi saranno calcolati più volte e a diversi SoC in modo da caratterizzare la batteria in tutto il suo campo di funzionamento. Il circuito sarà sempre lo stesso ma il valore delle resistenze, delle capacità e della OCV cambierà mano a mano che la batteria muta il suo stato.

Nasce quindi un problema: è necessario riferire tali valori ad un valore di SoC<sup>4</sup> "assoluto" che non varia a seconda della corrente di scarica. Perciò è fondamentale per la sua stima basarsi sulla capacità massima della batteria che, a differenza della capacità disponibile, non cambia in funzione della corrente.

$$SoC = \frac{C_{disp}}{C_{max}} = \frac{C_{max} - \int_0^t I \cdot dt}{C_{max}}$$

Per capire meglio vediamo come sono definite tali capacità.

---

<sup>4</sup> SoC: Indice che mostra lo stato di carica in percentuale rispetto alla massima carica immagazzinabile dall'accumulo.

La capacità massima di una batteria è definita come la sommatoria delle cariche accumulate nella batteria alla fine del periodo di carica.

$$C_{max} = \sum_{k=0}^n I_k \Delta t_k$$

La condizione di batteria completamente scarica o completamente carica viene individuata tramite la tensione a vuoto di batteria. Infatti tale tensione non è costante ma varia a seconda dello stato della batteria diminuendo durante la scarica e aumentando durante la carica. Questo la rende un importante indicatore di stato. Nel nostro caso abbiamo fissato come condizione di batteria completamente scarica una tensione a vuoto di modulo di 10,5 V e una tensione di batteria di 341 V, mentre alla condizione di batteria completamente carica abbiamo associato una tensione di modulo di 14 V e di batteria di 422 V. Per salvaguardare l'integrità dei moduli è stata prevista l'apertura dell'interruttore e quindi l'interruzione della prova quando qualsiasi modulo raggiunge un limite di tensione, inferiore o superiore. Invece quando la batteria (composta da 31 moduli) raggiunge un limite di tensione, la corrente viene limitata in modo da ridurre le cadute di tensione sul circuito della batteria, proporzionali alla corrente, e mantenere costante la tensione ai morsetti.

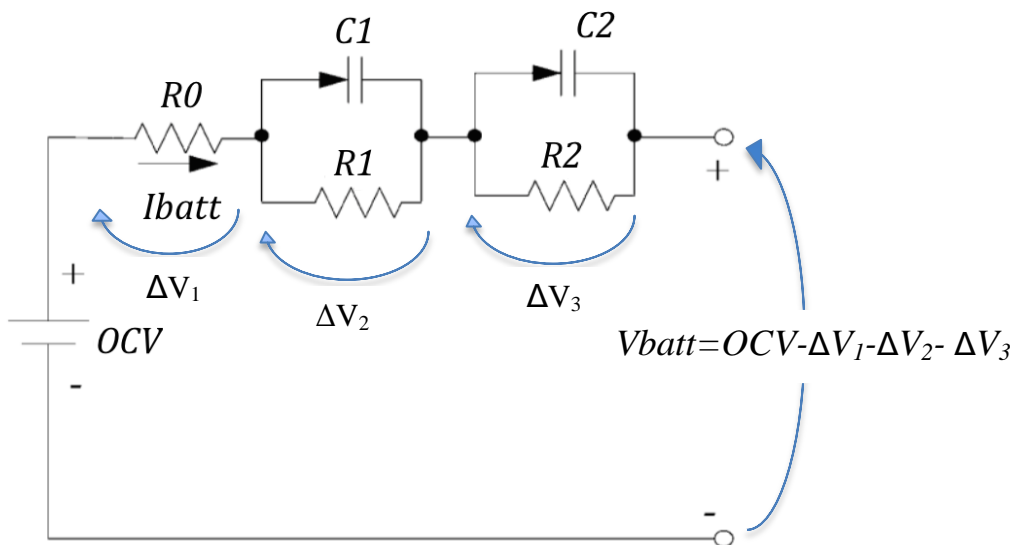
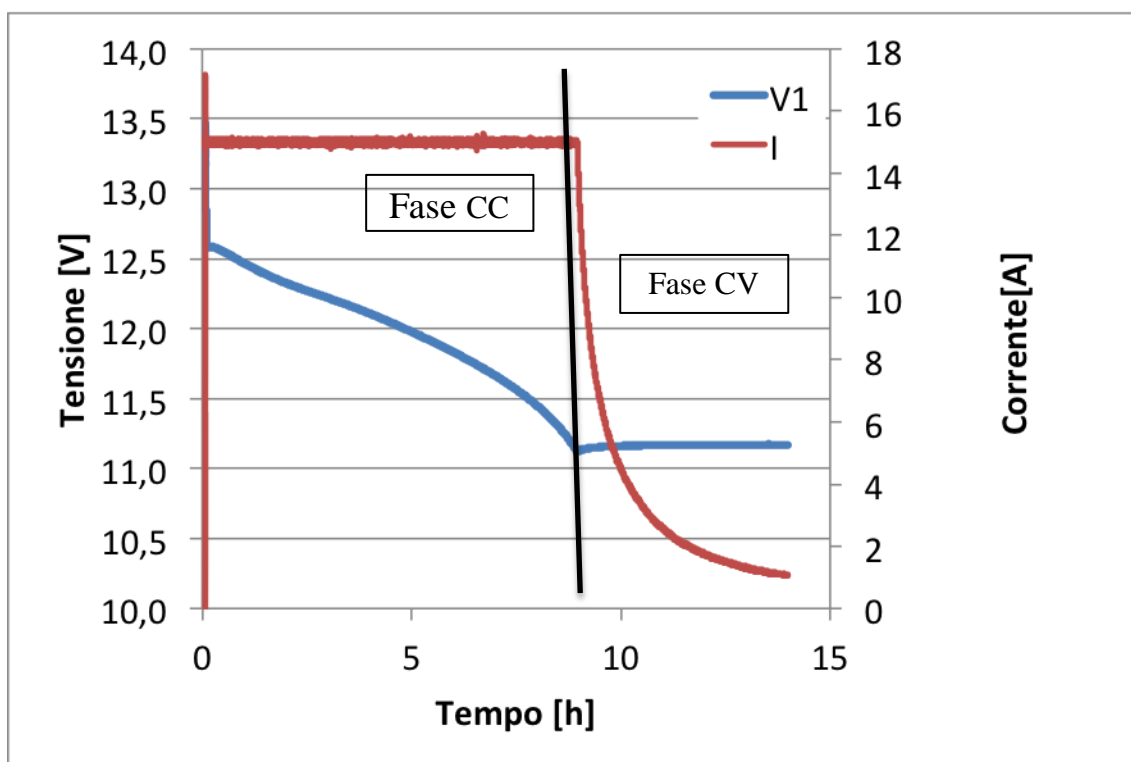


Figura 23 Cadute di tensione sul modello DP che modificano la tensione di cella proporzionalmente alla corrente

Con questo meccanismo, quando la tensione di batteria raggiunge il suo limite superiore o inferiore, la corrente viene ridotta sempre di più fino a quando diventa praticamente nulla e viene aperto l'interruttore generale del quadro mettendo la batteria a vuoto. Nella Figura 24 si illustra come esempio l'andamento della tensione e della corrente sul modulo 1 durante la scarica completa effettuata sull'intera batteria, composta da una prima fase a corrente costante (Fase CC) e una seconda a tensione costante (Fase CV) in cui si limita la corrente per evitare il superamento del limite di tensione inferiore di batteria.



**Figura 24** Andamento della tensione e della corrente del modulo 1 durante la scarica completa.

La capacità massima del modulo, misurata con la prova in Figura 24, è 149Ah; siccome la batteria è composta dalla serie di 31 moduli, allora la sua capacità massima sarà la minima tra quelle dei moduli. Dalla prova di scarica completa sull'intera batteria si è potuto vedere che due moduli, il numero 6 e il numero 13, hanno una capacità inferiore poiché sono stati i primi che hanno raggiunto il limite inferiore di modulo. Per evitare che la prova si interrompesse a causa di questi due moduli, per la sola prova di parametrizzazione si è accettato di abbassare i limiti inferiori di tensione dei moduli da 10,5 V a 9,8 V, in modo che si potesse portare a termine la fase a tensione costante senza

che essi facessero aprire l'interruttore generale<sup>5</sup>. In questo modo si è calcolata la capacità di tali moduli conteggiando la capacità scaricata fino a che essi non hanno raggiunto la tensione minima che poi avranno nel normale funzionamento, cioè 10,5 V. La capacità del modulo 6 è risultata essere 132,82 Ah mentre quella del modulo 13 133.76 Ah.

**Tabella 4 Capacità moduli**

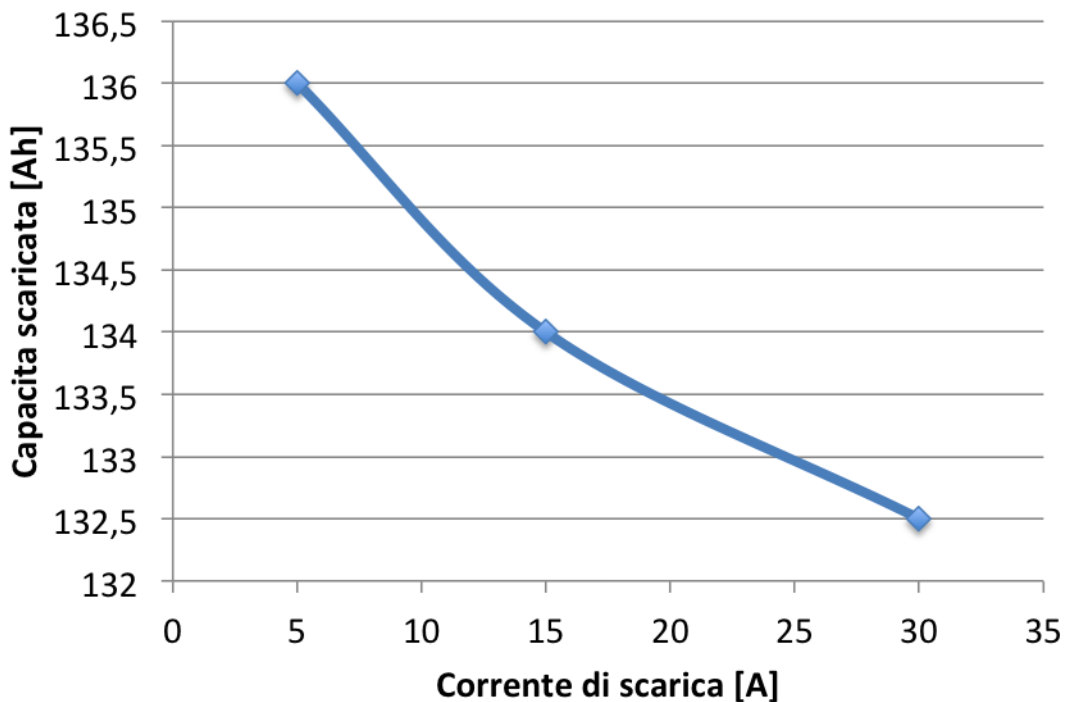
	modulo 6	modulo 13	tutti gli altri moduli
Ah	132,82	133,76	149,34
scarto %	11,06%	10,43%	

Allo stesso modo quando durante la carica la batteria raggiunge il limite superiore, l'inverter interviene riducendo la corrente e conseguentemente le cadute di tensione sul circuito mantenendo la tensione ai morsetti costante. È quindi possibile continuare la carica mantenendo costante la tensione e riducendo sempre più la corrente fino al punto in cui si annulla e la batteria raggiunge la capacità massima. Queste due fasi di carica si chiamano a corrente costante e a tensione costante. La capacità massima accumulata da una batteria a correnti diverse sarà sempre la stessa con l'unica differenza che più la corrente è alta e meno durerà la parte in CC poiché la batteria raggiungerà prima i limiti di tensione, a causa della maggiori cadute sul suo circuito interno, e la corrente verrà limitata.

---

<sup>5</sup> Nota: avendo consentito il superamento dei limiti di tensione una sola volta (solo per la prova di scarica completa a 15 A) non si è notato un invecchiamento anomalo dei moduli nelle prove successive.

La capacità disponibile, sia in carica che in scarica, corrisponde all'area sottesa dalla corrente nella fase CC, e varia in funzione della corrente stessa (Figura 25).



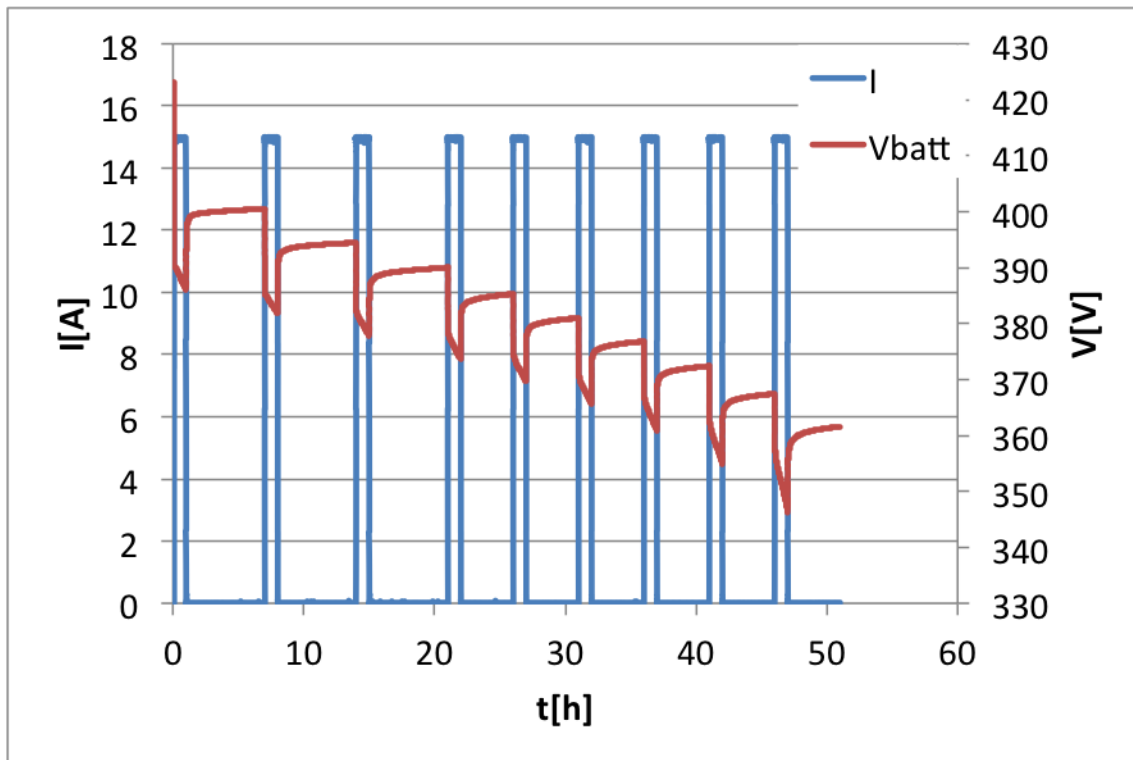
**Figura 25 Dipendenza della capacità disponibile, della batteria in oggetto, in funzione della corrente erogata**

La capacità corrispondente alla fase di carica a tensione costante, che corrisponde all'area sottesa dalla corrente, nonostante sia contenuta nella batteria, non è estraibile durante il normale funzionamento perché in questa fase la corrente è limitata, quindi la batteria non erogherebbe la potenza richiesta.

Per stimare i parametri del circuito equivalente scelto va effettuata una prova che consiste in una serie di gradini di scarica a corrente costante intervallati da un fase a corrente nulla della durata sufficiente a far stabilizzare la tensione dei moduli a quella della tensione a vuoto (OCV), che per le batterie al piombo in studio è di qualche ora (Figura 26) [20]. La prova deve essere effettuata a partire da cella completamente carica, in modo da assicurare uno stato di carica iniziale pari al 100%, fino al raggiungimento della condizione di fine scarica, e cioè al raggiungimento di una delle due seguenti condizioni:

- Tensione minima di batteria;
- Tensione minima di modulo.

L'andamento di tensione e corrente che si ottiene è quello mostrato in Figura 26.



**Figura 26 Andamento della tensione e della corrente durante la prova di parametrizzazione**

Quando la batteria eroga corrente la sua tensione cala di  $\Delta V$ , dopo di che diminuisce fino a quando viene riportata a vuoto, cioè a corrente nulla. Nel momento in cui la corrente si annulla con un gradino la tensione avrà inizialmente un rapido innalzamento, legato alla resistenza serie  $R_0$ , e successivamente un lento transitorio da cui si potranno ricavare i valori dei parametri dei gruppi RC. Il valore a cui tenderà questo transitorio a regime sarà legato ai valori di  $R_1$  e  $R_2$  e rappresenta la tensione a vuoto della batteria ad un determinato SoC, costituita dalla somma delle tensioni a vuoto di tutti i moduli. Quindi, dalla prova di parametrizzazione si ricavano i parametri del modello elettrico di ogni modulo.

Per calcolare  $R_0$  si considera il  $\Delta V$  associato al modulo durante il primo secondo successivo al fronte di discesa della corrente con la formula seguente:

$$R_0 = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

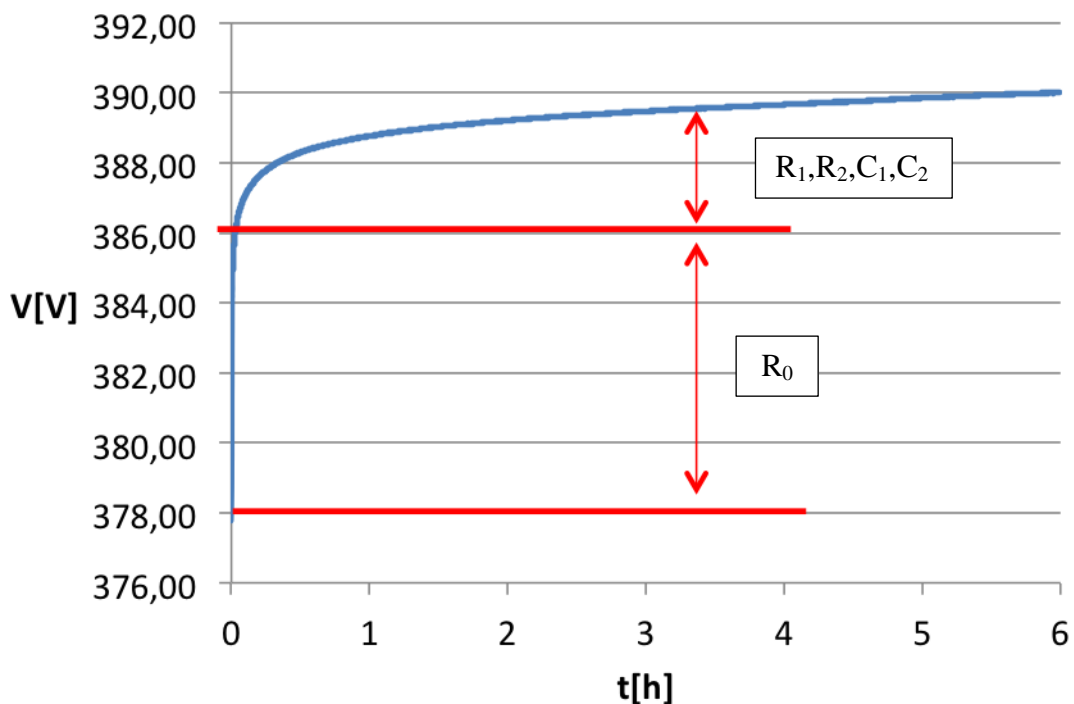
Questa operazione va ripetuta per ogni gradino di scarica in modo da ottenere il valore della resistenza serie a diversi valori del SoC, fino a che non si raggiunge un limite di modulo o di batteria. Tale ciclo di prova è parametrico e dipende, oltre che dalla corrente di scarica  $I_{test}$  scelta per la prova, anche dal numero di campioni che si vogliono prelevare all'interno dell'intero

intervallo dello stato di carica, cioè per quale variazione minima del SoC si vogliono stimare tali parametri. La durata di ciascun gradino di scarica, espresso in secondi, è pari a:

$$\Delta T = \frac{C_{max}}{N \cdot I}$$

dove  $C_{max}$  rappresenta la capacità massima ed N è il numero di punti da prelevare all'interno del range del SoC che va dal 100% al 0% per cui si desidera effettuare la parametrizzazione.

Il numero dei gruppi RC e i valori delle resistenze e delle capacità di tali gruppi sono calcolati in modo da riuscire a seguire il più fedelmente possibile il transitorio da un secondo dopo che la scarica viene interrotta fino a quando comincia la successiva. È importante notare che il calcolo di tali parametri avviene a SoC costante poiché la scarica è stata interrotta.



**Figura 27 Andamento della tensione di cella nel tempo in risposta ad un gradino di corrente**

Per calcolare efficacemente i parametri RC è stato sviluppato uno script in Matlab®, che consente di calcolare i parametri attraverso metodi numerici che minimizzano lo scarto quadratico medio tra la tensione di modulo reale e quella modellizzata. In ingresso al programma vi sono i dati dell'andamento della tensione di cella a riposo, dopo un gradino di carica o di scarica.

Per il calcolo dei parametri si considera la fase di riposo che segue l'azzeramento della corrente di scarica. Durante questa fase lo stato di carica rimane infatti costante e quindi i parametri ottenuti sono relativi al SoC raggiunto alla fine del gradino di scarica.



La resistenza serie  $R_0$  viene calcolata nello stesso script osservando il salto ohmico che si manifesta all'inizio del transitorio dopo un  $\Delta t = 1s$ .

In laboratorio non si è svolta una prova di parametrizzazione per ogni modulo, ma con una sola prova sono stati parametrizzati tutti i moduli. Infatti, essendo tutti i moduli in serie la corrente misurata era uguale per tutti, mentre la tensione di ogni modulo era misurata ai suoi morsetti con un voltmetro<sup>6</sup>. In questo modo si sono calcolati i parametri di ogni modulo, ma con una sola prova.

Le prove di parametrizzazione sono state eseguite a varie correnti (15 A, 30 A e 45 A) per verificare se i parametri calcolati erano proporzionali alla corrente di scarica oppure indipendenti da essa. I risultati hanno mostrato che i parametri cambiano, ma seguono l'andamento di una funzione. Per esempio nella Figura 28 è mostrato l'andamento della media degli  $R_1$  dei moduli al variare della corrente di parametrizzazione e dello stato di carica. Si nota che il valore del parametro cambia notevolmente sia per variazioni del SoC sia per variazioni di corrente, diminuendo rispettivamente al diminuire del SoC e all'aumentare della corrente e viceversa. La linea di interpolazione superiore approssima l'andamento dei parametri a SoC vicino a 1, mentre al diminuire del SoC la linea di interpolazione trasla linearmente verso la curva inferiore. Da SoC 0,9 fino a batteria completamente scarica la linea di interpolazione rimane la stessa, cioè quella inferiore.

---

<sup>6</sup> Anche per questa prova è stato necessario abbassare i limiti di tensione per evitare che i moduli con meno capacità fermassero la prova per il raggiungimento del limite inferiore di batteria.

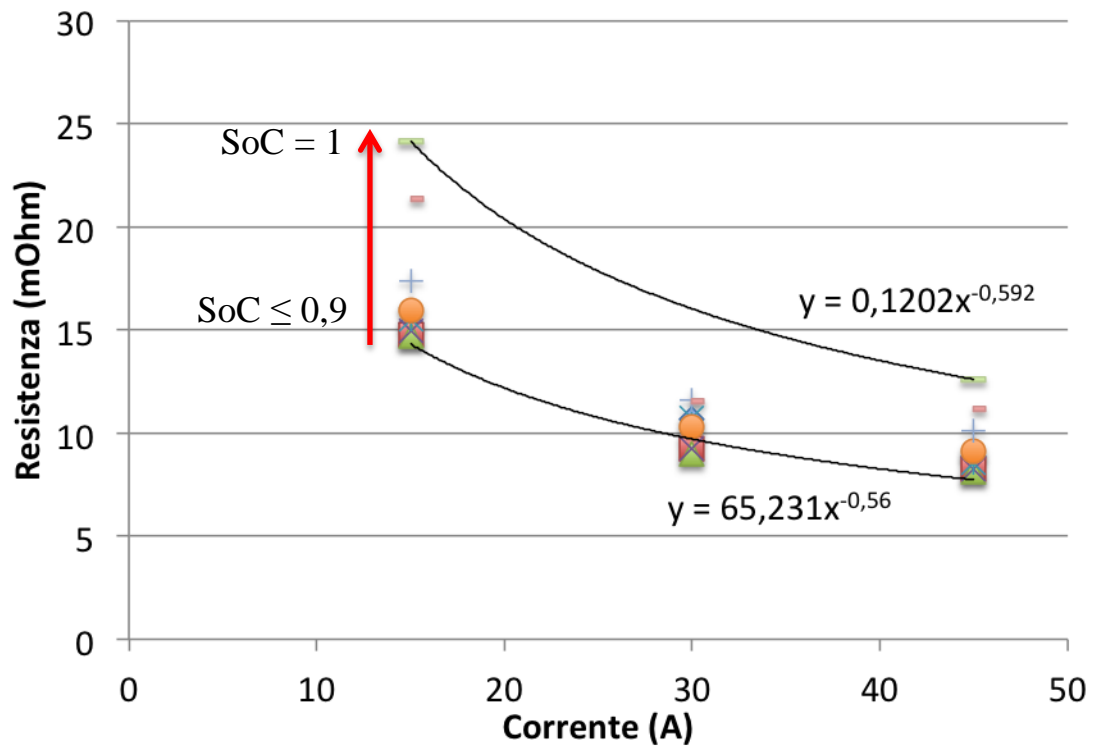


Figura 28 Andamento della media di R1 dei moduli al variare della corrente di parametrizzazione e del SoC

Di seguito nella Tabella 5 vengono mostrate le curve ottenute per tutti i parametri nello stesso modo della precedente. Si nota che solo  $R_0$  e  $R_1$  hanno un comportamento non lineare avvicinandosi a SoC 1; invece per  $R_2$ ,  $C_1$  e  $C_2$  l'andamento è approssimato da una sola funzione per qualsiasi SoC.

**Tabella 5 Andamenti di tutti i parametri in funzione della corrente e del SoC. Per le curve di interpolazione tra SoC 0,9 e 1 di  $R_0$  e  $R_1$  si rimanda all' Appendice A.**

Parametro		$y=F(I)$	$y[\text{Ohm}], I[\text{A}]$
<b>R0</b>	SoC=1		$y = 0,1731 I^{-0,513}$
	$0 < \text{SoC} < 0,9$		$y = 0,0156 I^{-0,206}$
<b>R1</b>	SoC=1		$y = 0,1202 I^{-0,592}$
	$0 < \text{SoC} < 0,9$		$y = 0,0652 I^{-0,56}$
<b>R2</b>	$0 < \text{SoC} < 1$		$y = 0,0252 I^{-0,606}$
<b>C1</b>	$0 < \text{SoC} < 1$		$y = 1,8687 I^2 - 127,32 I + 2738,9$
<b>C2</b>	$0 < \text{SoC} < 1$		$y = 2295,3 I^2 - 125391 I + 2E+06$

Le capacità, a differenza delle resistenze, presentano un andamento parabolico ma puramente fittizio, perché dovuto all'algoritmo usato per determinare i parametri minimizzando lo scarto quadratico medio tra la tensione misurata e quella stimata.

Di seguito vengono riportati gli andamenti dei parametri di tutti i moduli ottenuti dalla parametrizzazione a 15 A in funzione dello stato di carica della batteria definito come rapporto tra la capacità disponibile e la capacità massima di 149 Ah.

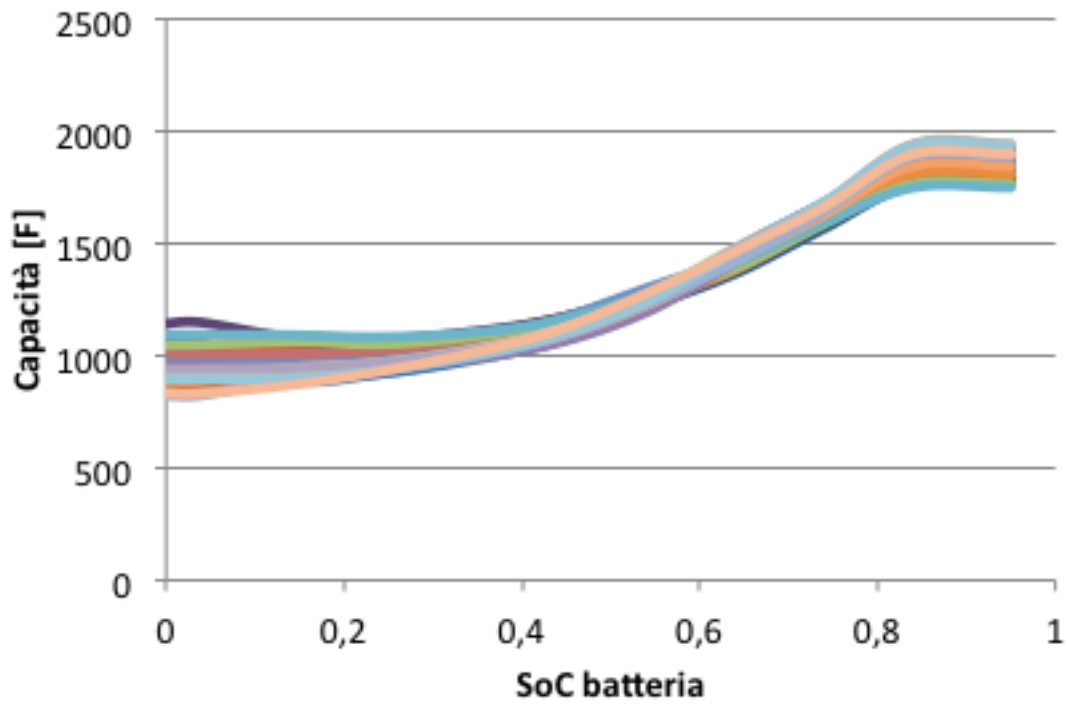


Figura 29 Andamento del parametro  $C_1$  per tutti i moduli ottenuto dalla parametrizzazione a 15 A

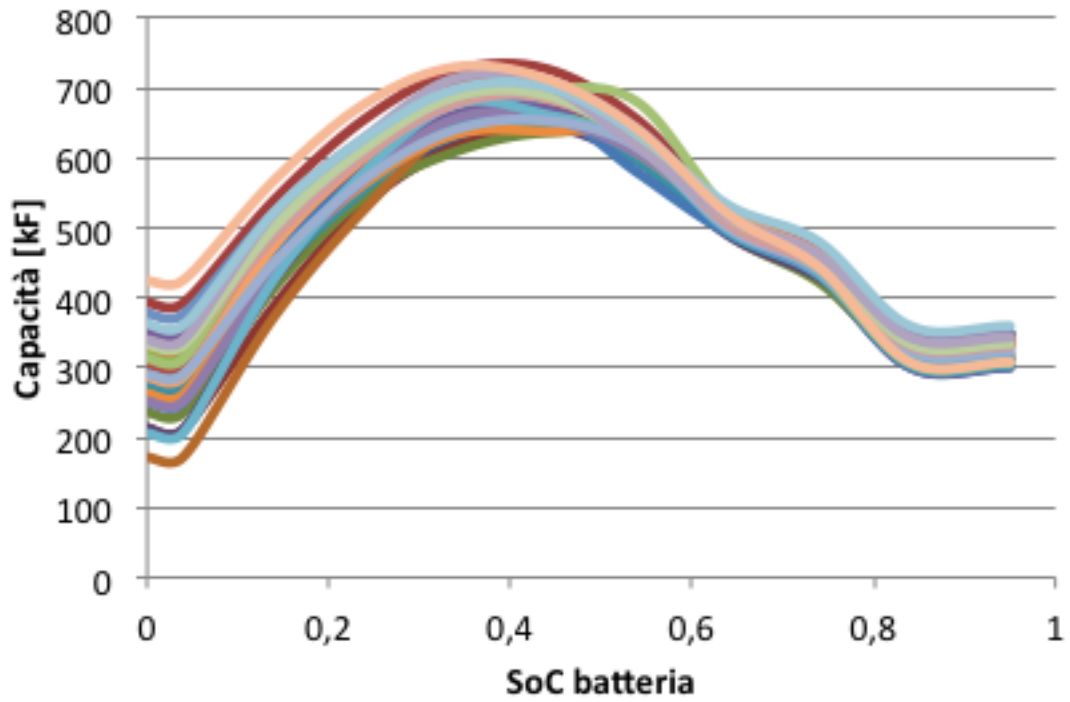


Figura 30 Andamento del parametro  $C_2$  per tutti i moduli ottenuto dalla parametrizzazione a 15 A

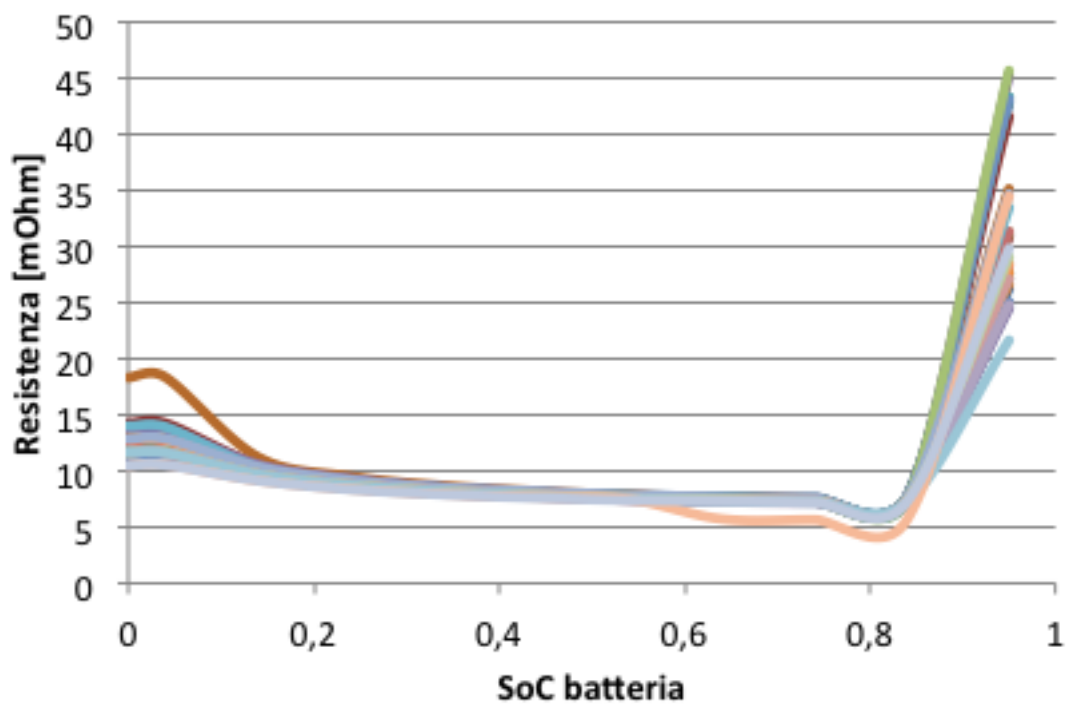


Figura 31 Andamento del parametro  $R_0$  per tutti i moduli ottenuto dalla parametrizzazione a 15 A

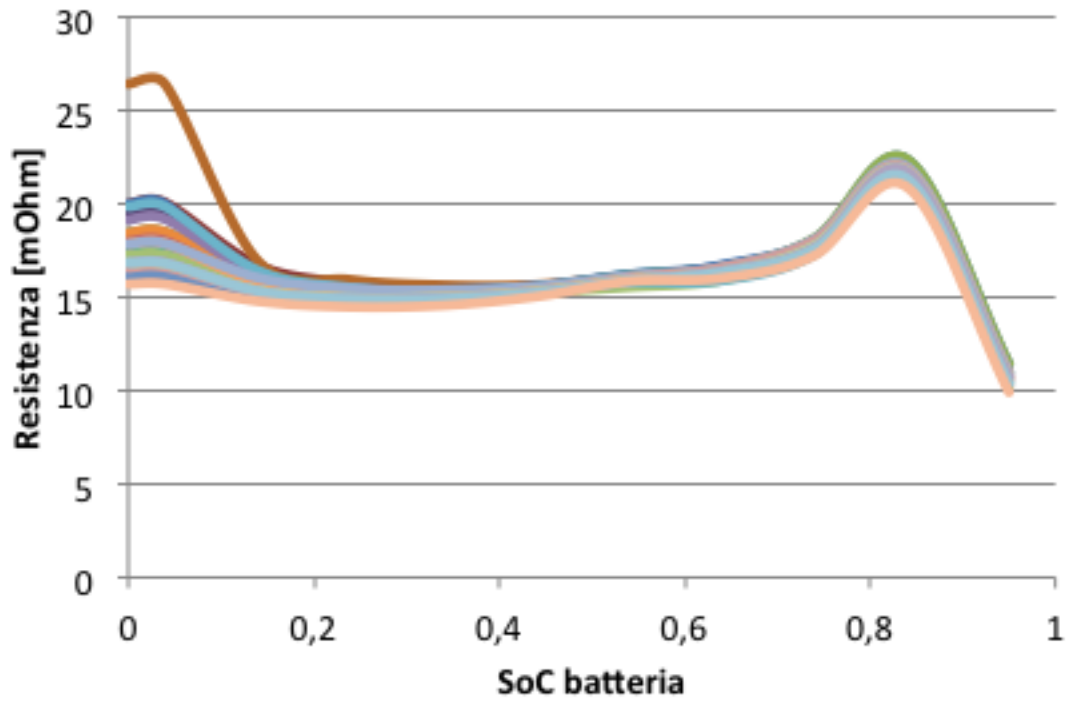


Figura 32 Andamento del parametro  $R_1$  per tutti i moduli ottenuto dalla parametrizzazione a 15 A

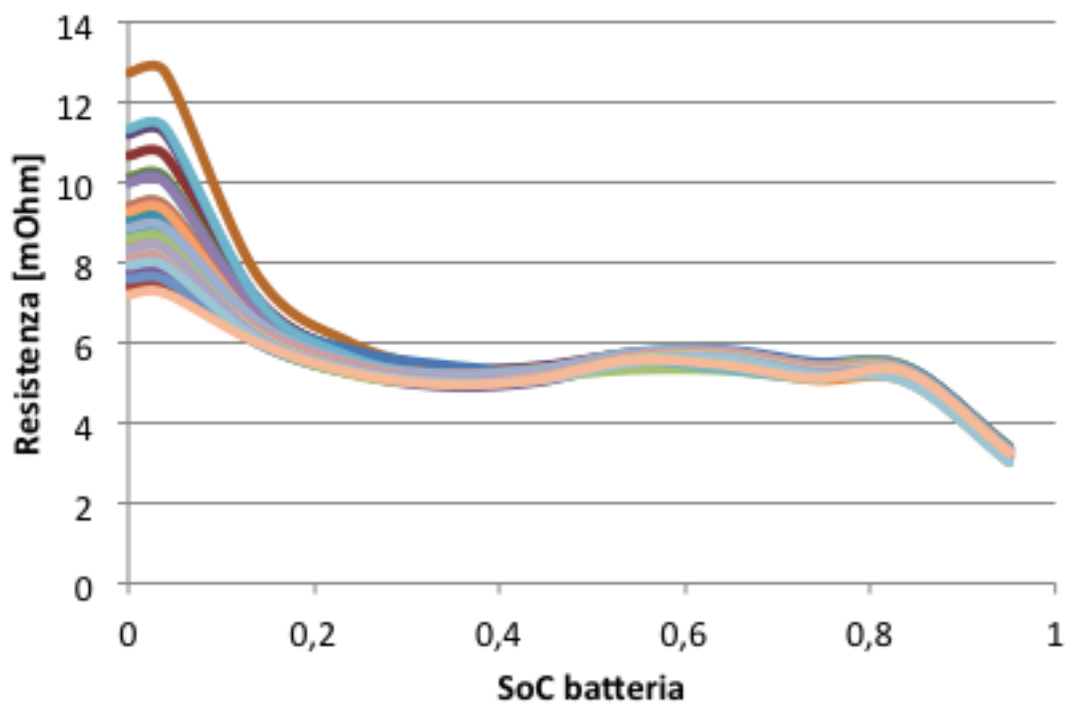


Figura 33 Andamento del parametro  $R_2$  per tutti i moduli ottenuto dalla parametrizzazione a 15 A

Tutti i risultati ottenuti vengono riportati nell' Appendice B.

#### 4.4 Implementazione software

Il modello della batteria è stato realizzato in Simulink® in modo che per ogni modulo si stimi stato di carica e i parametri in maniera completamente indipendente dagli altri. Questa scelta è stata fatta per rendere il software finale che fornirà il SoE facilmente scalabile e mantenibile. Infatti, nel caso in cui si cambiasse un modulo o si aggiungessero altri moduli alla batteria, non sarà necessario ripetere le prove di parametrizzazione su tutta la batteria, ma semplicemente solo sui moduli da inserire. Così facendo si diminuisce il tempo di fuori servizio della batteria e si semplificano le prove sperimentali da realizzare (effettuare delle prove su un singolo modulo anziché su una batteria comporta minori costi e difficoltà operative). I parametri di ogni modulo sono ricavati interpolando i valori di SoC e corrente con i valori determinati durante le prove di parametrizzazione. Per raggiungere una precisione maggiore si usano le curve di tendenza dei parametri, precedentemente illustrate, solo nel caso la corrente sia superiore a 45 A o inferiore a 15 A. Per correnti comprese tra questi due valori si interpolano i risultati realmente calcolati con le prove di parametrizzazione (Figura 34). Si è deciso di agire in questo modo per raggiungere la massima precisione e perché i moduli presenti in laboratorio non sono nuovi, ma derivano da applicazioni precedenti in cui sono stati usati in modo diverso, subendo un diverso invecchiamento motivo per cui hanno capacità differenti. Se si fosse usato un modello basato su valori medi, o se si avesse parametrizzato l'intera batteria, non si avrebbe tenuto conto della minor capacità dei moduli più usurati. Per esempio nella Figura 35 vengono mostrati i diversi valori del parametro  $R_0$  calcolato a 45 A per due moduli: il 3 a capacità standard e il 6 a capacità inferiore.

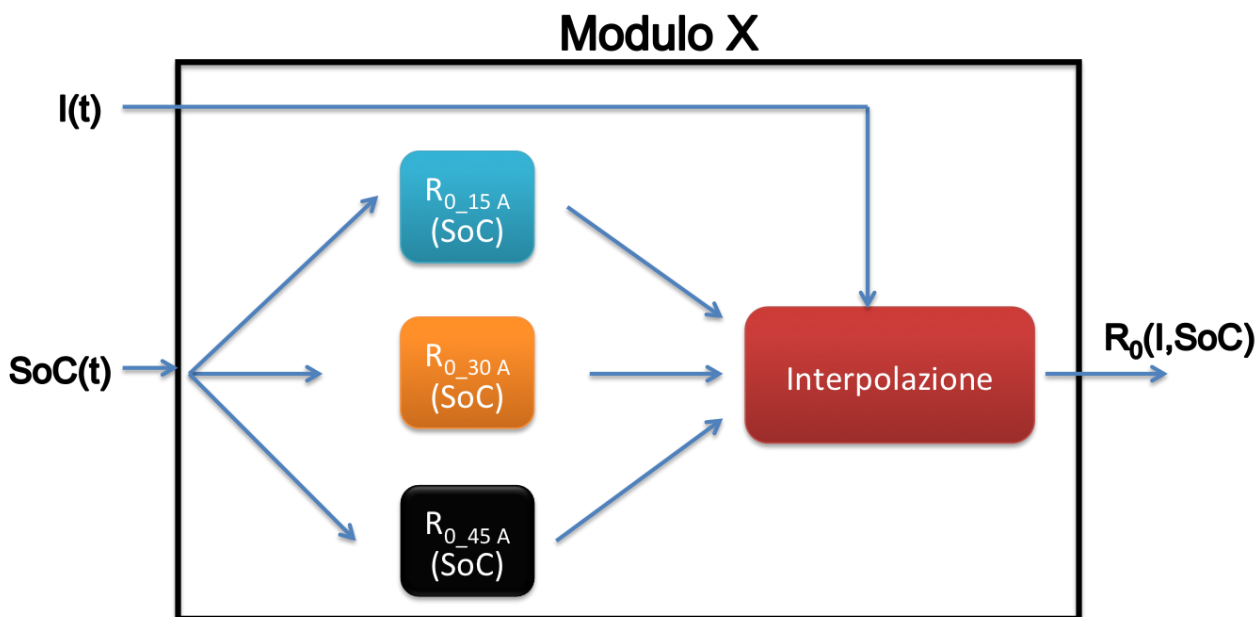


Figura 34 Logica con cui vengono individuati i parametri ad un determinato SoC e I

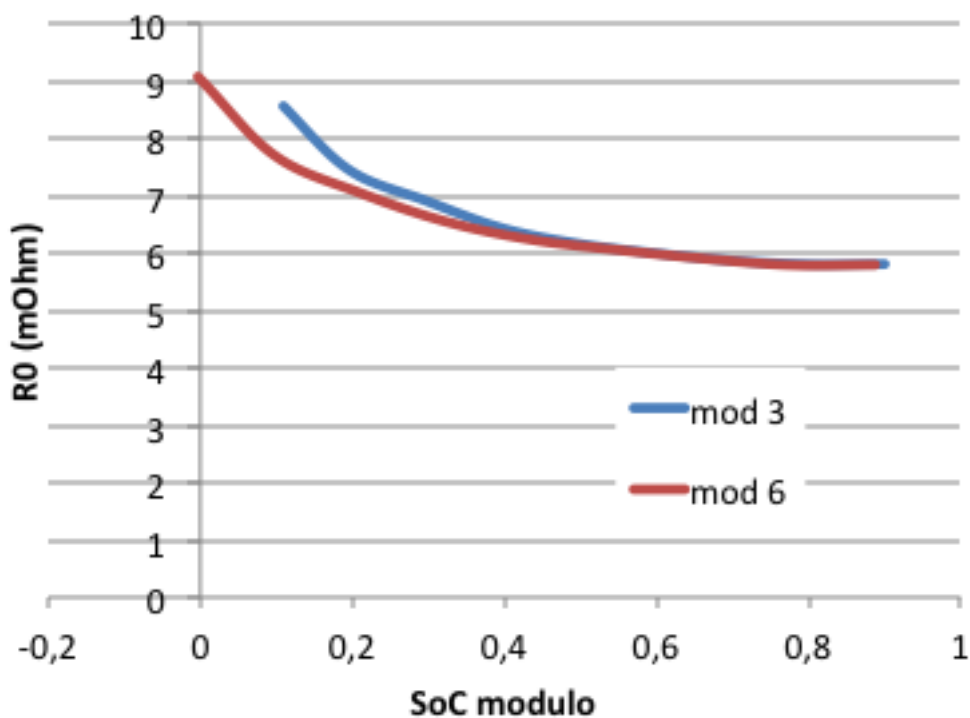


Figura 35 Andamento del parametro  $R_0$  calcolato a 45 A per moduli con capacità diversa

Dal grafico si può anche notare come i gli andamenti del parametro nei due moduli sia praticamente sovrapponibili, ma quello del modulo con capacità inferiore risulta essere traslato verso sinistra.



#### 4.5 Validazione del modello della batteria

Per validare il modello sono state eseguite le simulazioni sulle prove di parametrizzazione e altre prove casuali, ma si è subito palesato un problema. Infatti in un primo momento il SoC del modello veniva inizializzato manualmente allo stesso valore per tutti i moduli. Tuttavia non è vero che si è sempre a conoscenza dello stato di carica della batteria all'inizio della prova e che esso sia lo stesso per tutti i moduli. Per risolvere questo problema si è creato un tool che inizializzasse il SoC di ogni modulo in maniera esatta ed indipendente confrontando la tensione di inizio prova con quella delle OCV ottenute dalle parametrizzazioni che sono un preciso indicatore del SoC (Figura 36). Tramite la retroazione della tensione in uscita dal modello e un PID viene modificato il SoC iniziale di ogni modulo in modo da avvicinarsi il più possibile alla tensione misurata. È possibile stimare il SoC iniziale anche nel caso in cui la prova inizi con le batterie non a vuoto. Infatti attraverso il modello della batteria è possibile prevedere la tensione anche in caso venga erogata una corrente.

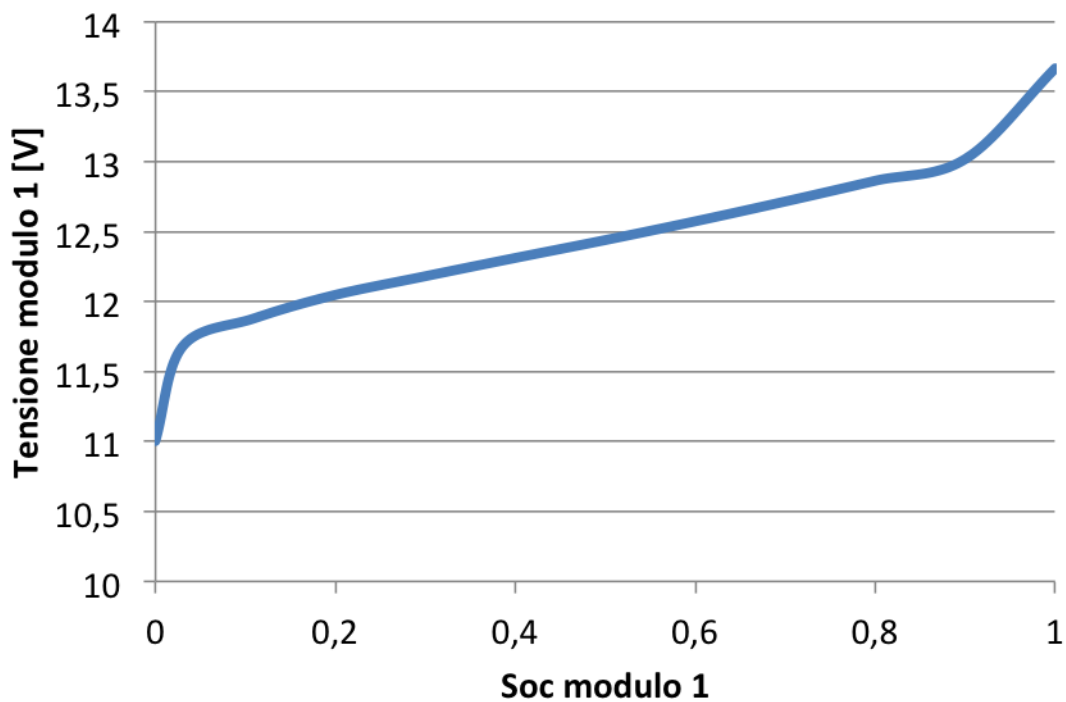


Figura 36 Andamento della OCV del modulo 1 in funzione del SoC

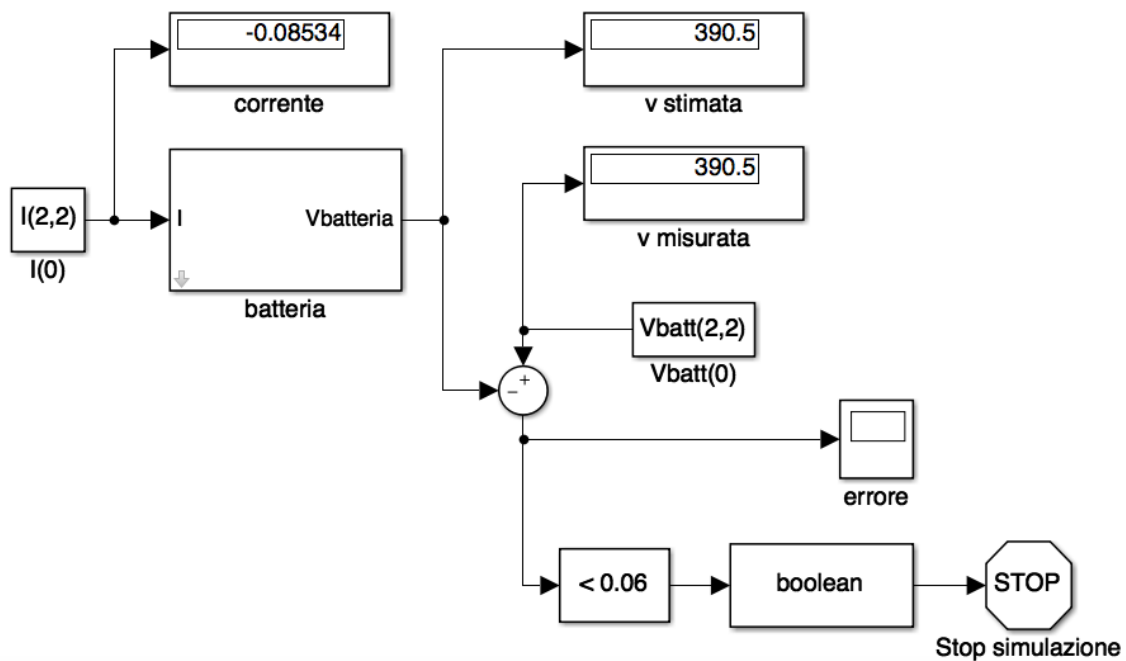


Figura 37 Tool per la stima iniziale del SoC

Nella Figura 37 viene mostrato la finestra principale del tool che stima il SoC iniziale. I risultati di questa simulazione vengono salvati nel workspace in Matlab® dove poi vengono riutilizzati dal modello della batteria per inizializzare la simulazione.

Una volta inizializzato con precisione lo stato di carica iniziale si è notato dalle simulazioni che mano a mano che la batteria si scaricava aumentava l'errore sulla stima della tensione. Era quindi chiaro che il rendimento amperometrico della batteria non era unitario, cioè in scarica si scaricava più velocemente e in carica si caricava più lentamente. In breve non tutte le cariche entranti nella batteria sono poi effettivamente immagazzinate e non tutte quelle immagazzinate sono erogate, ma sono probabilmente dissipate in reazioni parassite.

Per questo si è deciso di inserire un rendimento amperometrico che facesse diminuire più velocemente il SoC in scarica e aumentare più lentamente in carica (Figura 38).

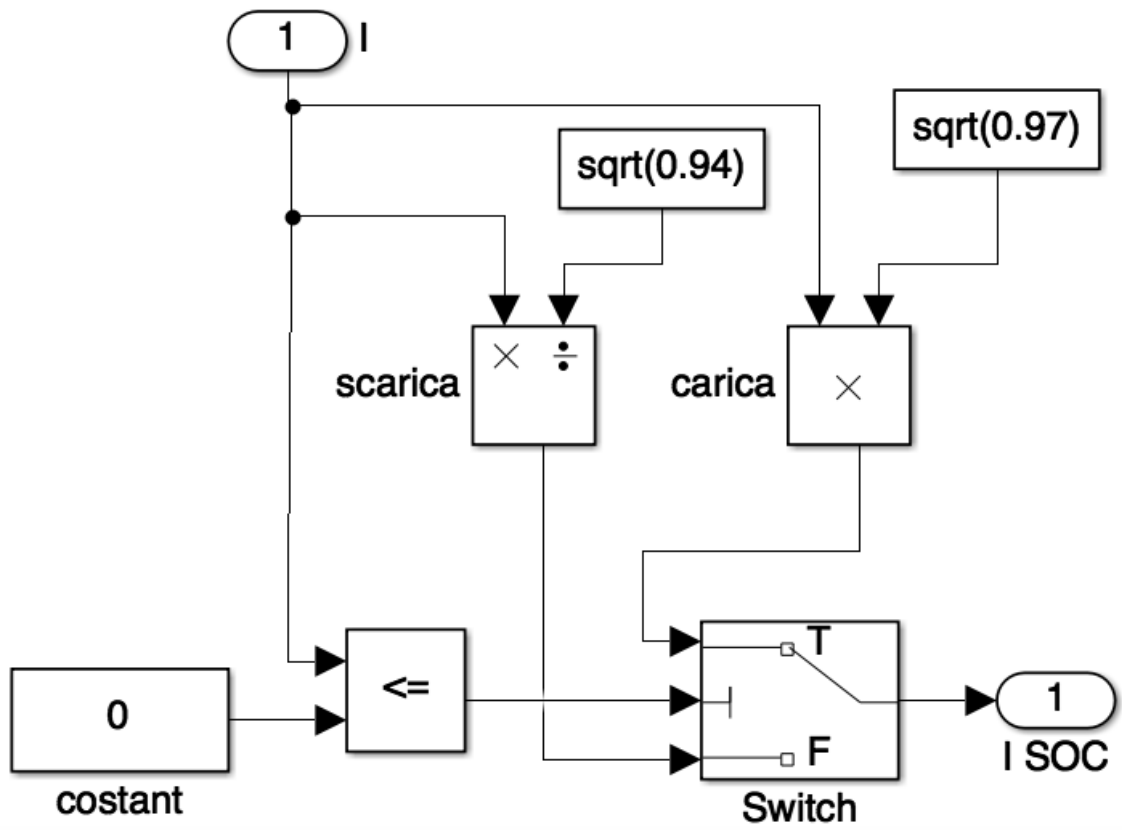


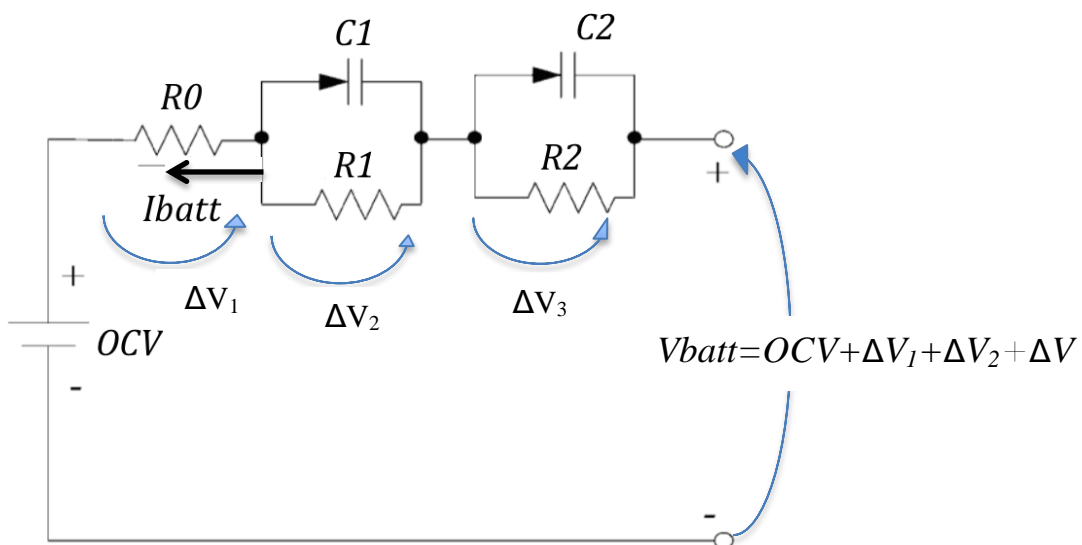
Figura 38 Implementazione del rendimento amperometrico in Simulink®

**Tabella 6 Rendimenti amperometrici**

	Rendimento
Carica	$\sqrt{0,97}$
Scarica	$\sqrt{0,94}$

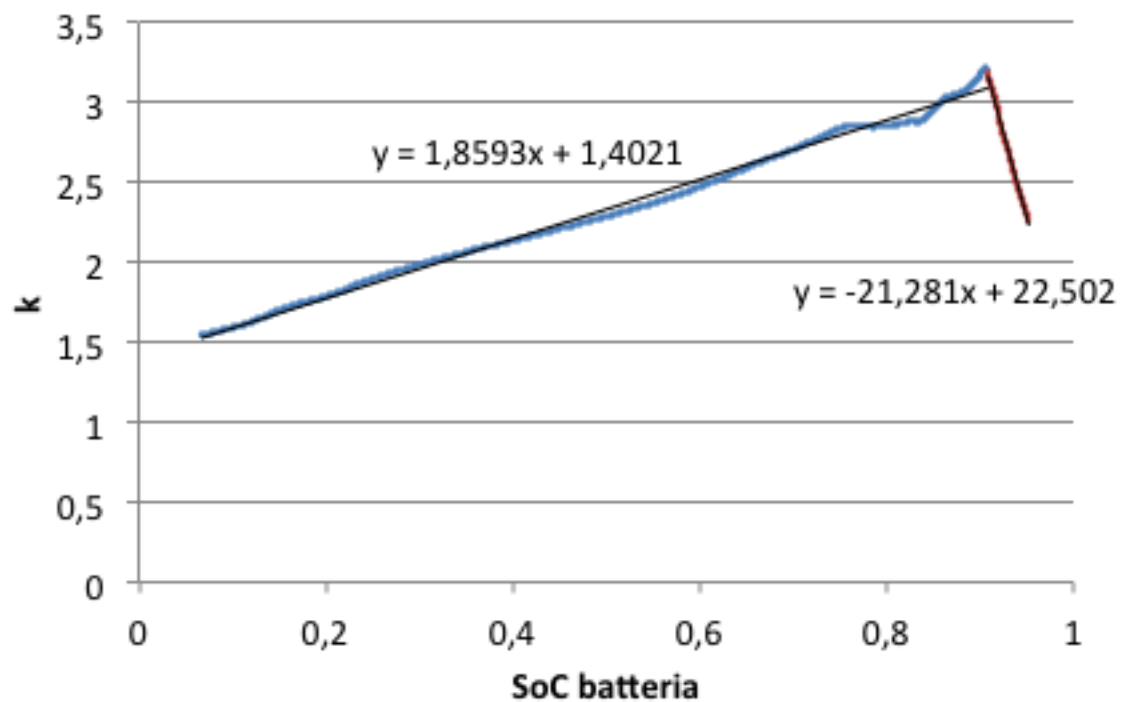
Si è giunti a questi valori svolgendo una simulazione in cui si partiva da una lunga fase di OCV (qualche ora), in modo da stimare con la massima precisione lo stato iniziale, seguita da una fase di scarica a 5 A per qualche ora e poi una lunga fase in OCV. Si è modificato il rendimento amperometrico in scarica in modo da far coincidere le due OCV a fine simulazione. Allo stesso modo si è agito per trovare il rendimento in carica.

Dalla prova fatta per trovare il rendimento amperometrico in carica è emerso che i parametri della batteria in carica erano molto diversi da quelli in scarica. Infatti la tensione durante la carica era molto sottostimata. Così si è ipotizzato che i parametri in carica fossero uguali ai parametri in scarica moltiplicati per un k. In questo modo si aumentano le cadute di tensione su tali parametri e quindi la tensione ai morsetti (Figura 39).



**Figura 39 Modello batteria con cadute di tensione durante la carica**

Per trovare il valore di k si è eseguita una carica completa a 15 A, si è confrontata la tensione misurata con quella stimata dal modello e si è individuato il valore che k dovrebbe assumere perché il modello stimasse la tensione esatta. Si è ottenuto un k che varia a seconda del SoC con un andamento illustrato nella Figura 40.



**Figura 40** Andamento del coefficiente  $k$ , che moltiplica il valore dei parametri resistivi in carica, in funzione del SoC

Con gli accorgimenti descritti precedentemente, si ottiene un errore sulla stima della tensione di batteria inferiore all'1%. Il modello della batteria è dunque adatto per essere implementato nel SoE. Di seguito vengono riportate le prove di validazione fatte.

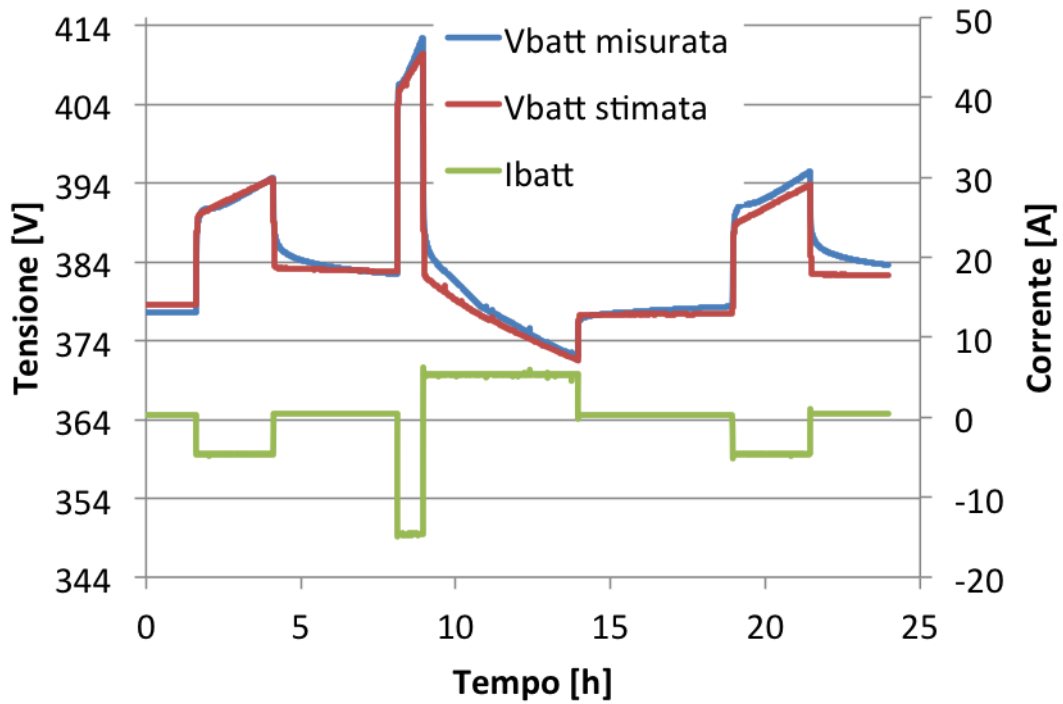


Figura 41 Prova di carica e scarica a diverse correnti (con corrente positiva la batteria è in scarica, con corrente negativa in carica). Lo scarto quadratico medio della tensione di batteria alla fine della prova è 1,4 V

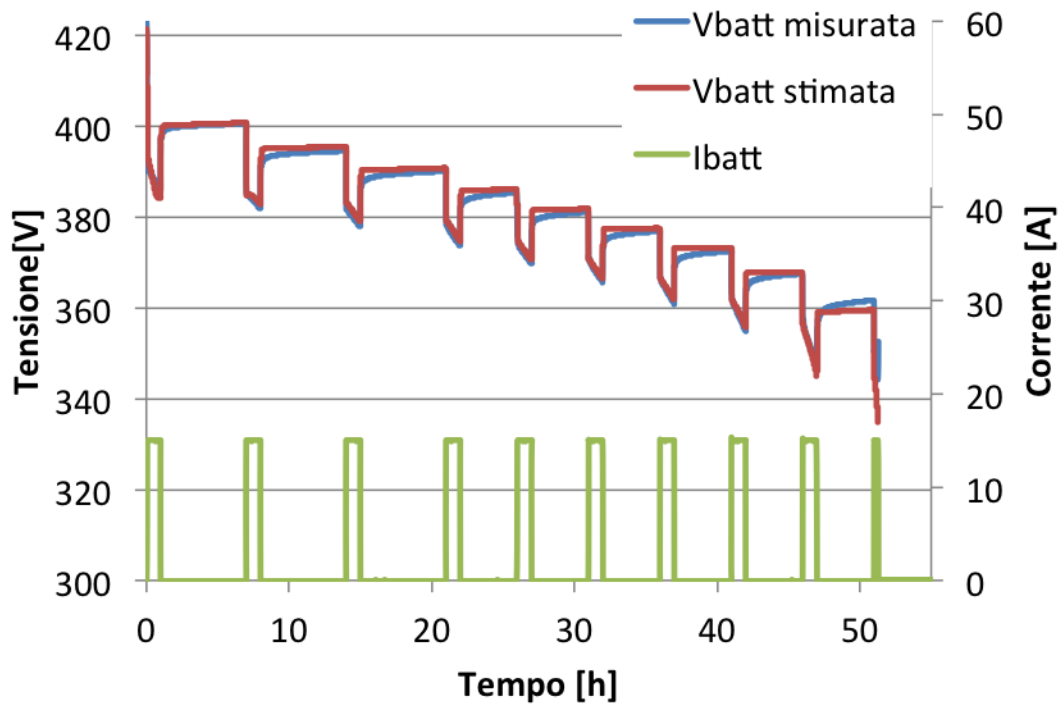


Figura 42 Prova di parametrizzazione a 15 A. Lo scarto quadratico medio della tensione di batteria alla fine della prova è 1,36 V

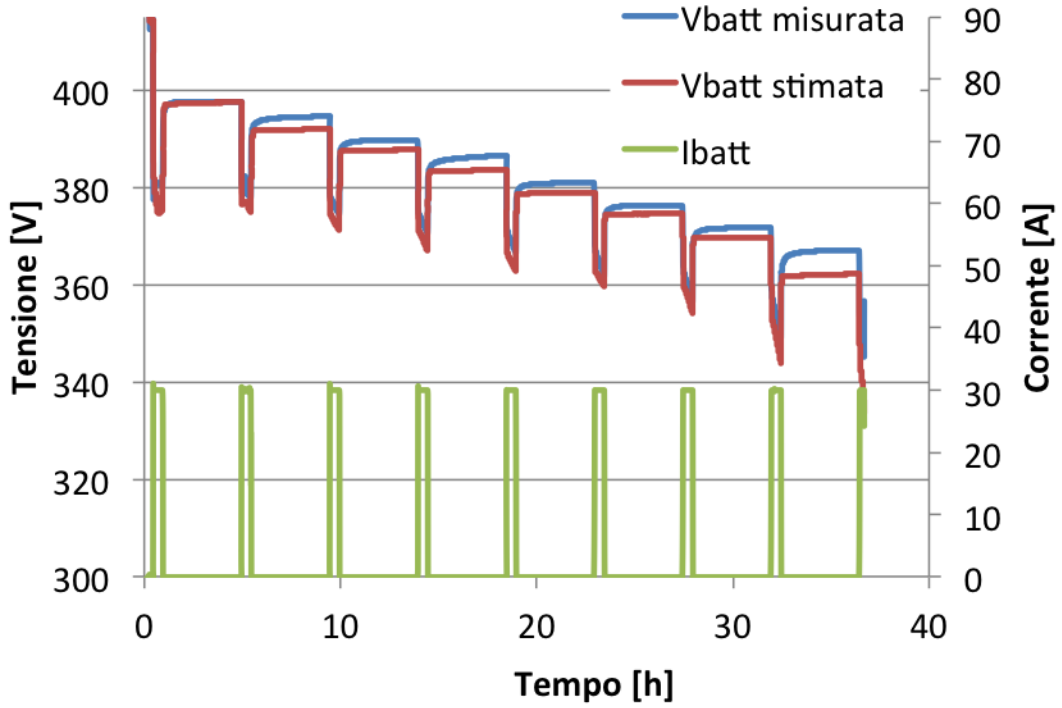


Figura 43 Prova di parametrizzazione a 30 A. Lo scarto quadratico medio della tensione di batteria alla fine della prova è 2,7 V

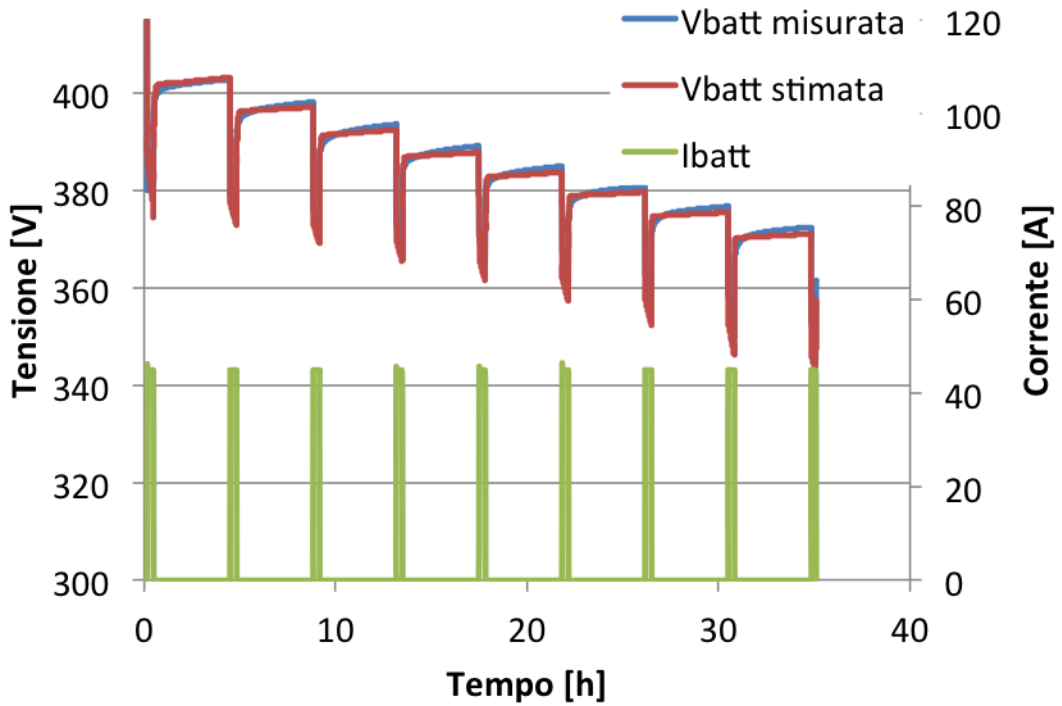


Figura 44 Prova di parametrizzazione a 45 A. Lo scarto quadratico medio della tensione di batteria alla fine della prova è 1,7 V

## 5 Modellizzazione stadio di conversione

In questo capitolo si valuta il rendimento energetico dell'intero sistema di accumulo, comprensivo di batterie e stadio di conversione che le connette in rete, per poter realizzare un SoE accurato che tenga conto dell'energia che la batteria potrebbe mettere a disposizione ma che viene dispersa dai componenti del sistema, a causa della loro non idealità (rendimento inferiore a 1). Per questo motivo nella seconda parte si esporrà una breve ricerca bibliografica riguardo il rendimento energetico di ogni componente. Attraverso essa si vuole capire qual è il modo più efficace, al fine dell'applicazione, per rappresentare le perdite di ogni elemento.

### 5.1 Descrizione

Per la conversione DC/AC dell'energia proveniente dal modulo batterie, il sistema è equipaggiato con un convertitore DC/AC bidirezionale della azienda vicentina TDE MACNO. Il convertitore Active Front End (AFE) agisce come un raddrizzatore quando la batteria assorbe potenza e come inverter quando la eroga.

**Tabella 7** Dati tecnici inverter *AFE OPDE S70 - TDE MACNO*

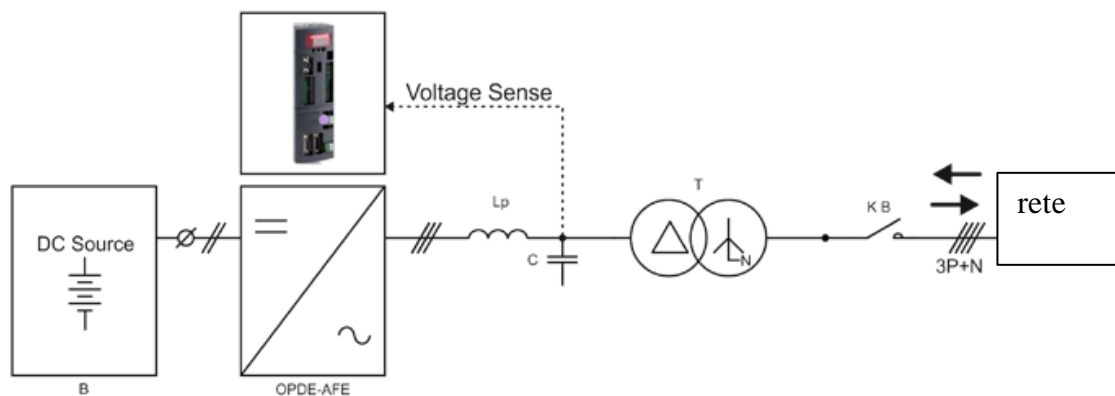
Parametro	Specifica
Tensione di uscita	181 V <sub>AC</sub> (3 ph + N)
Frequenza di uscita	50 Hz
Potenza nominale	22 kW
Corrente nominale	71 A
THD	<3%
Corrente reattiva	50% rispetto alla corrente nominale
Dimensioni (L x P x A)	251 x 290 x 675 mm
Peso	22 kg
Certificazione	CEI 0-21

Il controllo si compone di un anello di regolazione della corrente ( $I_{AC}$  lato alternata) e uno per la tensione ( $V_{DC}$  lato alternata) che permette lo scambio di energia tra il lato AC e quello DC: nel primo si sceglie il set point di corrente lato AC (e quindi la potenza ipotizzando che la tensione di rete sia costante) mentre nel secondo si sceglie il set point di tensione lato DC (la corrente è

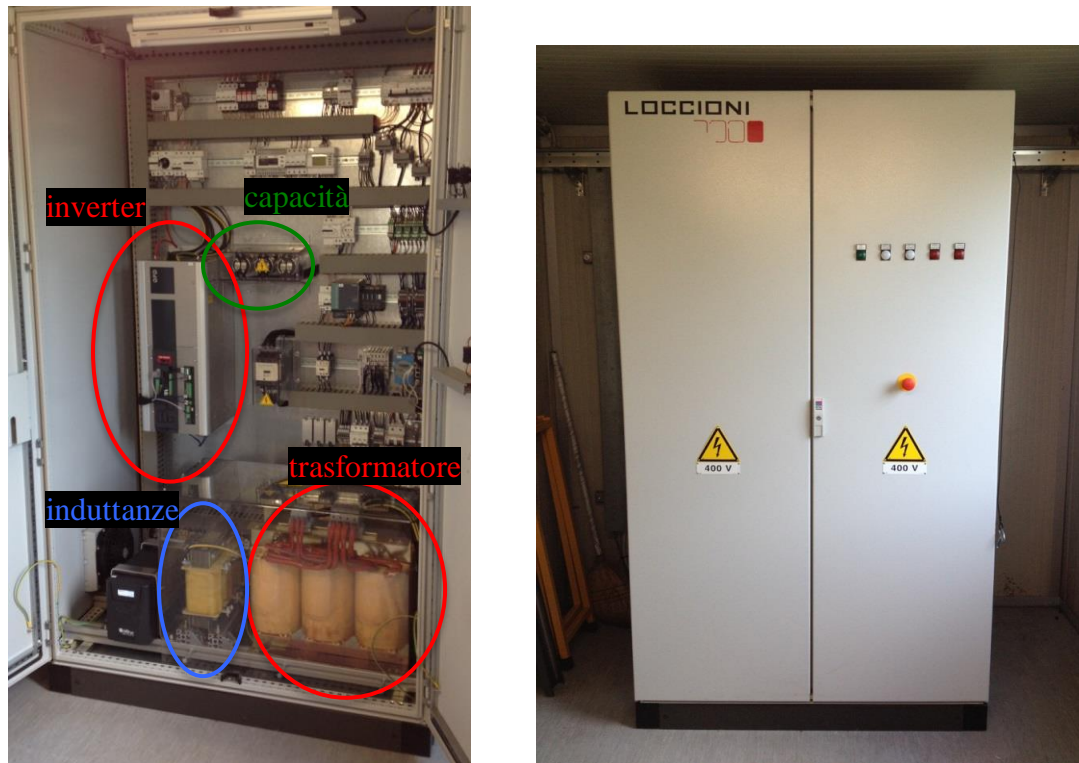


regolata dall'AFE in funzione della differenza tra la tensione impostata e quella misurata con la possibilità di limitarla). La quota di potenza reattiva scambiata con la rete, può essere impostata dall'utilizzatore (anche annullata, eseguendo così uno scambio di sola potenza attiva. A valle del convertitore DC/AC vi è un filtro LC e un trasformatore triangolo-stella con neutro isolato che riporta la tensione in uscita alla tensione di rete. Il sistema di conversione permette due differenti modalità operative: nella prima modalità, da considerarsi come standard, il convertitore è controllato in potenza garantendo le fasi di carica e scarica del sistema e l'impostazione (entro i limiti funzionali) dei valori di set di potenza attiva e reattiva. La seconda modalità è caratterizzata da un funzionamento a tensione costante e permette la carica completa delle batterie.

Il quadro è equipaggiato con un sistema di ventilazione adeguato per garantire le portate d'aria richieste per il corretto funzionamento delle apparecchiature presenti. Si fa notare che non è previsto alcun impianto di climatizzazione dell'ambiente interno al quadro elettrico, anche se il laboratorio è condizionato.



**Figura 45 Schema elettrico semplificato del laboratorio batterie al piombo**



**Figura 46** Armadio laboratorio batterie al piombo con inverter, filtro LC e trasformatore

Il sistema è dotato:

#### **LATO AC**

- Interruttore magnetotermico motorizzato lato rete (4 poli, 160 A max, 36 kA) che assolve alle funzioni indicate in specifica riguardo al sezionatore verso la rete in AC, fusibili di linea e contattore normalmente aperto per inserzione linea. Si fa presente che il pilotaggio della motorizzazione avviene attraverso le uscite digitali dell'inverter e quindi sotto il controllo del sistema di supervisione della Test Facility.
- Filtro EMC che serve per limitare ed assorbire i possibili disturbi creati dalla conversione con moduli di potenza a IGBT tipici degli inverter. Assolve e raccoglie in se le funzioni di specifica indicate come Filtro EMC: gruppo condensatori  $C_1=50 \mu\text{F}$  e reattanza  $L_1=650 \mu\text{H}$  e inseriti tra trafo separatore e modulo AFE.
- Misura delle tensioni di rete per sincronismi integrato nell'AFE.
- Trasformatore di isolamento/elevatore (400/181 V<sub>AC</sub>, 25 kVA, collegamento Dyn).
- Gruppo di precarica composto da resistenze e contattori per inserzione lato AC (contattore principale K1 in parallelo alla serie di quello secondario K2 e della resistenza di precarica).

#### **LATO DC**

- Interruttore magnetotermico lato batterie (80 A 2 poli, 800 V<sub>DC</sub>).
- Contattore normalmente aperto per inserzione batteria (K1 DC).

Il quadro è completo di tutti gli organi di protezione e manovra atti alla prevenzione di guasti verso terra, cortocircuiti, sovracorrenti e sovratensioni. Si fa notare che l'AFE non è protetto contro le inversioni di polarità del Bus DC.

### 5.1.1 Modello energetico

Per fornire un efficace stimatore di energia ai morsetti del trasformatore è necessario non solo stimare l'energia residua nella batteria, ma anche stimare le perdite che si hanno sull'inverter, sul filtro e sul trasformatore affinché il SoE ne tenga conto. Perciò di seguito si riporta una breve ricerca bibliografica sui modelli energetici di questi tre componenti per trovare il modo migliore con cui stimarne le perdite.

#### 5.1.1.1 Inverter

L'efficienza di conversione del convertitore DC/AC è definita come il rapporto tra la energia uscente e quella entrante:

$$\eta_{inv} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}}$$

Dove  $P_{AC}$  è la potenza in uscita dall'inverter,  $P_{DC}$  è la potenza entrante nel convertitore.

Per la modellizzazione dell'inverter va sempre tenuto conto che esistono tre tipi di perdite da considerare: le perdite indipendenti dalla potenza uscente, che sono dominanti a basse correnti di carico, le perdite che variano linearmente con la potenza uscente, come le perdite per commutazione o magnetiche, e infine le perdite che variano con il quadrato della potenza, che sono il risultato delle resistenze interne e sono dominanti in condizioni di elevate correnti. Le principali cause di dissipazione di energia in un inverter sono date dalle perdite per conduzione e dalle perdite per commutazione delle valvole [21]. Il convertitore è costituito da più rami uguali a seconda se monofase o trifase e ogni ramo è composto da una valvola controllata IGBT e da un diodo in antiparallelo. Le perdite per conduzione sono dovute alla caduta di tensione sulla valvola quando essa è in stato di conduzione, mentre le perdite per switching o per commutazione sono dovute al non immediato cambio di stato della valvola dovuto alle induttanze del circuito. Ciò causa una caduta di tensione diversa da quella che ci si aspetterebbe da una commutazione istantanea ideale.

Le perdite per conduzione sono complicate da stabilire poiché la corrente fluisce in parte attraverso IGBT e in parte nel diodo in anti-parallelo. Entrambe possono essere modellizzate come una caduta di tensione costante in serie ad una resistenza. Tuttavia si osserva che la resistenza delle valvole IGBT è molto simile a quella dei diodi quando sono in conduzione. Perciò, come proposto da [22], è possibile semplificare l'espressione delle perdite per conduzione come segue:

$$\Delta P_{cond} = \frac{2\sqrt{2} \cdot V_{on} \cdot I_{rms}}{\pi} + r_{on} \cdot I_{rms}^2$$

Dove  $I_{rms}$  è il valore efficace della corrente che attraversa il ramo,  $r_{on}$  è la resistenza in conduzione del diodo e della valvola IGBT e  $V_{on}$  è la caduta di tensione in conduzione.

Per quanto riguarda le perdite per commutazione è necessario ricavare dal datasheets dei componenti le perdite di energia durante l'accensione  $E_{on}$  e lo spegnimento  $E_{off}$  dell'IGBT e l'energia di polarizzazione inversa del diodo  $E_{RR}$ . Ottenuti questi dati possiamo scrivere:

$$\Delta P_{sw} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_{rms}}{I_{nom}} \cdot (E_{on} + E_{off}) \cdot f_{sw} + E_{RR} \cdot f_{sw}$$

Dove  $I_{nom}$  è la corrente nominale nell'IGBT. Questo metodo permette di stimare facilmente le perdite ottenendo i dati di partenza direttamente dal datasheet, ma non tiene conto della temperatura che comunque influenza il rendimento di conversione.

Una valutazione più rigorosa delle perdite, secondo [23], può essere fatta, appunto, tenendo conto anche della temperatura. Partendo dal circuito equivalente possiamo scrivere le perdite di conduzione e di commutazione dipendenti dalla temperatura.

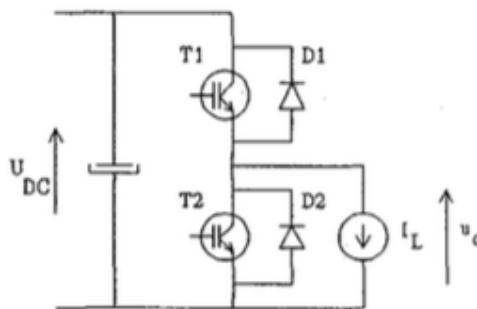


Figura 47 Circuito equivalente inverter

Perdite per conduzione:

$$P_{con,x} = \frac{1}{T} \int_0^T (C_{con,1} \cdot T_j + U_{0,x} + (C_{con,2} \cdot T_j + r_{0,x}) \cdot i_L(t)^{B_{con,x}}) \cdot i_L(t) \cdot dt$$

Dove

$C_{con,1}, C_{con,2}$  = costanti al variare della temperatura

$T_j$  = temperatura di giunzione

$T$  = periodo fondamentale 1/fs

$i_L(t)$  = corrente di carico

$U_{0,x}$  = tensione di alimentazione dispositivo x

$r_{0,x}$  = resistenza dinamica per il dispositivo x

$B_{con,x}$  = curva costante per il dispositivo x

Le perdite di commutazione si ottengono stimando direttamente l'energia di commutazione come funzione della corrente di carico e descrivendo la relazione con una equazione:

$$E_{sw,x} = A_{sw,x} \cdot i(t)^{B_{sw,x}} \cdot \left( \frac{U_{DC}}{U_{base}} \right)^{C_{sw,x}} \cdot \left( \frac{T_j}{T_{base}} \right)^{D_{sw,x}}$$

$A_{sw,x}, B_{sw,x}$  = curve costanti per il dispositivo x

$U_{base}$  = tensione DC nominale

$U_{DC}$  = tensione DC

$C_{sw,x}$  = costante per diverse tensioni DC

$T_{base}$  = temperatura nominale giunzione (per esempio 75°C)

$D_{sw,x}$  = costante al variare della temperatura di giunzione

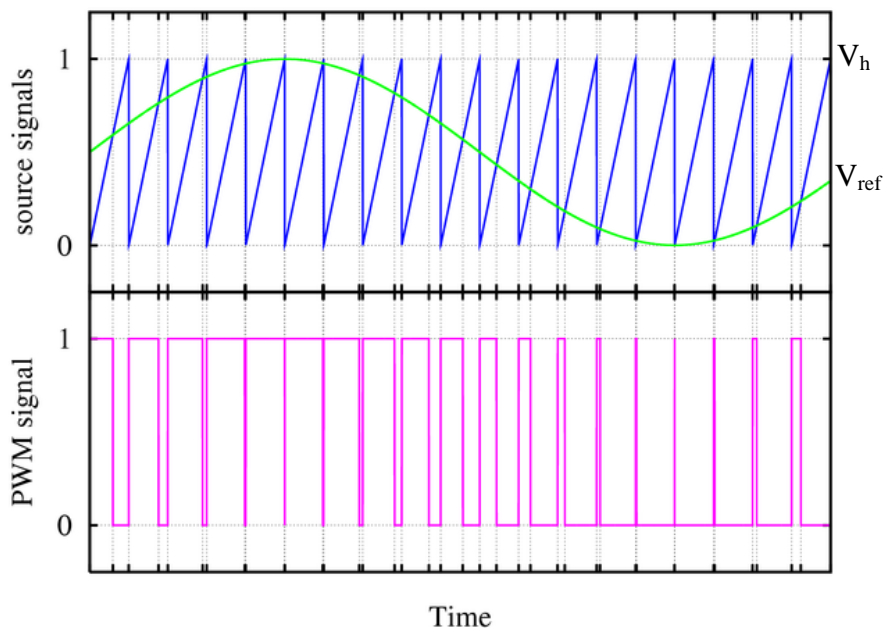
Questa valutazione tuttavia ha un grosso limite: infatti raramente si riescono ad avere misure precise della temperatura di giunzione, poiché è difficile accedere al convertitore per posizionare una sonda sulla valvola.

In [24] invece si è affrontata la questione delle perdite negli inverter PWM considerando le seguenti semplificazioni:

- si trascurano i tempi di switching dei diodi e dei transistor

- le temperature di giunzioni sono considerate costanti
- modulazione lineare
- si trascura il ripple di corrente AC a frequenza di switching
- $f_{sw} \gg f_{out}$

Il funzionamento di un inverter comandato in PWM è ottenuto confrontando un segnale sinusoidale di riferimento  $V_{ref}$ , la cui frequenza è quella fondamentale, con un segnale  $V_h$  a dente di sega, la cui frequenza è quella di switching.



**Figura 48 Modulazione PWM sinusoidale**

In questa trattazione si considera una modulazione lineare cioè  $m = \frac{V_{ref}}{V_h} \leq 1$ . Si procede linearizzando la caratteristica di output dell'IGBT attraverso la formula fortemente linearizzata di seguito che dà il valore nel tempo della tensione collettore-emettitore di saturazione:

$$V_{CEsat}(t) = V_{CE0} + r_{CE} \cdot \hat{I}_1 \sin(\omega t)$$

Considerando la dipendenza sinusoidale del duty cycle rispetto al tempo, la dissipazione di potenza dell'IGBT nello stato di conduzione può essere calcolata come:

$$P_{cond(T)} = \left( \frac{1}{2\pi} + \frac{m \cdot \cos(\varphi)}{8} \right) \cdot V_{CE0}(T_j) \cdot \hat{I}_1 + \left( \frac{1}{8} + \frac{m \cdot \cos(\varphi)}{3\pi} \right) \cdot r_{CE}(T_j) \cdot \hat{I}_1^2$$

Dove:

$\hat{I}_1$ : valore della corrente in uscita dall'inverter =  $1,41 \times I_{out}$

$V_{CE0}(T_j)$ : dipendenza dalla temperatura della tensione di soglia nella caratteristica dello stato di conduzione

$r_{CE}(T_j)$ : dipendenza dalla temperatura della resistenza nello stato di conduzione

Sapendo che la dissipazione di energia durante lo switching è linearmente dipendente dalla corrente sul collettore, le totali perdite per switching sull'IGBT possono essere calcolate come:

$$P_{sw(T)} = f_{sw} \cdot E_{on+off} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_{out}}{I_{ref}} \cdot \left( \frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{K_V} \cdot (1 + TC_{Esw} \cdot (T_j - T_{ref}))$$

dove:

$I_{ref}, V_{ref}, T_{ref}$ : valori di riferimento delle misurazioni per le perdite per commutazione presi dal datasheet

$K_V$ : esponente per la dipendenza della tensione dalle perdite per switching  
 $\sim 1.3 \dots 1.4$

$TC_{Esw}$ : coefficiente di temperatura per le perdite per switching  $\sim 0.003 \text{ 1/K}$

Assumendo tali perdite (prodotte da una corrente sinusoidale) equivalenti a quelle generate da una corrente costante diretta sul diodo in antiparallelo all'IGBT, di valore uguale al valore medio di mezza sinusoide positiva si può scrivere:

$$V_F(t) = V_{F0} + r_F \cdot \hat{I}_1 \sin(\omega t)$$

Dove la "F" sta per forward (diretta).

Considerando sempre la dipendenza sinusoidale del duty cycle rispetto al tempo nello stato di conduzione possiamo scrivere:

$$P_{cond(D)} = \left( \frac{1}{2\pi} + \frac{m \cdot \cos(\varphi)}{8} \right) \cdot V_{F0}(T_j) \cdot \hat{I}_1 + \left( \frac{1}{8} + \frac{m \cdot \cos(\varphi)}{3\pi} \right) \cdot r_F(T_j) \cdot \hat{I}_1^2$$

Mentre le perdite per switching sono:

$$P_{sw(D)} = f_{sw} \cdot E_{rr} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{ref}}\right)^{K_i} \cdot \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}}\right)^{K_v} \cdot (1 + TC_{Err} \cdot (T_j - T_{ref}))$$

Tale formula è però solo approssimativa in quanto le perdite per switching non sono una funzione lineare con la temperatura ( $K_i \neq 1$ ). Per questo le perdite non sono uguali nel caso di una mezza senoide positiva e nel caso di una corrente costante del valore medio della mezza senoide. Tuttavia questo metodo permette di stimare rapidamente le perdite ricavando i dati necessari direttamente dal datasheet.

Il modello che stiamo cercando può essere ulteriormente semplificato, infatti attraverso test condotti ai Sandia National Laboratories si è dimostrato che la variazione di efficienza di conversione DC/AC può essere considerata trascurabile rispetto alla variazione di temperatura. [25]

Perciò si sono analizzati una serie di modelli descritti in [26] indipendenti dalla temperatura e quindi molto più semplici.

Il 1° modello descritto è basato su un circuito equivalente costituito da un inverter ideale e una serie di resistenze che rappresentano le perdite ohmiche e un resistore derivato che rappresenta l'auto consumo:

$$\eta_{inv} = \frac{2R_s P_{AC}}{V_{DC}^2} \frac{1}{1 - \sqrt{1 - 4(R_s/V_{DC}^2)(P_{AC} + (V_{AC}^2/R_p))}}$$

dove  $V_{DC}$  è la tensione in ingresso all'inverter;  $V_{AC}$  è la tensione in uscita dall'inverter;  $R_s$  è la resistenza serie;  $R_p$  è la resistenza parallelo. Il modello può essere esteso anche ai carichi reattivi considerando la potenza apparente e includendo un fattore che abbia un valore vicino all'unità eccetto per valori molto bassi del fattore di potenza e che rappresenti anche le perdite addizionali dovute alle alte correnti reattive interne.

$$\eta_{inv} = \frac{2R_s S}{V_{DC}^2} \frac{a}{1 - \sqrt{1 - 4(R_s/V_{DC}^2)(P_{AC} + (V_{AC}^2/R_p))}}$$

Il 2° modello proposto è un semplice modello matematico dove le perdite energetiche della conversione sono rappresentate da un polinomio. I coefficienti del modello sono associate a diversi fenomeni che causano dissipazione di energia nell'inverter:



$$\eta_{inv} = \frac{(P_{AC}/P_{NOM})}{(P_{AC}/P_{NOM}) + (K_0 + K_1(P_{AC}/P_{NOM}) + K_2(P_{AC}/P_{NOM})^2)}$$

Nel 3° metodo, il rendimento dell'inverter può anche essere determinato interpolando dati sperimentali. L'efficienza per una determinata potenza è determinata interpolando linearmente l'efficienza dell'inverter al limite inferiore e al limite superiore della potenza dell'inverter:

$$\eta_{inv} = \eta_{inf} + \frac{(P_{AC} - P_{inf})(\eta_{sup} - \eta_{inf})}{(P_{sup} - P_{inf})}$$

Dove:

$P_{inf}$  è il limite di potenza minima

$P_{sup}$  è il limite di potenza massima

$\eta_{inf}$  è il rendimento dell'inverter alla potenza minima

$\eta_{sup}$  è il rendimento dell'inverter a potenza massima.

Il metodo che si è adottato per stimare le perdite è basato su una campagna di prove sperimentali per valutare il rendimento in varie condizioni. Si è scelto questo metodo perché è più semplice e funzionale ai nostri fini, non avendo a disposizione misure di temperatura delle giunzioni delle valvole, ma solo misure di tensione e corrente subito a valle e a monte dell'inverter. Come proposto da [27], in questo modo basta misurare la potenza entrante e quella uscente dall'inverter in varie condizioni di funzionamento e costruire una funzione che si avvicini il più possibile alla curva costruita per punti.

Da letteratura si osserva che tale funzione potrebbe essere con buona approssimazione quella sottostante.

$$P_{loss,pu} = a_0 + a_1 \cdot P_{o,pu} + a_2 \cdot P_{o,pu}^2$$

$a_0$  = perdite costante a diverso carico

$a_1$  = perdite che crescono linearmente con la corrente

$a_2$  = perdite che crescono con il quadrato della corrente

Bisogna inoltre tenere conto che, come riportato sul datasheets, l'inverter ha un THD<sup>7</sup> <3%. Ciò significa che la potenza associata alle armoniche diverse dalla fondamentale è da considerare persa perché non è sfruttabile dai carichi che funzionano solo a 50 Hz.

### 5.1.1.2 Filtro LC

Il filtro LC posto a valle dell'inverter serve per assorbire le armoniche prodotte dall'inverter nel suo processo di conversione. Infatti la potenza trasmessa con armoniche diverse dalla fondamentale causa perdite senza trasmettere potenza utilizzabile effettivamente dai carichi. Le moderne tecniche di modulazione hanno consentito di rendere il THD (cioè la percentuale di armoniche rispetto alla fondamentale) sempre minore, ma è ancora necessario l'utilizzo del filtro accordato sulle armoniche con ampiezza maggiore.

Il filtro alla frequenza dell'armonica a cui è accordato entra in risonanza ( $\omega_{ris} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ) e si comporta come un bypass che fa richiudere le correnti per quella armonica. Per le frequenze diverse da quella di risonanza il filtro si comporta come un banco di condensatori. Per esempio per il filtro della 5° armonica:

$$\bar{y}_{f5} = \frac{1}{j\omega_1 L_5 - j\frac{1}{\omega_1 C}} = \frac{\omega_1 C}{-j(1 - \omega_1^2 L_5 C)} = \frac{j\omega_1 C}{1 - (\frac{\omega_1}{\omega_{ris}})^2} \approx j\omega_1 C$$

essendo:  $\omega_{risonanza} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ,  $\omega_{risonanza} = 5\omega_1$ .

Solo in apparenza un filtro LC non ha componenti resistivi. In realtà a causa della non idealità dei componenti ci sono resistenze parassite sia negli induttori che nelle capacità.

Si potrebbe pensare che questo componente causi delle perdite trascurabili, invece in [28], in cui si è esposta l'efficienza globale (compresa la conversione) raggiunta dagli UPS, si è precisato che anche i filtri concorrono alle perdite del sistema, seppur in maniera lieve, dipendentemente dal carico. Per un sistema come quello in esame di potenza compresa tra 10 e 40 KVA le perdite variano dall' 1% al 6% a seconda dello stato del sistema (stand-by o a carico). Quindi il rendimento non può essere considerato unitario.

---

<sup>7</sup> THD: (total harmonic distortion) indica la percentuale del contenuto armonico di un segnale rispetto alla sua componente a frequenza fondamentale (nel caso della rete elettrica europea a 50 Hz

$$THD = \frac{\sum_{n \neq 50Hz} V_n}{V_{50Hz}}$$

### 5.1.1.3 Trasformatore

Il circuito equivalente del trasformatore è noto da tempo. Uno dei modelli più utilizzati è quello riportato in Figura 49, è composto da due rami longitudinali, che rappresentano l'induttanza e la resistenza degli avvolgimenti primari e secondari, e un ramo trasversale che schematizza le correnti di magnetizzazione e le perdite nel ferro. I parametri di tale circuito vengono individuati tramite due prove: la prova a vuoto e la prova in corto circuito.

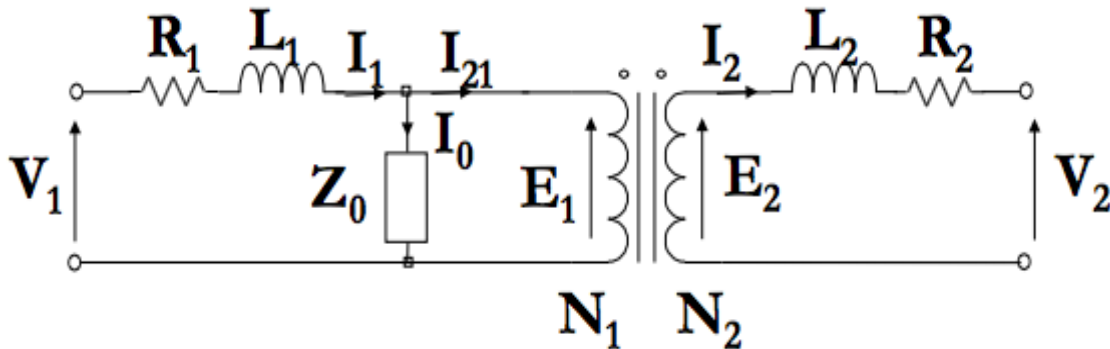


Figura 49 Circuito equivalente del trasformatore

Per effettuare la prova a vuoto l'avvolgimento secondario è aperto, quindi  $I_2 = 0$ , e al primario si applica la tensione nominale. Attraverso la misura di tensione del secondario si riesce a risalire all'impedenza del ramo trasversale  $Z_0$ . Infatti al secondario non circola corrente, quindi non vi è caduta di tensione cioè  $V_2 = E_2$ ,  $I_1 = I_0$ .

Si può quindi scrivere:

$$\frac{V_{1n}}{I_0} = Z_1 + Z_0$$

Con la prova in cortocircuito invece si vuole stimare il valore delle impedenze longitudinali. Per effettuare la prova bisogna cortocircuitare l'avvolgimento secondario e fornire al primario una tensione molto minore della nominale, tale che al secondario circoli la corrente nominale. Infatti applicare la tensione nominale causerebbe una circolazione troppo elevata di corrente che potrebbe danneggiare il trasformatore.

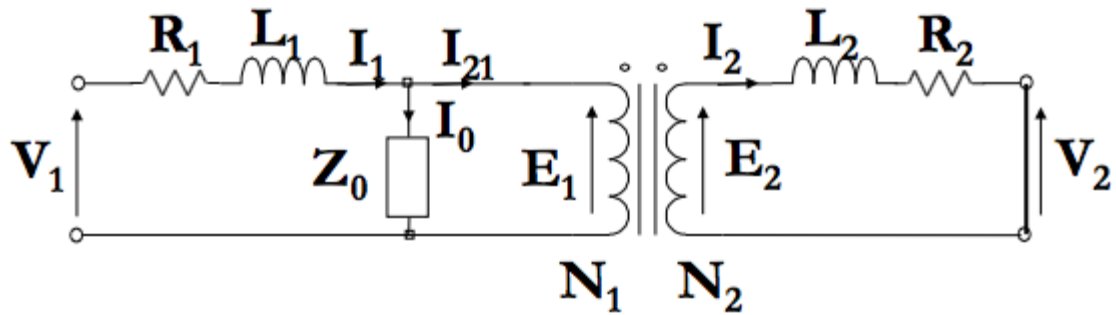


Figura 50 Configurazione trasformatore in corto circuito

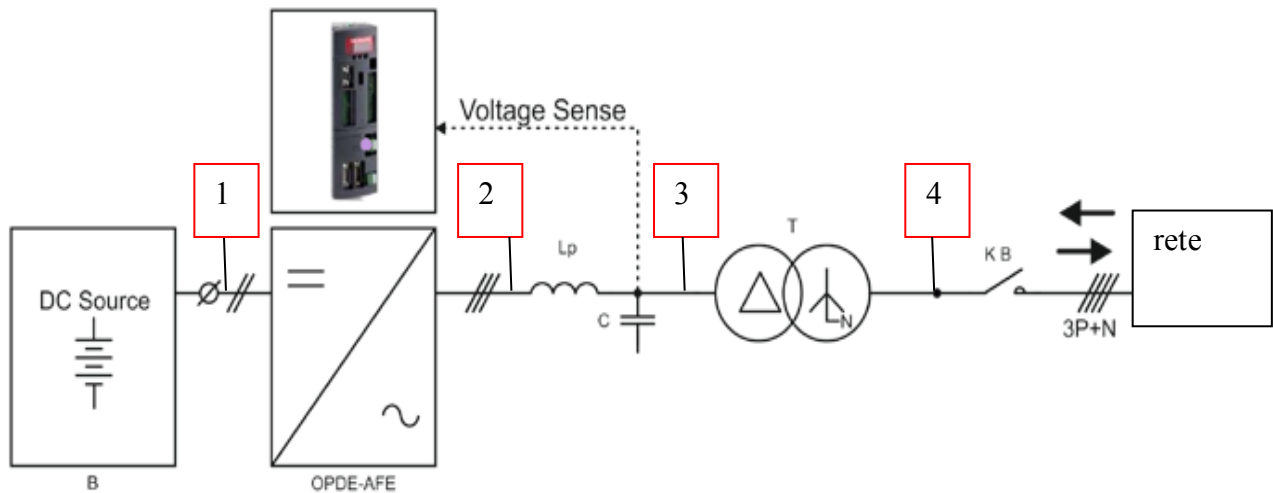
In questo caso, poiché  $V_2 = 0$ ,  $E_2$  è molto piccola e quindi si può considerare  $I_1 \approx I_{21}$ . L'impedenza di corto circuito dunque ben rappresenta l'impedenza longitudinale:

$$\frac{V_1}{I_1} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} = Z_1 + Z_{21}$$

Purtroppo siccome il trasformatore nel sistema di conversione DC/AC, oggetto di questo studio, è già cablato e non sono disponibili i dati delle prove descritte, allora per la caratterizzazione del trasformatore sono stati utilizzati i dati di targa per la stima dei parametri longitudinali e le prove in laboratorio per stimare i parametri trasversali.

### 5.1.2 Prove sperimentali

Come accennato nel capitolo precedente per modellizzare il sistema di conversione si è deciso di non ricavare un modello teorico tra quelli trovati in bibliografia, poiché non si hanno né sensori di temperatura, né informazioni precise sulla frequenza di switching dell'inverter. Inoltre si sarebbe complicato di molto il modello senza la sicurezza di raggiungere un'adeguata precisione. Per tale motivo si è scelto di caratterizzare lo stadio di conversione sfruttando i sensori di tensione e corrente presenti sul sistema. In pratica si è considerato lo stadio di conversione come un "black box" e si è costruito un modello "data driven". Questo permette anche di semplificare il lavoro raggiungendo, come si vedrà, una buona precisione.



**Figura 51 Schema del sistema con evidenziati i punti**

Il filtro LC sarà caratterizzato insieme all’inverter poiché non si hanno misure tra l’inverter e il filtro. Le caratteristiche dei componenti sono state trovate facendo una campagna di misure per valori di potenza attiva e reattiva che il sistema è in grado di erogare cioè -20/20 kW e -15/15 kVar (per valori negativi il sistema assorbe potenza e viceversa per valori positivi). Si è deciso di parametrizzare il sistema anche nel caso debba assorbire o generare potenza reattiva poiché è esplicitamente richiesto nella CEI 0-21 2016-07 (norme per la GD in bassa tensione) in cui si dice: *“gli inverter in impianti di potenza complessiva superiore a 11,08 kW devono consentire anche la erogazione/assorbimento di potenza reattiva secondo funzioni di regolazione in logica locale basate sul valore della tensione di rete letta ai morsetti di uscita, secondo la curva caratteristica  $Q = f(V)$ .”*

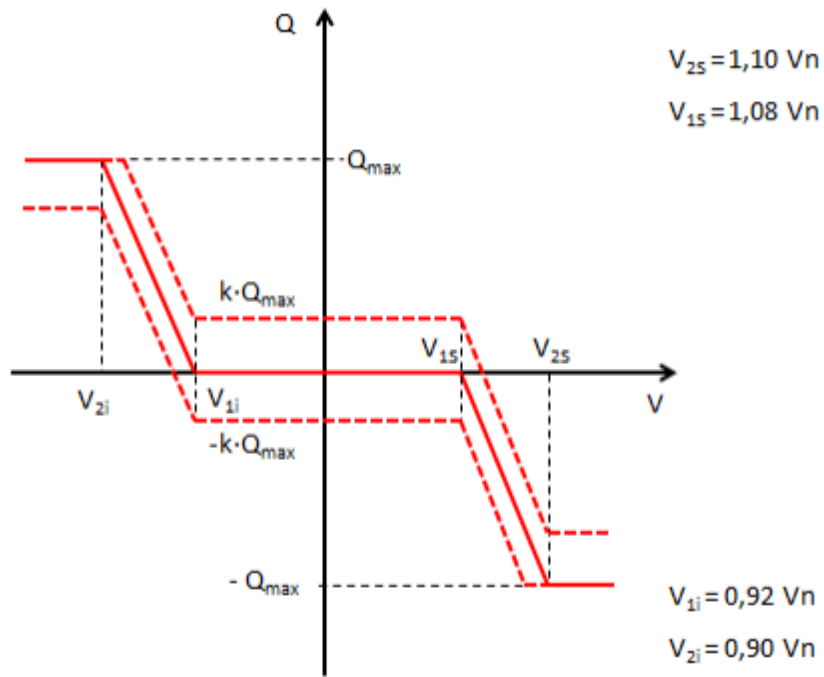


Figura 52 Curve caratteristiche standard  $Q=f(V)$  (CEI 0-21 2016-07)

Quindi anche gli accumuli devono contribuire alla regolazione di tensione tramite generazione e assorbimento di potenza reattiva. La caratterizzazione in funzione della potenza reattiva è inoltre necessaria perché a causa della non perfetta taratura dell'inverter succede spesso che, come per l'inverter oggetto dello studio, quando viene richiesto un setpoint di potenza attiva si ha una variazione proporzionale di potenza reattiva e viceversa.

Al fine di un miglior comprendimento del significato dei grafici che seguiranno, si riporta nella Figura 53 lo schema del sistema di conversione utilizzato nel modello del SoE.

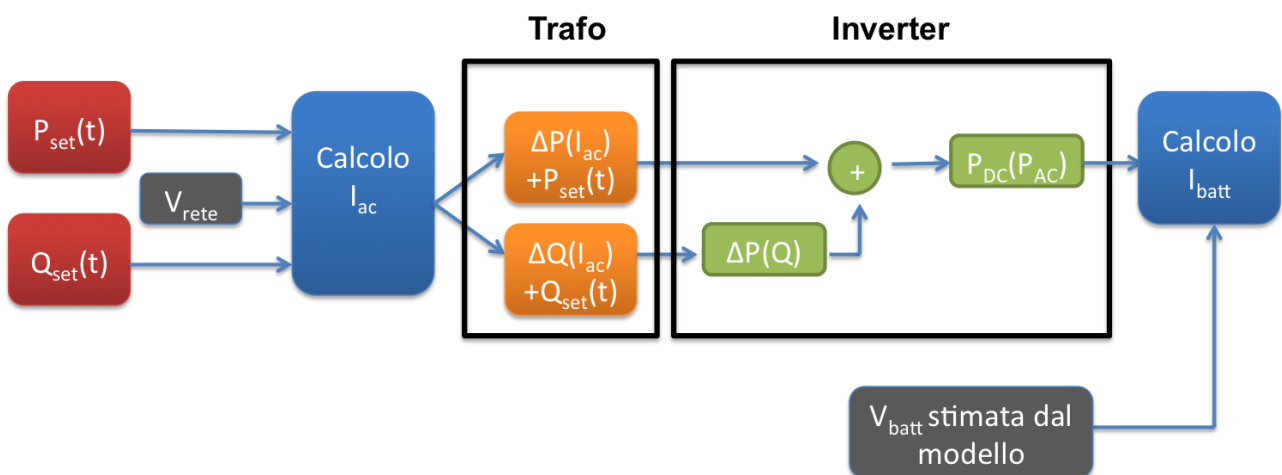


Figura 53 Modello energetico sistema di conversione

Nel software che verrà implementato per stimare la corrente in ingresso alla batteria si userà questa logica:

- Pset e Qset verranno acquisiti come dati in ingresso.
- Tramite la manipolazione di potenza attiva e reattiva si otterrà la potenza apparente e quindi, dividendo per la tensione di rete ipotizzata che dovrebbe essere circa costante a 400 V, la corrente.

$$I_{ac} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{400 * \sqrt{3}}$$

- Conoscendo il modello del trafo illustrato precedentemente si può dire che esso introdurrà delle perdite attive e reattive ( $\Delta P$  e  $\Delta Q$ ) proporzionali alla corrente che lo attraversa. Si ottiene in questo modo la potenza ai morsetti del trafo.
- L'inverter, a causa della sua non perfetta taratura, eroga ai suoi morsetti una potenza attiva proporzionale alla potenza reattiva che gli è richiesto di erogare o assorbire. Avviene anche che l'inverter eroghi una potenza reattiva in funzione della potenza attiva impostata come set point, ma non è necessario stimarla poiché per trovare  $P_{DC}$ , che è il nostro obiettivo, basta stimare la potenza attiva. Per stimare la quantità di potenza attiva erogata in questo modo dall'inverter misuriamo la sua variazione mantenendo inalterato il setpoint di  $P$  e variando  $Q$  set.
- Una volta ottenuta la  $P_{DC}$  basta dividerla per la tensione di batteria stimata dal modello per ottenere la  $I_{batt}$ .

Durante la campagna di misure effettuate si è incontrato un problema: gli strumenti installati nel punto 3 (integrati nell'inverter) si sono rivelati poco precisi, soprattutto per piccoli valori di potenza. Infatti, verificando i dati ottenuti in tali circostanze il rendimento dell'inverter assumeva valori poco significativi a causa della misura amperometrica errata. Così, per ricavare la potenza attiva e reattiva nel punto 3 si è deciso di assumere le seguenti ipotesi. Facendo riferimento alla Figura 51:

- gli strumenti nel punto 4 fossero perfettamente tarati (effettivamente tali strumenti sono tarati periodicamente a differenza di quelli dell'inverter)
- le misure di tensione avessero un'incertezza trascurabile rispetto a quella delle misure di corrente
- le misure di corrente dell'inverter avessero un errore di offset  $a$  e un errore proporzionale definito da un coefficiente a sua volta dipendente dalla corrente  $k(I)$

Sulla base di tali ipotesi, la potenza misurata sul lato AC dall'inverter può essere espressa con la seguente formula:

$$P_{inv} = k(I) \cdot P_{misurata} + P(a)$$

$$\begin{cases} scarica & P_{rete\ s} = P_{inv} - \Delta P_{trafo} \\ carica & P_{rete\ c} = P_{inv} + \Delta P_{trafo} \end{cases}$$

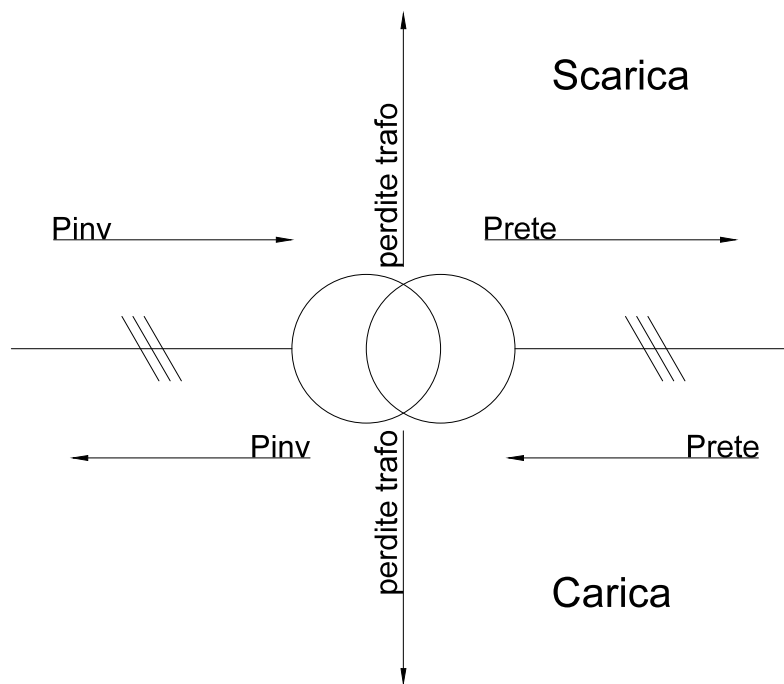


Figura 54 Bilancio potenze ai morsetti del trafo

Osservando i flussi di potenza in Figura 54 si nota che dati all'inverter due setpoint simmetrici, cioè prima  $P_{inv}$  e poi  $-P_{inv}$  (uguali in valore assoluto), e sottraendo membro a membro le equazioni del sistema si ottiene:

$$P_{rete\ c} - P_{rete\ s} = 2 \cdot \Delta P_{trafo}$$

Cioè

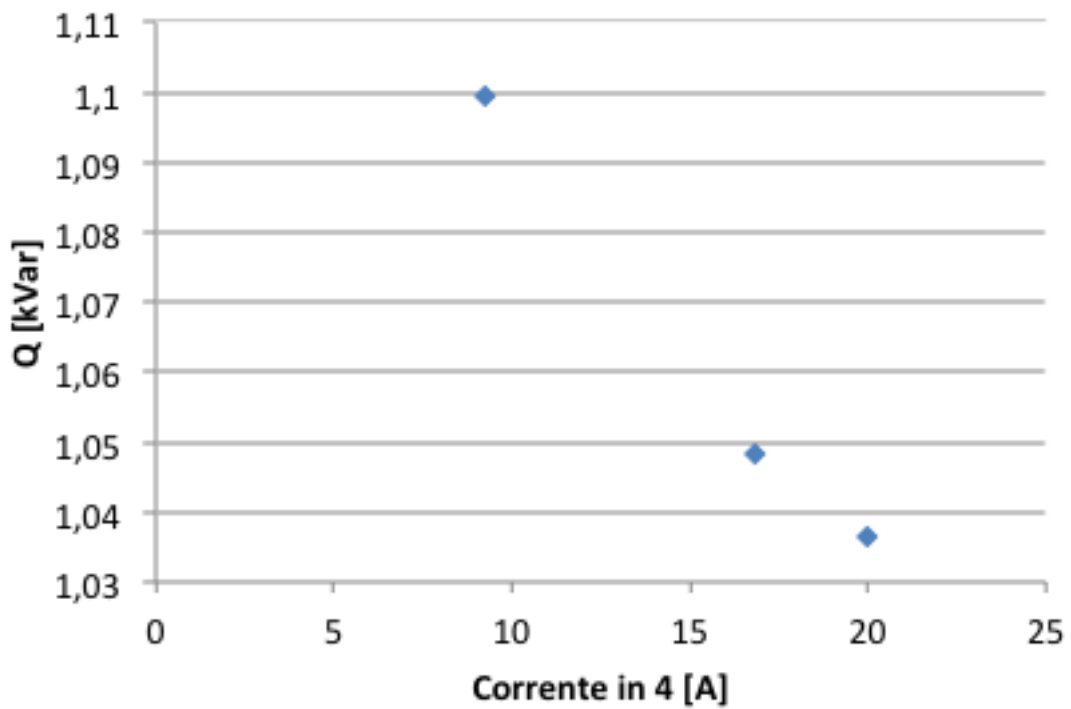
$$\Delta P_{trafo} = \frac{P_{rete\ c} - P_{rete\ s}}{2}$$

Lo stesso ragionamento si può ripetere per la potenza reattiva.



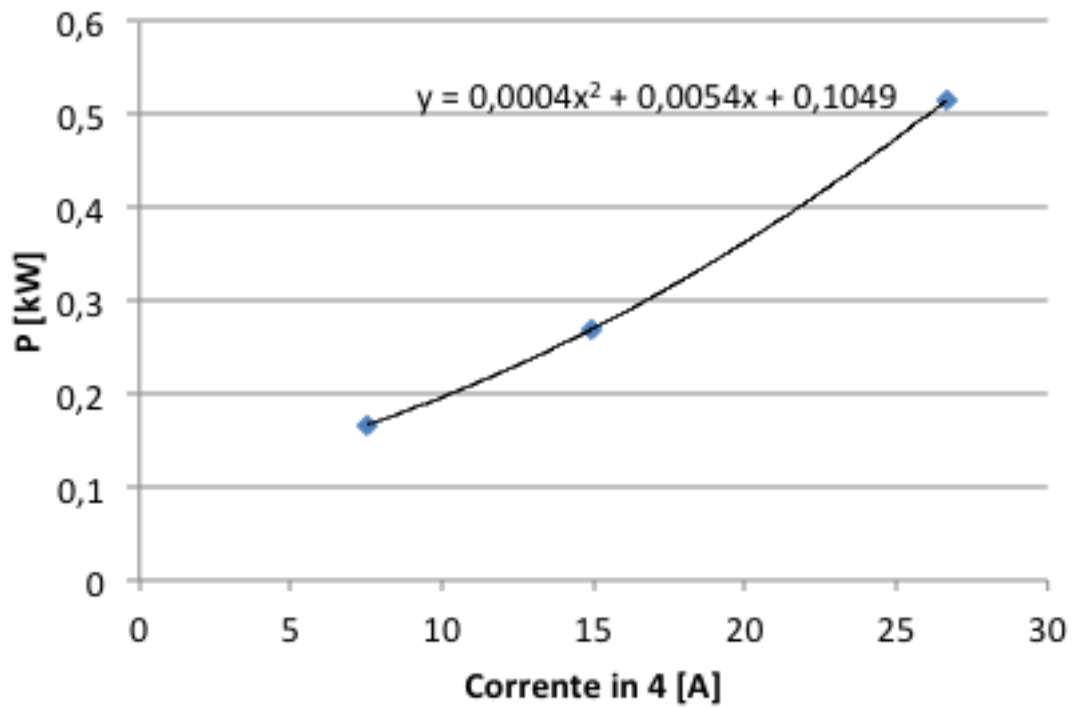
Di seguito si riportano le caratteristiche di ogni componente ottenute tramite le misure sperimentali.

Modellizzazione del trasformatore:



**Figura 55 Potenza reattiva assorbita dal trafo in funzione della corrente circolante in 4**

La potenza reattiva assorbita dal trafo non mostra variazioni significative nel range di correnti che il sistema può erogare o assorbire (nel punto 4 - $35 \text{ A} < I < 35 \text{ A}$ ) ed è circa 1,2 kVar.



**Figura 56** Potenza attiva persa dal trafo in funzione della corrente circolante in 4

La curva ottenuta per la modellizzazione delle perdite attive del trasformatore ha un andamento parabolico che interseca l'asse delle ordinate nel valore delle perdite a vuoto.

Modellizzazione dell'inverter e del filtro LC:

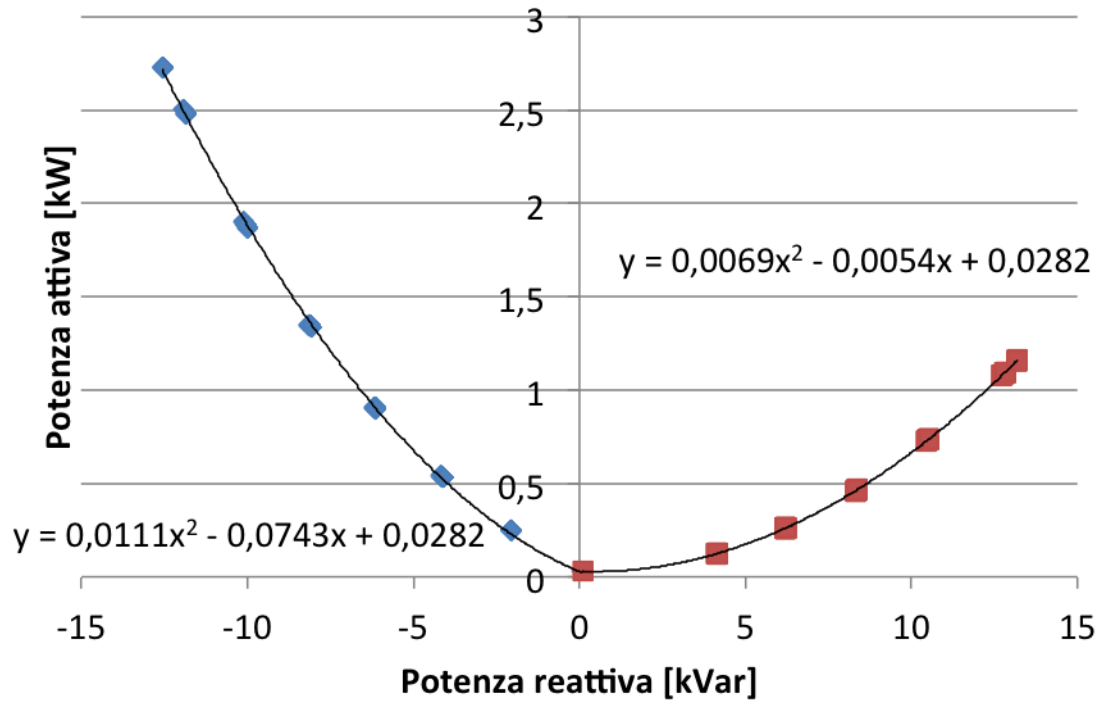


Figura 57 Potenza attiva erogata dall'inverter in funzione del set point di potenza reattiva richiesta

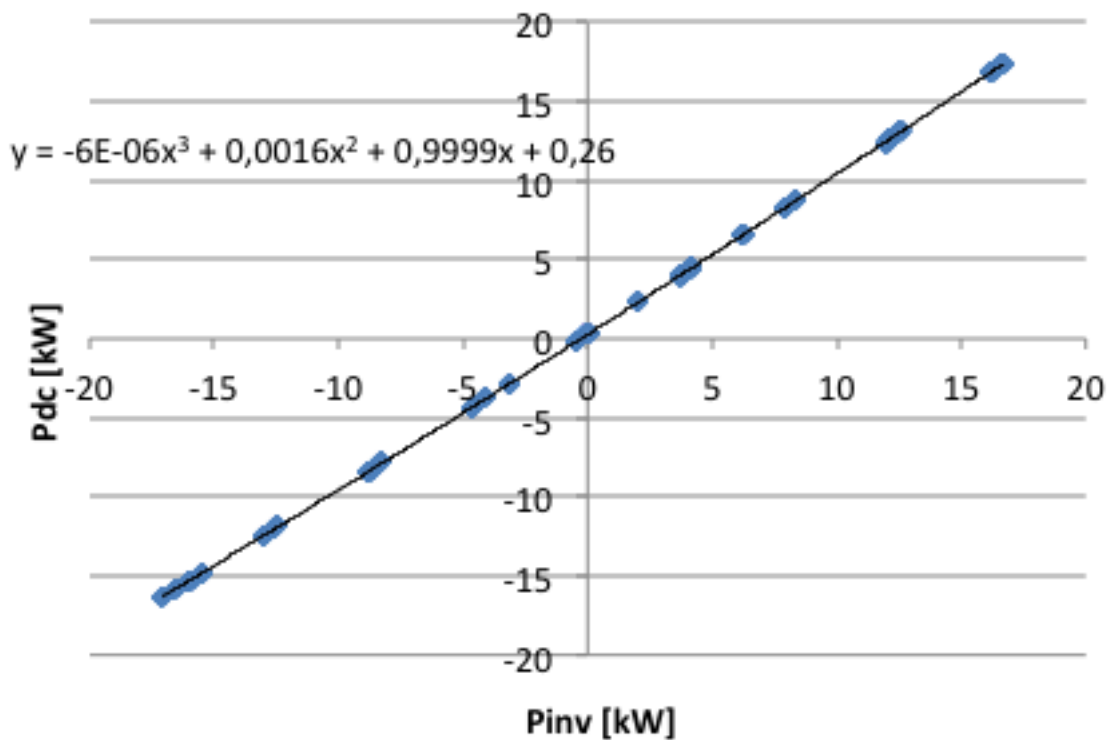


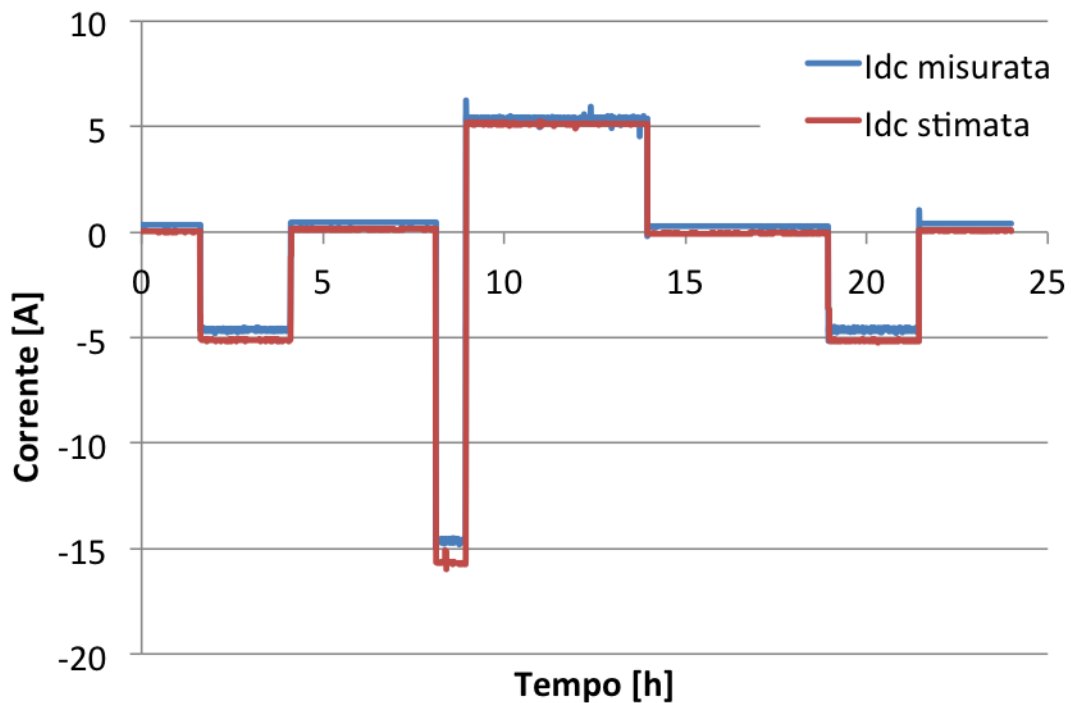
Figura 58 Potenza continua ai morsetti di batteria data la potenza trifase misurata ai morsetti dell'inverter

Dalle caratteristiche ottenute in questo modo è possibile risalire ai valori di potenza attiva e reattiva sia per flussi uscenti che entranti nel sistema per i punti 1,3,4.

### 5.1.3 Validazione del modello energetico dello stadio di conversione

Di seguito si riportano le varie prove fatte per validare il modello energetico. L'obiettivo di tale modello è riuscire a stimare la corrente in ingresso alla batteria correttamente, in modo che lo stimatore sia in grado di prevedere l'energia disponibile nella batteria. Infatti la variazione di stato di energia della batteria è strettamente legato alla corrente che assorbe o eroga.

Nella Figura 59 vengono confrontate la corrente stimata e misurata in una generica prova di carica e scarica, mentre nella Figura 60, Figura 61, Figura 62 viene riportato l'andamento della corrente stimata e misurata nelle prove di parametrizzazione.



**Figura 59** Corrente stimata e misurata ai morsetti di batteria. Lo scarto quadratico medio della corrente di batteria alla fine della prova è 0,7 A

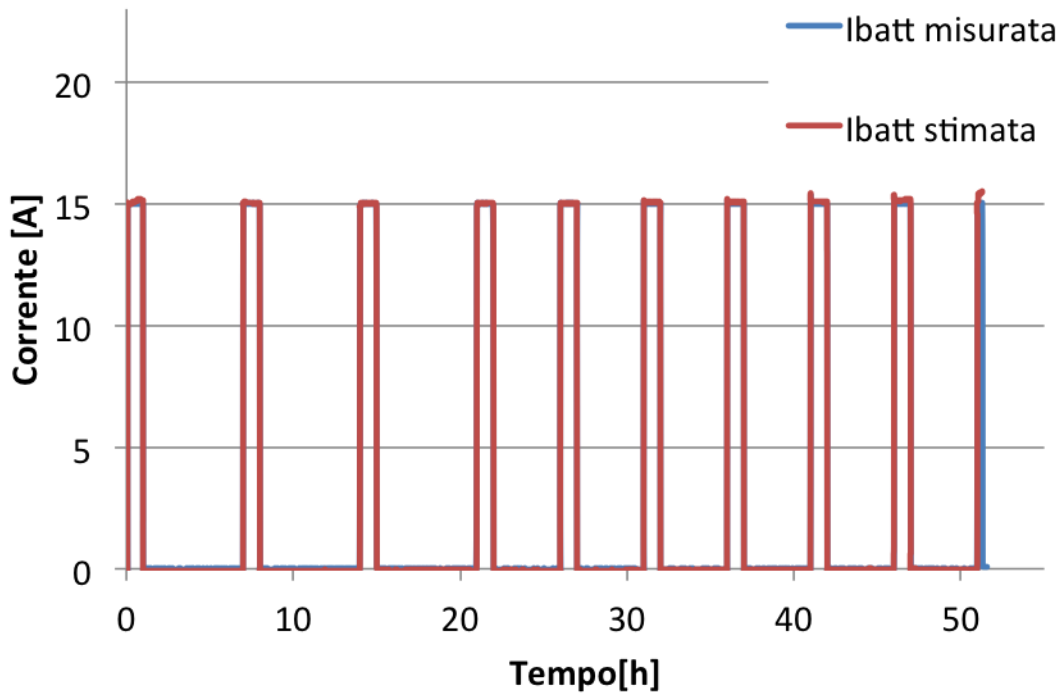


Figura 60 Prova di parametrizzazione a 15 A. Lo scarto quadratico medio della corrente di batteria alla fine della prova è 0,08 A

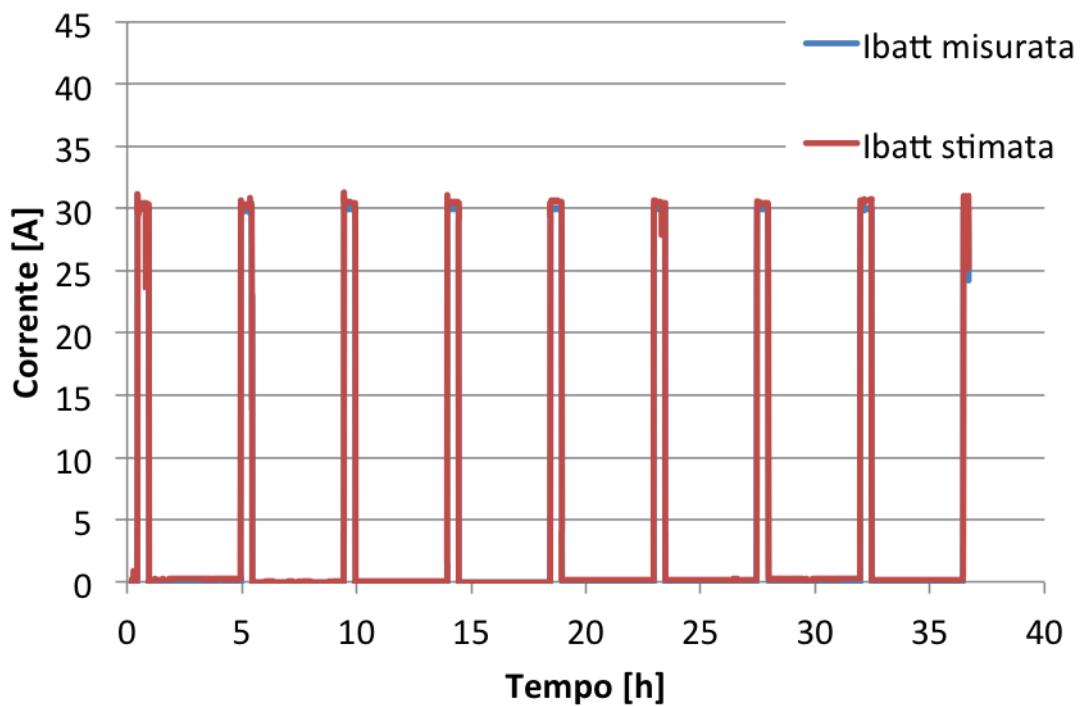
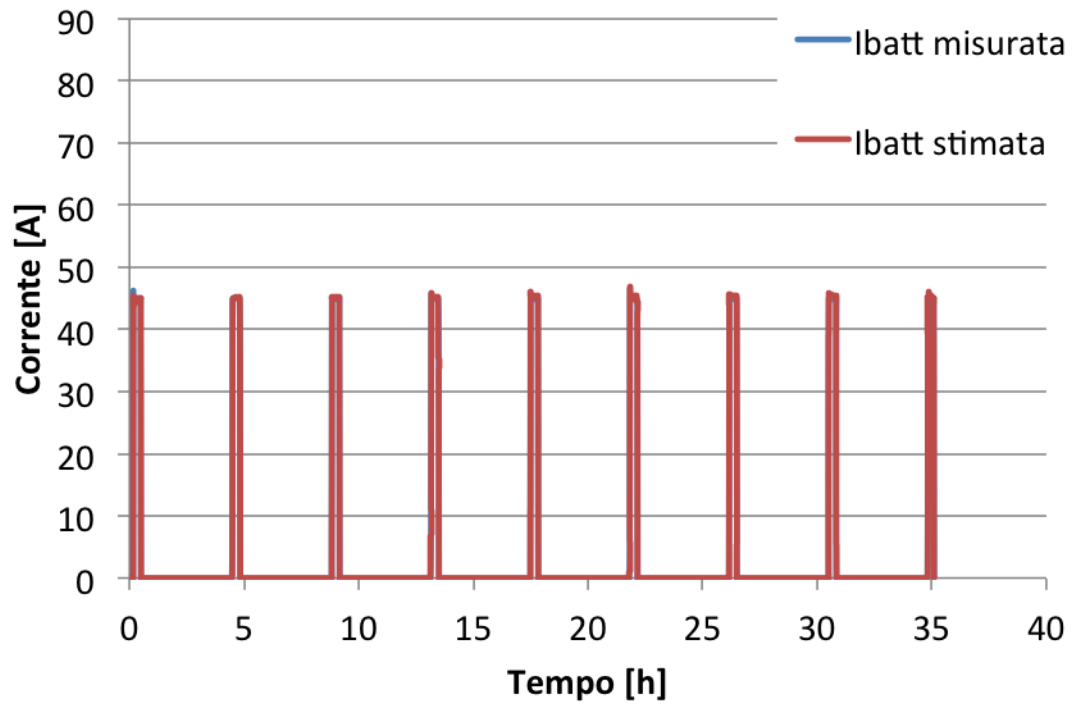


Figura 61 Prova di parametrizzazione a 30 A. Lo scarto quadratico medio della corrente di batteria alla fine della scarica è 0,25 A



**Figura 62** Prova di parametrizzazione a 45 A. Lo scarto quadratico medio della corrente di batteria alla fine della scarica è 0,29 A

## 6 Validazione dello stimatore

Lo stimatore è stato validato eseguendo prove di carica e scarica a vari set point di potenza attiva e reattiva. Prima si è eseguita una prova in Simulink® con un determinato profilo di potenze impostato ai morsetti di rete (Figura 63, Figura 65). Successivamente è stata effettuata una prova in laboratorio con gli stessi set point. Nella Figura 64 e nella Figura 66 sono riportati i confronti tra l'energia stimata scambiata dalla batteria nella simulazione e l'energia misurata nella prova effettuata in laboratorio. Si ricorda che per valori positivi le potenze sono uscenti dal sistema, cioè erogate dalla batteria, mentre per valori negativi sono assorbite. Nel dettaglio i risultati ottenuti vengono riportati di seguito.

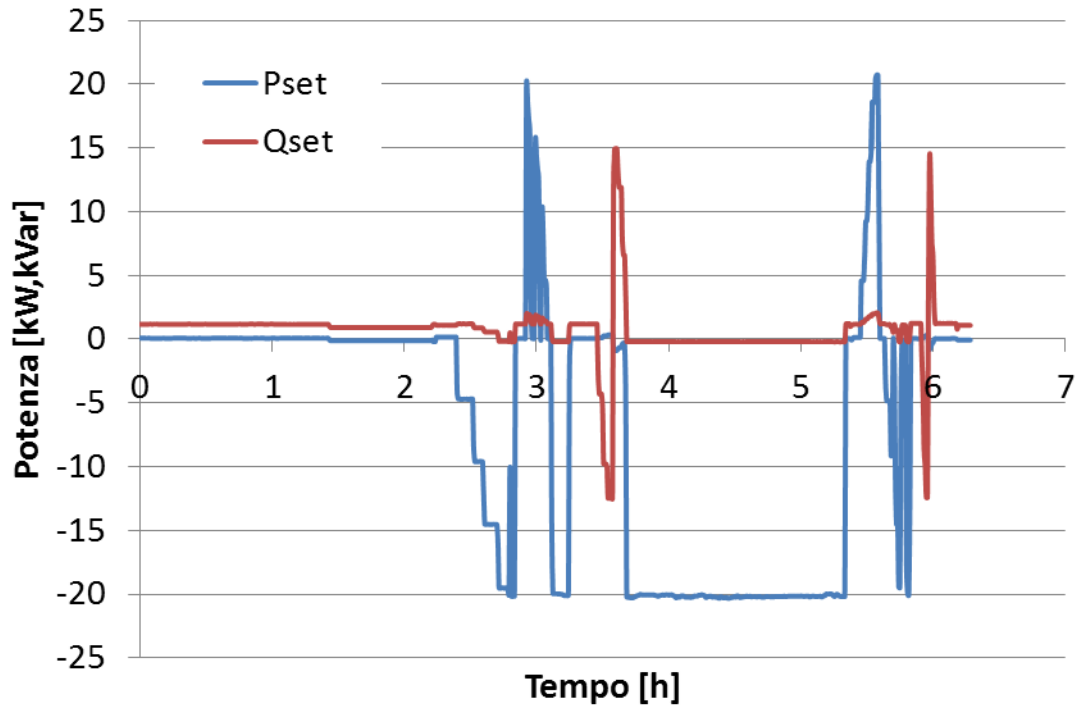


Figura 63 Set point di potenza attiva e reattiva ai morsetti di rete (per valori positivi la potenza esce dal sistema, per valori negativi entra)

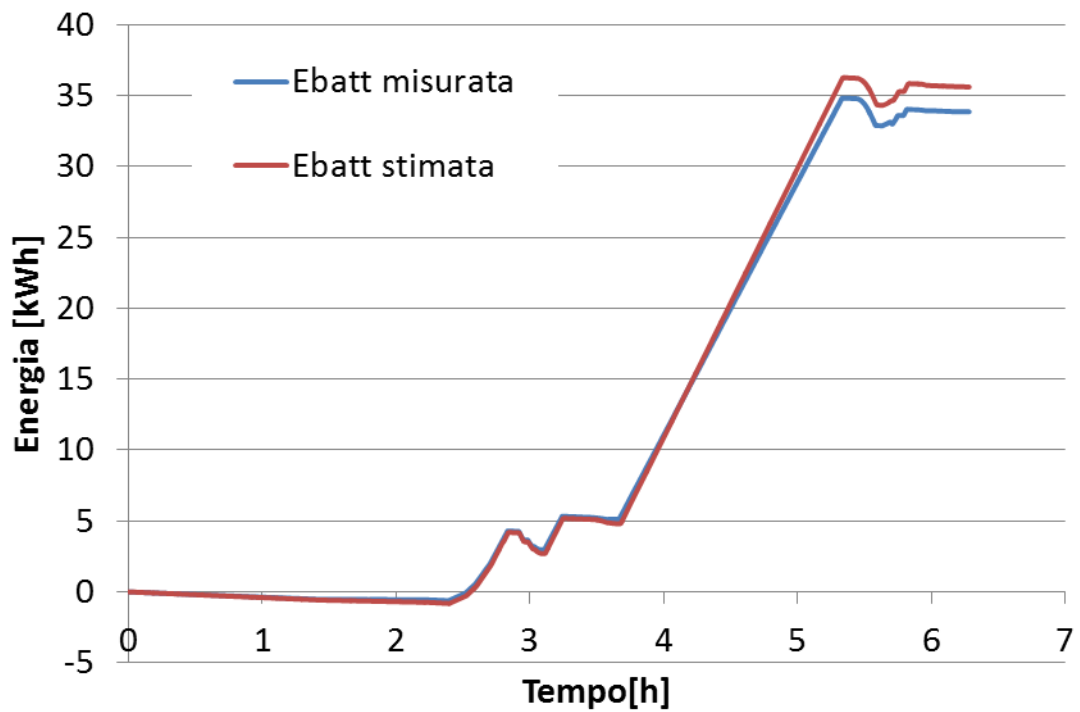


Figura 64 Confronto tra energia stimata e energia misurata per la prova riportata in Figura 63. Errore 5%



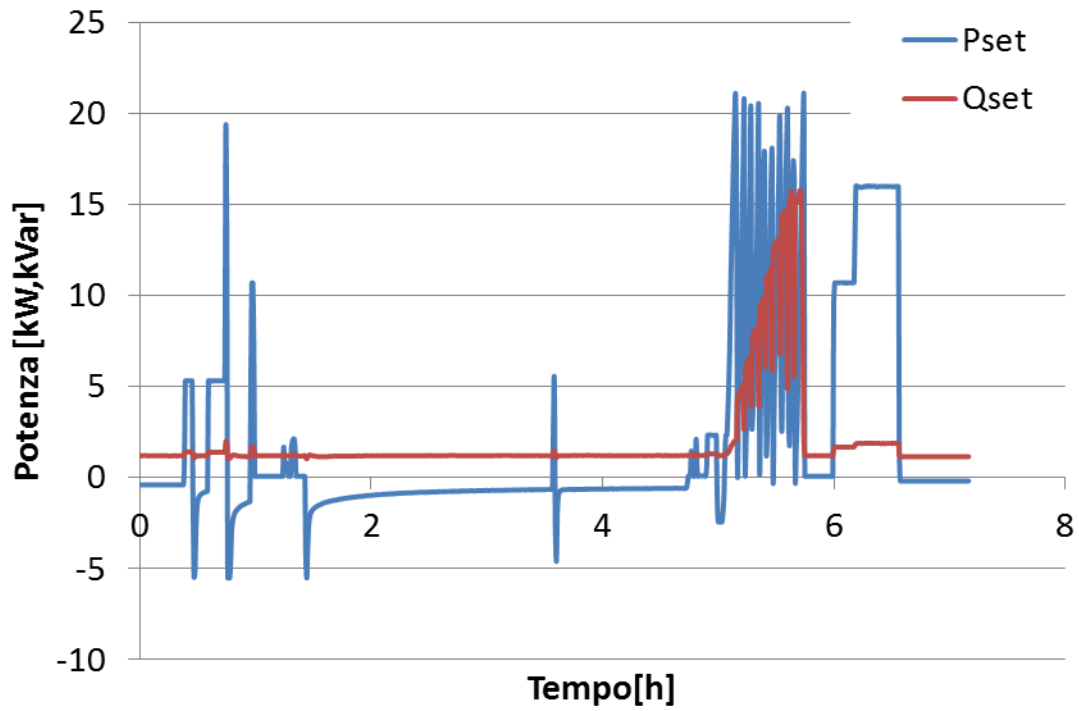


Figura 65 Set point di potenza attiva e reattiva ai morsetti di rete (per valori positivi la potenza esce dal sistema, per valori negativi entra)

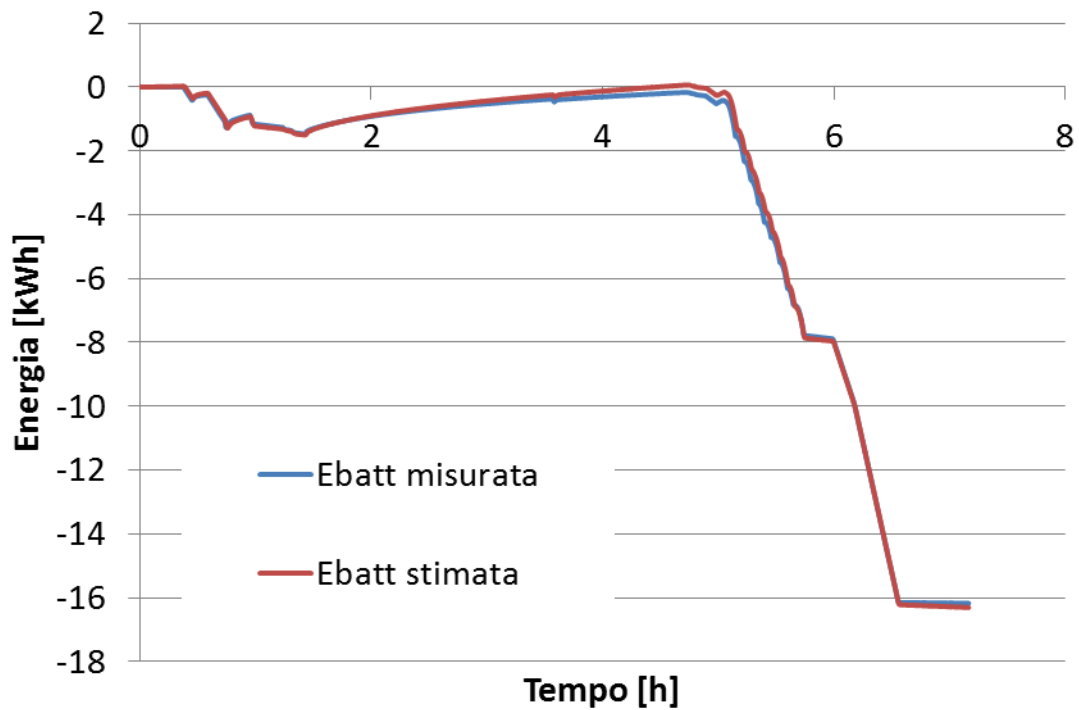


Figura 66 Confronto tra energia stimata e energia misurata per la prova riportata in Figura 65. Errore 1%

Dalle prove si può vedere che l'accuratezza dello stimatore è superiore quando la batteria si scarica (Figura 65 e Figura 66), ma mantiene comunque un errore sulla stima dell'energia basso, inferiore al 5%.

Dopo che il modello è stato validato in Simulink®, è stato implementato anche il software che gestisce il sistema in laboratorio su piattaforma Labview®. Grazie a questo nuovo tool il gestore della Test Facility potrà gestire in maniera più consapevole l'accumulo al piombo presente nella sua rete.

## 7 Conclusioni

I risultati ottenuti nelle prove sperimentali confermano l'affidabilità dello stimatore di energia realizzato. Grazie a questo stimatore sarà possibile una gestione migliore degli accumuli salvaguardandone i limiti di funzionamento e sfruttando un quantitativo maggiore di energia rispetto al caso in cui si consideri l'energia nominale dichiarata dal costruttore. Un ulteriore vantaggio dello stimatore proposto, conseguenza dell'incremento dell'energia utilizzabile, è la possibilità di effettuare un dimensionamento degli sistemi di accumulo meno conservativo garantendo un risparmio sul costo di investimento. L'applicazione principale per cui questo stimatore è stato fatto è il mercato del giorno prima, in cui si vende l'energia elettrica per il giorno successivo. Il tool sviluppato consente di avere una migliore stima dell'energia a disposizione e quindi di effettuare una migliore pianificazione delle risorse a disposizione del mercato elettrico.

Il trend odierno mostra che gli accumuli saranno sempre più presenti nel parco di produzione italiano. Una loro gestione efficiente può giovare all'intero sistema, magari in soccorso alle centrali termoelettriche che mal sopportano le fluttuazioni della curva di carico.

Per rendere realizzabile tutto ciò servirebbe che i produttori di accumuli offrissero una versione parametrizzata (nel modo descritto) dei loro prodotti in modo che l'utilizzatore possa usufruire del SoE oggetto della tesi.

Sviluppi futuri del lavoro oggetto di questa tesi individueranno la variazione dei parametri in funzione dell'invecchiamento della batteria. Una volta trovato questo legame basterebbe parametrizzare la batteria solo una volta. In questo modo la procedura di parametrizzazione non sarebbe troppo onerosa, anzi porterebbe vantaggi a tutti: dal produttore che può vendere la batteria parametrizzata, quindi più affidabile, all'acquirente che può vendere più consapevolmente l'energia che accumula e all'intero sistema che può integrarsi meglio con le fonti rinnovabili.

Il metodo di lavoro illustrato può essere usato anche per altre tipologie di batteria che non siano al piombo. Infatti la peculiarità di questo caso di studio non è tanto la stima dell'energia di una batteria al piombo (di cui comunque non è stata trovata traccia in letteratura), ma la metodologia di lavoro con cui si è affrontata la parametrizzazione di una intera batteria (non di una sola cella) e dell'intero sistema di accumulo, compreso lo stadio di conversione.

## Bibliografia

- [1] RSE\_Monografia\_Accumulo, “L’accumulo di energia elettrica”, 2011
- [2] Nicola Caon, “Tecnologia e Innovazione dell’Immagazzinamento Elettrochimico dell’Energia”, 2012
- [3] M. Conte, G. Graditi, M.G. Ippolito, E. Riva Sanseverino, E. Telaretti, G. Zizzo, Analisi e definizione di strategie di gestione e controllo di sistemi di accumulo elettrico per applicazioni in reti di distribuzione attive automatizzate, Report RdS/2011/303
- [4] Francesco Peretti, “Modelli circuitali di celle elettrochimiche della famiglia Na-Beta”, 2015
- [5] I.Gyuk, et al., “Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications” rapporto tecnico EPRI DOE n°10001834, december 2003
- [6] Giovanni Viganò, “Modellizzazione elettrica e termica di una batteria agli ioni di litio con stimatore dello stato di carica”, 2014
- [7] Thibaut Kovaltchouk, Vincent Debusschere, Seddik Bacha, “Assessment of the impact of frequency containment control and synthetic inertia on intermittent energies generators integration”, 2016
- [8] Massimiliano Sacchi, “Descrizione dell’Impianto Test Facility di Generazione Distribuita in bassa tensione (P960)”, 2015
- [9] Linfeng Zheng, Jianguo Zhu, Guoxiu Wang, Tingting He, Yiying Wei, “Novel methods for estimating lithium-ion battery state of energy and maximum available energy”, 2016
- [10] Xu J, Mi CC, Cao B, Deng J, Chen Z, Li S., “The state of charge estimation of lithium-ion batteries based on a proportional-integral observer” 2014
- [11] Hu X, Sun F, Zou Y, “ Estimation of state of charge of a lithium-ion battery pack for electric vehicles using an adaptive Luenberger observer”, 2010
- [12] Kim I, “The Novel state of charge estimation method for lithium batteries using sliding mode observer”, 2006
- [13] Xiong R, Sun F, Chen Z, He H, “A data-driven multi-scale extended Kalman filtering based parameter and state estimation approach of lithium-ion olymer battery in electric vehicles”, 2014
- [14] Guangzhong Dong, Xu Zhang, Chenbin Zhang, Zonghai Chen, “A method for state of energy estimation of lithium-ion batteries based on neural network model” 2015
- [15] Li Xin, WANG Dan, ZHENG Tao, CHEN Wei, “ Energy Management strategy of Battery in isolated Micro-grid based on State of Charge (SOC), 2014

- [16] HongWen He, YongZhi Zhang, Rui Xiong, Chun Wang, "A novel Gaussian model based battery state estimation approach: State-of-Energy", 2015
- [17] Saeed Sepasi, Leon R. Roose, Marc Matsuura, Hsun Jou, "Universal state of charge estimator for battery packs of battery energy storage systems, 2015
- [18] Yujie Wang, Chenbin Zhang, Zonghai Chen, "Model-based State-of-energy Estimation of Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles, 2015
- [19] R.X.J.F Hongwen He, "Evakuation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for state of Charge Estimation by an Experimental Approach", *Energies*, vol. 4, pp. 582-598, 2011
- [20] Luigi Pellegrino, Enrica Micolano, Riccardo Lazzari, "Definizione di metodi per la diagnostica di accumuli elettrochimici e di procedure per una loro gestione ottimizzata. Sperimentazione di un sistema ibrido supercondensatore-batteria litio-ioni", 2014
- [21] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Power electronics", 2003
- [22] Daniel Nilsson, Ambra Sannino, "Efficiency analysis of low- and medium- voltage dc distribution systems"
- [23] Frede Blaabjerg, John K. Pedersen, Sigurdur Sigurjónsson, Alexander Elkjaer, "An Extended Model of Power Losses in Hard-switched IGBT-inverters
- [24] Arendt Wintrich, Ulrich Nicolai, Werner Tursky, Tobias Reimann, *Application Manual Power Semiconductors*, 2015
- [25] King DL, Gonzalez S, Galbraith GM, Boyson WE. Performance model for grid- connected photovoltaic inverter. Sandia National Laboratories, Sandia Report 2007
- [26] G.A. Rampinelli, A. Krenzinger, F. Chenlo Romero, *Mathematical models for efficiency of inverters used in grid connected photovoltaic systems*, 2014
- [27] Annabelle Pratt, Pavan Kumar and Tomm V. Aldridge, "Evaluation of 400V DC Distribution in Telco and Data Centers to Improve Energy Efficiency"
- [28] *Atti del convegno CEI "Prestazioni funzionali, prestazioni energetiche e sicurezza nei sistemi elettrici. Aggiornamento normativo."* Torino 8 Ottobre 2015

## Appendice A

Valore di  $R_{0,15}$  per valori di SoC compresi tra 1 e 0,9.

$$R_0(I) = R_{0,15} - \left( \frac{SoC - 0,9}{0,1} \cdot (0,1731 - 0,0156) + 0,0156 \right) \cdot 15^{\left( \frac{SoC - 0,9}{0,1} \cdot (0,206 - 0,513) - 0,206 \right)} \\ - \left( \frac{SoC - 0,9}{0,1} \cdot (0,1731 - 0,0156) + 0,0156 \right) \cdot I^{\left( \frac{SoC - 0,9}{0,1} \cdot (0,206 - 0,513) - 0,206 \right)}$$

$$R_1(I) = R_{1,15} - \left( \frac{SoC - 0,9}{0,1} \cdot (0,1202 - 0,0656) + 0,0656 \right) \cdot 15^{\left( \frac{SoC - 0,9}{0,1} \cdot (0,56 - 0,592) - 0,56 \right)} \\ - \left( \frac{SoC - 0,9}{0,1} \cdot (0,1202 - 0,0656) + 0,0656 \right) \cdot I^{\left( \frac{SoC - 0,9}{0,1} \cdot (0,56 - 0,592) - 0,56 \right)}$$



**C1\_15 A [F]**

<b>mod1</b>	<b>mod2</b>	<b>mod3</b>	<b>mod4</b>	<b>mod5</b>	<b>mod6</b>	<b>mod7</b>	<b>mod8</b>	<b>mod9</b>	<b>mod10</b>	<b>mod11</b>	<b>mod12</b>	<b>mod13</b>	<b>mod14</b>	<b>mod15</b>
1012	1014	1016	1149	914	951	857	876	858	924	847	860	1062	942	914
1013	1015	1017	1150	915	952	858	877	859	925	848	861	1063	943	915
1033	1051	1082	1085	942	945	895	888	916	938	902	898	893	959	957
1028	1057	1077	1075	961	999	922	932	948	952	939	937	920	979	987
1062	1085	1099	1107	1011	1049	987	1011	1000	999	1001	1006	979	1032	1039
1123	1150	1169	1169	1087	1111	1075	1106	1077	1084	1091	1101	1065	1111	1115
1224	1263	1277	1290	1226	1246	1225	1250	1219	1229	1247	1247	1216	1256	1248
1368	1392	1400	1433	1424	1428	1415	1435	1418	1414	1448	1434	1475	1447	1464
1569	1601	1594	1626	1632	1621	1647	1665	1638	1630	1659	1643	1685	1646	1665
1767	1791	1789	1828	1864	1783	1907	1928	1875	1875	1905	1894	1894	1882	1896
1768	1792	1790	1829	1865	1784	1908	1929	1876	1876	1906	1895	1895	1883	1897

<b>mod16</b>	<b>mod17</b>	<b>mod18</b>	<b>mod19</b>	<b>mod20</b>	<b>mod21</b>	<b>mod22</b>	<b>mod23</b>	<b>mod24</b>	<b>mod25</b>	<b>mod26</b>	<b>mod27</b>	<b>mod28</b>	<b>mod29</b>	<b>mod30</b>	<b>mod31</b>
983	946	1016	979	1011	1051	957	1095	893	824	834	913	942	898	974	832
984	947	1017	980	1012	1052	958	1096	894	825	835	914	943	899	975	833
995	984	1016	984	1011	1066	947	1094	948	898	889	942	948	902	969	871
1011	996	1002	1007	1025	1053	956	1085	969	939	941	971	970	935	993	931
1069	1047	1038	1074	1068	1085	987	1104	1012	995	1018	1029	1023	998	1062	1012
1149	1133	1112	1164	1137	1156	1058	1159	1086	1084	1116	1119	1104	1091	1157	1115
1263	1268	1234	1303	1267	1260	1195	1275	1226	1230	1269	1271	1251	1240	1303	1281
1407	1415	1386	1441	1449	1393	1416	1416	1426	1419	1469	1484	1477	1465	597	1467
1604	1605	1597	1629	1653	1591	1635	1597	1630	1647	1685	1680	1684	1687	690	1666
1828	1822	1812	1868	1852	1768	1853	1752	1847	1891	1946	1904	1906	1942	785	1902
1829	1823	1813	1869	1853	1769	1854	1753	1848	1892	1947	1905	1907	1943	786	1903



**C2\_15 A [kF]**

<b>mod1</b>	<b>mod2</b>	<b>mod3</b>	<b>mod4</b>	<b>mod5</b>	<b>mod6</b>	<b>mod7</b>	<b>mod8</b>	<b>mod9</b>	<b>mod10</b>	<b>mod11</b>	<b>mod12</b>	<b>mod13</b>	<b>mod14</b>	<b>mod15</b>
276	212	236	212	303	173	315	393	274	315	276	323	251	306	316
276	212	236	212	303	173	315	393	274	315	276	323	251	306	316
445	389	414	425	484	373	471	540	450	485	436	482	462	480	492
564	534	545	569	603	527	583	656	575	612	556	609	585	600	611
624	616	609	660	682	646	661	725	653	702	649	678	662	699	695
648	640	636	649	686	657	672	727	659	709	657	685	670	703	681
623	621	622	596	623	608	620	655	607	642	596	625	579	627	607
507	498	492	489	515	503	507	524	507	524	497	512	492	522	513
430	436	422	429	459	441	454	457	452	462	446	451	444	457	444
300	318	311	334	349	312	337	345	342	347	341	345	350	336	328
300	318	311	334	349	312	337	345	342	347	341	345	350	336	328

<b>mod16</b>	<b>mod17</b>	<b>mod18</b>	<b>mod19</b>	<b>mod20</b>	<b>mod21</b>	<b>mod22</b>	<b>mod23</b>	<b>mod24</b>	<b>mod25</b>	<b>mod26</b>	<b>mod27</b>	<b>mod28</b>	<b>mod29</b>	<b>mod30</b>	<b>mod31</b>
352	290	262	377	290	313	252	207	286	291	337	332	340	361	408	425
352	290	262	377	290	313	252	207	286	291	337	332	340	361	408	425
500	450	442	522	484	503	438	427	474	451	487	500	522	522	548	568
608	568	564	626	614	618	570	581	601	570	604	614	630	629	651	678
661	634	634	682	701	678	656	677	687	641	677	688	714	699	700	730
673	648	638	684	697	699	657	662	685	653	686	689	704	701	694	713
634	617	630	639	635	680	606	619	628	615	625	622	616	635	647	641
505	495	522	501	519	523	514	506	519	499	506	515	516	532	684	519
432	432	464	434	454	438	466	437	461	441	443	455	460	480	639	443
301	303	338	313	332	307	349	322	339	324	331	334	343	360	674	308
301	303	338	313	332	307	349	322	339	324	331	334	343	360	674	308

**R0\_15 A [mOhm]**

mod1	mod2	mod3	mod4	mod5	mod6	mod7	mod8	mod9	mod10	mod11	mod12	mod13	mod14	mod15
12,4	14,3	13,0	13,7	12,5	18,4	12,4	10,9	12,9	12,2	12,7	11,9	13,7	12,1	12,3
12,4	14,3	13,0	13,7	12,5	18,4	12,4	10,9	12,9	12,2	12,7	11,9	13,7	12,1	12,3
10,1	10,6	10,2	10,2	10,1	11,3	10,2	9,3	10,3	9,9	10,3	9,8	10,1	9,9	10,0
9,0	9,2	8,9	8,9	9,0	9,5	9,1	8,5	9,1	8,8	9,1	8,8	8,9	8,8	8,9
8,4	8,5	8,3	8,2	8,3	8,7	8,5	8,0	8,5	8,2	8,5	8,2	8,3	8,2	8,2
8,1	8,1	8,0	7,9	8,0	8,2	8,1	7,7	8,1	7,9	8,1	7,9	7,9	7,9	7,9
7,9	7,8	7,7	7,6	7,7	7,9	7,8	7,4	7,8	7,6	7,8	7,7	7,6	7,6	7,6
7,7	7,6	7,6	7,4	7,5	7,7	7,6	7,3	7,6	7,4	7,6	7,5	7,3	7,4	7,5
7,6	7,5	7,4	7,3	7,4	7,5	7,5	7,3	7,5	7,3	7,5	7,4	7,3	7,3	7,4
7,8	7,6	7,6	7,3	7,4	7,6	7,5	7,3	7,5	7,3	7,5	7,4	7,4	7,4	7,5
42,9	41,6	43,3	31,1	24,7	35,2	26,3	30,9	31,3	27,1	27,7	26,7	25,1	28,5	27,3

mod16	mod17	mod18	mod19	mod20	mod21	mod22	mod23	mod24	mod25	mod26	mod27	mod28	mod29	mod30	mod31
11,1	12,1	12,8	10,9	12,7	11,8	13,8	14,0	12,8	12,9	11,7	11,7	11,7	11,6	10,6	10,5
11,1	12,1	12,8	10,9	12,7	11,8	13,8	14,0	12,8	12,9	11,7	11,7	11,7	11,6	10,6	10,5
9,4	9,9	10,1	9,4	10,0	9,6	10,6	10,3	10,2	10,4	9,7	9,7	9,7	9,7	9,2	9,2
8,6	8,9	8,9	8,5	8,8	8,6	9,3	8,9	9,0	9,2	8,8	8,8	8,7	8,7	8,4	8,4
8,1	8,3	8,3	8,1	8,2	8,1	8,6	8,3	8,4	8,5	8,2	8,2	8,1	8,2	7,9	7,9
7,9	8,0	8,0	7,8	7,8	7,8	8,2	7,9	8,1	8,2	7,9	7,9	7,8	7,8	7,7	7,6
7,7	7,8	7,7	7,7	7,5	7,6	7,8	7,6	7,7	7,9	7,6	7,6	7,4	7,5	7,5	7,4
7,6	7,6	7,5	7,5	7,3	7,4	7,6	7,3	7,5	7,7	7,5	7,5	7,3	7,3	5,7	7,3
7,5	7,5	7,3	7,4	7,3	7,3	7,4	7,3	7,4	7,6	7,4	7,3	7,2	7,2	5,7	7,2
7,6	7,6	7,3	7,5	7,3	7,5	7,4	7,4	7,3	7,6	7,4	7,4	7,3	7,2	5,7	7,3
45,4	43,4	27,7	43,2	31,4	45,8	24,5	33,5	28,5	34,7	27,1	29,1	24,9	21,7	34,6	29,9

**R1\_15 A [mOhm]**

mod1	mod2	mod3	mod4	mod5	mod6	mod7	mod8	mod9	mod10	mod11	mod12	mod13	mod14	mod15
17,9	20,1	18,5	19,6	17,5	26,4	17,5	16,2	18,1	17,4	17,7	17,0	20,0	17,4	17,4
17,9	20,1	18,5	19,6	17,5	26,4	17,5	16,2	18,1	17,4	17,7	17,0	20,0	17,4	17,4
16,1	16,7	16,3	16,3	15,7	17,0	16,0	15,2	16,1	15,6	16,0	15,5	15,8	15,7	15,7
15,5	15,8	15,6	15,5	15,2	16,0	15,5	14,9	15,4	15,1	15,4	15,1	15,1	15,2	15,2
15,4	15,5	15,5	15,4	15,2	15,7	15,4	15,0	15,3	15,0	15,3	15,1	15,1	15,1	15,2
15,6	15,6	15,5	15,5	15,4	15,7	15,6	15,3	15,6	15,3	15,6	15,4	15,4	15,4	15,4
15,9	15,9	15,8	15,9	16,0	16,2	16,2	16,1	16,2	15,9	16,2	16,1	16,0	16,0	16,1
16,2	16,2	16,1	16,1	16,5	16,5	16,7	16,6	16,7	16,4	16,6	16,5	16,8	16,3	16,6
17,6	17,7	17,6	17,5	18,0	18,0	18,1	17,9	18,1	17,8	18,0	17,8	18,1	17,7	18,2
21,5	21,6	21,4	21,8	22,0	21,8	21,8	21,6	22,0	21,7	22,0	21,7	22,4	21,7	22,4
10,5	10,6	10,4	10,8	11,0	10,8	10,8	10,6	11,0	10,7	11,0	10,7	11,4	10,7	11,4

mod16	mod17	mod18	mod19	mod20	mod21	mod22	mod23	mod24	mod25	mod26	mod27	mod28	mod29	mod30	mod31
16,5	17,4	18,5	16,2	18,1	17,3	19,2	19,9	17,9	17,9	16,6	16,8	16,9	16,9	16,0	15,7
16,5	17,4	18,5	16,2	18,1	17,3	19,2	19,9	17,9	17,9	16,6	16,8	16,9	16,9	16,0	15,7
15,4	15,9	16,2	15,2	15,8	15,6	16,3	16,5	15,9	16,1	15,3	15,4	15,3	15,4	15,0	14,8
15,0	15,3	15,5	15,0	15,2	15,1	15,5	15,5	15,2	15,5	15,0	15,0	14,9	14,9	14,7	14,5
15,1	15,2	15,3	15,1	15,1	15,1	15,3	15,3	15,1	15,4	15,0	15,1	15,0	14,9	14,8	14,6
15,4	15,5	15,4	15,4	15,3	15,3	15,4	15,4	15,3	15,6	15,4	15,3	15,3	15,3	15,3	15,1
15,8	15,9	15,9	15,9	15,8	15,6	16,0	15,8	16,0	16,2	16,1	16,0	15,9	15,9	15,9	15,9
16,2	16,1	16,0	16,2	16,3	15,9	16,5	15,9	16,4	16,6	16,6	16,4	16,4	16,4	9,4	16,1
17,6	17,6	17,4	17,6	17,9	17,4	17,9	17,3	17,7	18,1	18,1	17,8	17,7	17,6	10,4	17,3
21,3	21,4	21,3	21,2	21,9	21,2	21,8	21,5	21,7	22,0	21,9	21,8	21,8	21,4	11,3	20,9
10,3	10,4	10,3	10,2	10,9	10,2	10,8	10,5	10,7	11,0	10,9	10,8	10,8	10,4	0,3	9,9

**R2\_15 A [mOhm]**

mod1	mod2	mod3	mod4	mod5	mod6	mod7	mod8	mod9	mod10	mod11	mod12	mod13	mod14	mod15
9,1	10,7	10,1	11,2	9,0	12,8	8,4	7,4	9,4	8,6	9,2	8,5	10,0	8,8	8,7
9,1	10,7	10,1	11,2	9,0	12,8	8,4	7,4	9,4	8,6	9,2	8,5	10,0	8,8	8,7
6,5	7,1	6,8	7,1	6,4	7,7	6,3	6,0	6,7	6,2	6,7	6,4	6,8	6,4	6,4
5,5	5,7	5,6	5,8	5,5	6,0	5,5	5,3	5,6	5,3	5,6	5,5	5,8	5,4	5,5
5,2	5,3	5,3	5,3	5,1	5,4	5,1	5,0	5,2	4,9	5,2	5,1	5,5	5,0	5,1
5,3	5,4	5,4	5,4	5,2	5,4	5,2	5,1	5,3	5,0	5,3	5,2	5,3	5,1	5,2
5,5	5,6	5,6	5,7	5,6	5,7	5,7	5,5	5,7	5,5	5,8	5,6	5,6	5,5	5,6
5,5	5,6	5,5	5,5	5,7	5,7	5,8	5,6	5,8	5,6	5,8	5,6	5,8	5,5	5,7
5,2	5,3	5,2	5,3	5,3	5,4	5,4	5,3	5,4	5,2	5,4	5,3	5,5	5,3	5,4
5,3	5,3	5,3	5,4	5,2	5,3	5,2	5,1	5,2	5,1	5,3	5,2	5,4	5,3	5,4
3,3	3,3	3,3	3,4	3,2	3,3	3,2	3,1	3,2	3,1	3,3	3,2	3,4	3,3	3,4

mod16	mod17	mod18	mod19	mod20	mod21	mod22	mod23	mod24	mod25	mod26	mod27	mod28	mod29	mod30	mod31
7,7	8,7	9,4	7,6	9,4	8,6	10,0	11,4	9,3	8,9	8,1	8,3	8,4	7,9	7,2	7,2
7,7	8,7	9,4	7,6	9,4	8,6	10,0	11,4	9,3	8,9	8,1	8,3	8,4	7,9	7,2	7,2
6,0	6,4	6,6	6,0	6,6	6,1	6,8	7,1	6,5	6,5	6,3	6,2	6,2	6,1	5,8	6,0
5,3	5,5	5,5	5,3	5,5	5,2	5,6	5,7	5,4	5,5	5,5	5,3	5,4	5,3	5,0	5,3
5,1	5,2	5,2	5,1	5,1	5,0	5,2	5,2	5,0	5,2	5,1	5,0	5,1	5,0	4,9	5,0
5,2	5,3	5,3	5,3	5,2	5,1	5,3	5,3	5,1	5,3	5,2	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
5,5	5,7	5,6	5,6	5,5	5,3	5,7	5,6	5,6	5,7	5,7	5,6	5,5	5,5	5,5	5,6
5,5	5,6	5,4	5,6	5,6	5,3	5,7	5,4	5,6	5,8	5,8	5,7	5,6	5,6	3,1	5,5
5,2	5,2	5,1	5,2	5,3	5,1	5,3	5,1	5,2	5,4	5,4	5,3	5,3	5,2	2,8	5,1
5,4	5,4	5,0	5,3	5,3	5,2	5,1	5,3	5,2	5,3	5,3	5,3	5,2	5,0	2,4	5,3
3,4	3,4	3,0	3,3	3,3	3,2	3,1	3,3	3,2	3,3	3,3	3,3	3,2	3,0	3,0	3,3

**SoC prove a 30 A**

mod1	mod2	mod3	mod4	mod5	mod6	mod7	mod8	mod9	mod10	mod11	mod12	mod13	mod14	mod15
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,11	0,00	0,00
0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	-0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	-0,06	0,05	0,05
0,16	0,16	0,16	0,15	0,16	0,05	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,06	0,16	0,16
0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,17	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,18	0,27	0,27
0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,29	0,37	0,38	0,37	0,37	0,38	0,38	0,30	0,37	0,37
0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,41	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,42	0,48	0,48
0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,53	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,53	0,58	0,58
0,69	0,69	0,69	0,68	0,69	0,65	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,65	0,69	0,69
0,78	0,78	0,79	0,78	0,79	0,76	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,76	0,79	0,79
0,88	0,88	0,89	0,88	0,89	0,86	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,86	0,89	0,89
0,98	0,98	0,99	0,98	0,99	0,96	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,96	0,99	0,99

mod16	mod17	mod18	mod19	mod20	mod21	mod22	mod23	mod24	mod25	mod26	mod27	mod28	mod29	mod30	mod31
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
0,26	0,26	0,27	0,27	0,26	0,27	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,38	0,37	0,37
0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
0,69	0,69	0,69	0,69	0,68	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
0,79	0,79	0,79	0,79	0,78	0,79	0,78	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
0,89	0,89	0,89	0,89	0,88	0,89	0,88	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

**C1\_30 A [F]**

mod1	mod2	mod3	mod4	mod5	mod6	mod7	mod8	mod9	mod10	mod11	mod12	mod13	mod14	mod15
398	420	423	429	417	413	401	425	413	413	402	411	343	417	416
398	420	423	429	417	413	401	425	413	413	402	411	343	417	416
368	384	386	400	375	375	363	374	371	371	367	370	379	376	380
1646	1705	1703	1819	1681	1653	1612	1661	1631	1631	1629	1639	1773	1673	1677
408	419	418	417	401	402	389	397	391	391	388	390	402	394	394
603	639	633	630	599	612	581	592	585	585	583	582	597	595	597
467	482	476	460	445	456	438	440	438	438	435	433	432	436	436
687	724	711	661	645	679	635	632	637	637	630	617	593	612	615
494	515	508	487	488	499	472	467	478	478	478	470	453	473	485
494	515	508	487	488	499	472	467	478	478	478	470	453	473	485
495	516	509	488	489	500	473	468	479	479	479	471	454	474	486

mod16	mod17	mod18	mod19	mod20	mod21	mod22	mod23	mod24	mod25	mod26	mod27	mod28	mod29	mod30	mod31
406	406	419	419	416	419	355	421	410	391	411	422	422	413	427	422
406	406	419	419	416	419	355	421	410	391	411	422	422	413	427	422
372	372	382	375	383	382	369	398	371	361	369	376	381	372	383	374
1660	1652	1695	1653	1733	1693	1704	1775	1648	1620	1653	1655	1690	1663	1678	1671
404	401	409	402	412	413	403	416	397	393	394	396	397	395	402	392
605	604	608	610	617	623	600	634	597	585	590	596	591	589	609	580
459	454	461	456	458	468	451	463	446	446	438	442	434	437	448	433
675	672	669	679	664	690	643	665	645	651	632	638	610	615	650	602
495	491	488	493	494	501	478	491	486	483	477	483	466	463	482	459
495	491	488	493	494	501	478	491	486	483	477	483	466	463	482	459
496	492	489	494	495	502	479	492	487	484	478	484	467	464	483	460

**C2\_30 A [kF]**

<b>mod1</b>	<b>mod2</b>	<b>mod3</b>	<b>mod4</b>	<b>mod5</b>	<b>mod6</b>	<b>mod7</b>	<b>mod8</b>	<b>mod9</b>	<b>mod10</b>	<b>mod11</b>	<b>mod12</b>	<b>mod13</b>	<b>mod14</b>	<b>mod15</b>
259	262	265	195	311	293	300	348	309	309	278	317	187	284	295
259	262	265	195	311	293	300	348	309	309	278	317	187	284	295
253	258	257	252	290	279	282	313	291	291	275	305	287	284	297
326	327	320	324	351	338	336	366	341	341	333	357	391	346	366
340	340	328	324	351	338	336	360	336	336	331	345	376	337	337
570	602	571	622	662	632	634	682	634	634	643	663	701	685	677
317	314	305	301	310	303	306	317	306	306	301	308	318	307	296
505	506	501	507	509	502	509	528	515	515	508	516	544	521	505
121	121	122	122	116	118	120	123	123	123	121	126	125	130	129
121	121	122	122	116	118	120	123	123	123	121	126	125	130	129
121	121	122	122	116	118	120	123	123	123	121	126	125	130	129

<b>mod16</b>	<b>mod17</b>	<b>mod18</b>	<b>mod19</b>	<b>mod20</b>	<b>mod21</b>	<b>mod22</b>	<b>mod23</b>	<b>mod24</b>	<b>mod25</b>	<b>mod26</b>	<b>mod27</b>	<b>mod28</b>	<b>mod29</b>	<b>mod30</b>	<b>mod31</b>
286	272	270	319	247	287	213	206	299	277	308	324	305	311	346	368
286	272	270	319	247	287	213	206	299	277	308	324	305	311	346	368
270	263	276	287	275	274	253	261	282	272	294	299	305	296	310	341
342	326	345	340	356	348	339	341	348	341	344	348	362	353	367	405
339	328	351	337	357	349	349	339	351	346	341	344	352	352	348	370
605	597	616	612	661	631	651	638	655	614	644	674	689	694	677	714
309	299	327	299	317	315	328	308	316	314	303	307	309	330	305	331
505	492	541	493	521	520	548	520	521	510	502	514	521	559	511	556
126	119	127	118	122	128	125	126	126	120	118	121	123	131	124	134
126	119	127	118	122	128	125	126	126	120	118	121	123	131	124	134
126	119	127	118	122	128	125	126	126	120	118	121	123	131	124	134

**R0\_30 A [mOhm]**

mod1	mod2	mod3	mod4	mod5	mod6	mod7	mod8	mod9	mod10	mod11	mod12	mod13	mod14	mod15
8,9	8,8	8,6	10,2	8,9	9,2	9,2	8,9	9,1	9,1	9,2	9,1	12,8	9,1	8,9
8,9	8,8	8,6	10,2	8,9	9,2	9,2	8,9	9,1	9,1	9,2	9,1	12,8	9,1	8,9
7,9	7,7	7,6	8,1	7,8	8,0	8,1	7,8	8,0	8,0	8,1	8,0	8,7	7,9	7,8
7,2	7,0	6,9	7,0	7,0	7,1	7,2	7,0	7,2	7,2	7,3	7,2	7,4	7,1	7,1
7,0	6,7	6,7	6,8	6,8	6,9	6,9	6,7	6,9	6,9	7,0	6,9	7,0	6,8	6,8
6,7	6,5	6,5	6,5	6,5	6,6	6,7	6,5	6,7	6,7	6,7	6,6	6,6	6,5	6,5
6,5	6,3	6,3	6,2	6,3	6,3	6,4	6,2	6,4	6,4	6,4	6,4	6,3	6,3	6,3
6,2	6,0	6,1	6,0	6,0	6,1	6,2	6,0	6,2	6,2	6,2	6,1	6,1	6,0	6,0
6,5	6,3	6,3	6,2	6,3	6,4	6,4	6,2	6,4	6,4	6,5	6,4	6,3	6,3	6,4
16,2	16,4	16,2	16,8	15,6	16,1	15,7	15,4	15,9	15,5	16,0	15,7	16,7	15,8	15,8
29,2	29,4	29,2	29,8	28,6	29,1	28,7	28,4	28,9	28,5	29,0	28,7	29,7	28,8	28,8

mod16	mod17	mod18	mod19	mod20	mod21	mod22	mod23	mod24	mod25	mod26	mod27	mod28	mod29	mod30	mod31
8,7	8,8	9,0	8,5	9,5	8,5	11,3	10,0	8,9	9,3	9,2	8,7	9,0	9,2	8,3	9,1
8,7	8,8	9,0	8,5	9,5	8,5	11,3	10,0	8,9	9,3	9,2	8,7	9,0	9,2	8,3	9,1
7,7	7,8	7,9	7,6	7,9	7,6	8,4	7,9	7,9	8,2	8,0	7,7	7,8	8,0	7,5	8,0
7,0	7,1	7,1	6,9	7,0	6,9	7,3	7,0	7,1	7,3	7,1	7,0	7,0	7,1	6,8	7,1
6,8	6,8	6,8	6,7	6,7	6,7	7,0	6,7	6,9	7,0	6,9	6,7	6,8	6,9	6,6	6,9
6,5	6,6	6,5	6,5	6,5	6,4	6,6	6,4	6,6	6,7	6,6	6,5	6,5	6,6	6,4	6,6
6,3	6,3	6,3	6,3	6,2	6,2	6,4	6,2	6,3	6,5	6,3	6,3	6,2	6,3	6,2	6,3
6,1	6,1	6,1	6,1	6,0	6,0	6,1	6,0	6,1	6,2	6,1	6,0	6,0	6,1	6,0	6,1
6,4	6,4	6,3	6,3	6,3	6,3	6,4	6,3	6,4	6,5	6,4	6,3	6,3	6,3	6,2	6,3
16,1	16,2	16,0	16,0	16,4	16,0	16,4	16,8	16,0	16,4	16,0	16,1	15,9	14,5	16,0	15,9
29,1	29,2	29,0	29,0	29,4	29,0	29,4	29,8	29,0	29,4	29,0	29,1	28,9	27,5	29,0	28,9



**R1\_30 A [mOhm]**

mod1	mod2	mod3	mod4	mod5	mod6	mod7	mod8	mod9	mod10	mod11	mod12	mod13	mod14	mod15
10,9	11,0	10,6	12,4	10,8	11,1	11,0	11,0	10,9	10,9	10,9	11,0	15,2	10,8	10,6
10,9	11,0	10,6	12,4	10,8	11,1	11,0	11,0	10,9	10,9	10,9	11,0	15,2	10,8	10,6
9,8	9,7	9,5	9,9	9,5	9,8	9,8	9,7	9,8	9,8	9,8	9,8	10,6	9,6	9,5
8,6	8,4	8,4	8,2	8,3	8,5	8,5	8,4	8,5	8,5	8,5	8,5	8,6	8,3	8,4
10,0	9,8	9,8	9,6	9,7	9,8	9,9	9,7	9,9	9,9	9,8	9,8	9,8	9,6	9,7
11,3	11,2	11,1	10,9	11,1	11,2	11,2	11,1	11,2	11,2	11,2	11,1	11,0	10,9	11,0
11,0	10,9	10,8	10,6	10,8	10,9	10,9	10,7	10,8	10,8	10,8	10,8	10,5	10,5	10,5
12,1	12,0	12,0	11,8	12,1	12,1	12,2	12,0	12,1	12,1	12,1	12,1	11,9	11,8	11,8
11,9	11,8	11,8	11,7	12,0	12,0	12,1	12,0	12,1	12,1	12,1	12,1	11,9	12,0	12,0
11,7	11,6	11,6	11,5	11,8	11,8	11,9	11,8	11,9	11,9	11,9	11,9	11,7	11,8	11,8
11,5	11,4	11,4	11,3	11,6	11,6	11,7	11,6	11,7	11,7	11,7	11,7	11,5	11,6	11,6

mod16	mod17	mod18	mod19	mod20	mod21	mod22	mod23	mod24	mod25	mod26	mod27	mod28	mod29	mod30	mod31
10,6	10,6	10,9	10,5	11,4	10,4	13,3	12,1	10,7	11,1	11,1	10,5	10,8	11,1	10,2	11,0
10,6	10,6	10,9	10,5	11,4	10,4	13,3	12,1	10,7	11,1	11,1	10,5	10,8	11,1	10,2	11,0
9,6	9,6	9,8	9,5	9,7	9,4	10,1	9,8	9,6	9,9	9,8	9,5	9,6	9,7	9,3	9,8
8,4	8,5	8,5	8,4	8,3	8,3	8,5	8,3	8,4	8,7	8,5	8,3	8,3	8,4	8,2	8,5
9,8	9,8	9,9	9,8	9,7	9,7	9,8	9,6	9,8	10,0	9,8	9,7	9,6	9,7	9,5	9,7
11,1	11,2	11,1	11,2	11,0	11,0	11,1	10,9	11,1	11,3	11,1	11,0	10,9	11,0	10,9	10,9
10,8	10,9	10,8	10,9	10,6	10,7	10,8	10,5	10,8	11,0	10,8	10,7	10,6	10,7	10,6	10,6
12,0	12,1	12,0	12,1	11,9	11,9	12,0	11,8	12,0	12,2	12,1	12,0	11,9	12,0	11,9	11,8
11,9	11,9	11,9	12,0	11,8	11,8	11,9	11,8	12,0	12,1	12,0	12,0	12,1	12,0	11,9	11,9
11,7	11,7	11,7	11,8	11,6	11,6	11,7	11,6	11,8	11,9	11,8	11,8	11,9	11,8	11,7	11,7
11,5	11,5	11,5	11,6	11,4	11,4	11,5	11,4	11,6	11,7	11,6	11,6	11,7	11,6	11,5	11,5

**R2\_30 A [mOhm]**

mod1	mod2	mod3	mod4	mod5	mod6	mod7	mod8	mod9	mod10	mod11	mod12	mod13	mod14	mod15
4,0	4,1	4,0	5,5	3,9	4,0	3,9	3,7	3,9	3,9	4,1	3,9	5,8	4,0	3,9
4,0	4,1	4,0	5,5	3,9	4,0	3,9	3,7	3,9	3,9	4,1	3,9	5,8	4,0	3,9
3,2	3,2	3,2	3,6	3,0	3,1	3,1	2,9	3,1	3,1	3,2	3,0	3,5	3,0	3,0
2,7	2,6	2,7	2,7	2,5	2,5	2,5	2,4	2,6	2,6	2,6	2,5	2,6	2,5	2,5
2,8	2,7	2,8	2,7	2,5	2,6	2,6	2,5	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,5	2,6
3,2	3,2	3,2	3,1	3,0	3,1	3,1	3,0	3,1	3,1	3,0	3,0	3,0	2,9	2,9
3,1	3,1	3,1	3,0	2,9	3,0	2,9	2,8	2,9	2,9	2,9	2,9	2,8	2,8	2,8
3,1	3,1	3,1	2,9	2,9	3,0	2,9	2,8	2,9	2,9	2,9	2,9	2,7	2,8	2,8
4,1	4,1	4,1	3,9	4,0	4,1	4,0	3,9	4,0	4,0	4,0	3,9	3,8	3,8	3,9
3,1	3,1	3,1	2,9	2,9	3,0	2,9	2,8	2,9	2,9	2,9	2,9	2,7	2,8	2,8
2,1	2,1	2,1	1,9	1,9	2,0	1,9	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	1,7	1,8	1,8

mod16	mod17	mod18	mod19	mod20	mod21	mod22	mod23	mod24	mod25	mod26	mod27	mod28	mod29	mod30	mod31
3,7	3,9	4,1	3,7	4,5	3,7	5,0	5,1	3,8	4,1	4,1	3,8	3,9	3,9	3,5	3,7
3,7	3,9	4,1	3,7	4,5	3,7	5,0	5,1	3,8	4,1	4,1	3,8	3,9	3,9	3,5	3,7
3,0	3,1	3,2	3,0	3,2	3,0	3,4	3,4	3,0	3,2	3,1	3,0	3,0	3,0	2,8	2,9
2,5	2,6	2,7	2,5	2,5	2,5	2,6	2,7	2,5	2,7	2,6	2,4	2,5	2,5	2,4	2,4
2,6	2,7	2,7	2,6	2,6	2,6	2,6	2,7	2,6	2,7	2,6	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	3,1	3,0	3,1	3,0	3,2	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
3,0	3,0	3,0	3,0	2,9	3,0	2,9	2,9	2,9	3,0	2,9	2,9	2,8	2,8	2,9	2,7
3,0	3,0	2,9	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	3,0	2,9	2,9	2,8	2,8	2,9	2,7
4,0	4,1	3,9	4,1	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	4,0	4,0	4,0	3,9	3,8	3,9	3,7
3,0	3,0	2,9	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	3,0	2,9	2,9	2,8	2,8	2,9	2,7
2,0	2,0	1,9	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	2,0	1,9	1,9	1,8	1,8	1,9	1,7

**SoC prove a 45 A**

mod1	mod2	mod3	mod4	mod5	mod6	mod7	mod8	mod9	mod10	mod11	mod12	mod13	mod14	mod15
0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-0,10	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-0,09	0,01	0,01
0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,00	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,01	0,11	0,11
0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,10	0,20	0,20
0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,21	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,21	0,30	0,30
0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,32	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,33	0,40	0,40
0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,44	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,44	0,50	0,50
0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,55	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,55	0,60	0,60
0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,66	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,66	0,70	0,70
0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,77	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,78	0,80	0,80
0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89	0,90	0,90
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

mod16	mod17	mod18	mod19	mod20	mod21	mod22	mod23	mod24	mod25	mod26	mod27	mod28	mod29	mod30	mod31
0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

**C1\_45 A [F]**

mod1	mod2	mod3	mod4	mod5	mod6	mod7	mod8	mod9	mod10	mod11	mod12	mod13	mod14	mod15
8609	9404	9138	13629	11340	9951	10067	10155	10496	10661	11063	11490	3931	11364	11610
8609	9404	9138	13629	11340	9951	10067	10155	10496	10661	11063	11490	3931	11364	11610
607	648	655	706	634	633	618	621	630	636	629	630	644	645	643
585	621	626	647	605	604	591	594	599	606	600	601	613	613	606
626	654	663	679	636	633	619	615	624	629	629	632	648	643	638
577	598	609	619	587	588	574	572	580	583	586	583	599	596	591
578	596	606	618	582	587	570	567	578	577	581	578	595	592	586
586	609	616	623	587	599	579	577	587	583	588	583	598	594	590
669	701	705	690	671	690	669	665	673	667	672	667	659	667	668
788	813	809	770	777	786	769	768	767	767	766	761	722	755	743
788	813	809	770	777	786	769	768	767	767	766	761	722	755	743

mod16	mod17	mod18	mod19	mod20	mod21	mod22	mod23	mod24	mod25	mod26	mod27	mod28	mod29	mod30	mod31
9060	9798	9143	10175	10369	8889	4538	11837	9853	9748	11120	11041	11694	10763	10435	10689
9060	9798	9143	10175	10369	8889	4538	11837	9853	9748	11120	11041	11694	10763	10435	10689
616	631	621	636	639	636	600	685	632	601	618	638	649	625	652	613
595	608	596	615	617	617	604	644	607	583	594	614	609	601	624	586
639	650	637	647	647	649	634	669	634	616	632	642	640	631	648	620
585	597	589	593	595	597	586	618	590	570	585	592	593	584	597	574
582	593	589	588	590	593	584	618	586	568	579	584	589	578	590	570
591	603	599	600	599	602	592	626	594	582	587	592	595	586	597	576
681	698	689	702	683	693	673	701	682	678	681	680	674	671	690	664
799	808	796	808	785	799	765	775	782	786	787	777	764	770	785	766
799	808	796	808	785	799	765	775	782	786	787	777	764	770	785	766

**C2\_45 A [kF]**

<b>mod1</b>	<b>mod2</b>	<b>mod3</b>	<b>mod4</b>	<b>mod5</b>	<b>mod6</b>	<b>mod7</b>	<b>mod8</b>	<b>mod9</b>	<b>mod10</b>	<b>mod11</b>	<b>mod12</b>	<b>mod13</b>	<b>mod14</b>	<b>mod15</b>
620	587	614	595	757	655	680	766	684	743	663	756	397	722	746
620	587	614	595	757	655	680	766	684	743	663	756	397	722	746
421	426	439	344	426	450	436	451	429	459	413	433	332	427	415
482	516	506	448	509	540	510	526	503	541	487	497	415	498	465
638	686	655	610	696	716	685	702	668	715	655	661	587	668	616
668	719	692	677	770	768	754	779	745	787	738	743	679	755	713
670	700	686	685	769	751	750	778	753	779	740	753	716	763	745
588	607	608	623	679	668	677	699	683	701	676	686	684	698	684
524	563	566	587	626	634	641	658	647	659	643	651	652	655	652
652	677	659	649	685	676	675	701	681	694	661	671	638	639	579
652	677	659	649	685	676	675	701	681	694	661	671	638	639	579

<b>mod16</b>	<b>mod17</b>	<b>mod18</b>	<b>mod19</b>	<b>mod20</b>	<b>mod21</b>	<b>mod22</b>	<b>mod23</b>	<b>mod24</b>	<b>mod25</b>	<b>mod26</b>	<b>mod27</b>	<b>mod28</b>	<b>mod29</b>	<b>mod30</b>	<b>mod31</b>
691	662	633	774	588	723	425	620	686	632	687	738	748	705	806	798
691	662	633	774	588	723	425	620	686	632	687	738	748	705	806	798
437	426	413	462	392	497	363	395	456	404	395	427	409	413	495	461
498	497	472	531	509	573	484	488	535	480	458	512	467	490	565	505
670	663	624	692	686	730	652	626	689	639	638	696	624	670	722	670
699	704	679	736	747	764	720	694	756	706	727	776	717	759	786	760
689	692	687	719	749	750	730	705	757	710	734	772	745	769	776	781
601	612	630	631	659	651	668	648	681	642	658	688	689	701	684	704
543	569	594	593	604	590	636	609	638	610	616	647	644	659	639	648
671	665	698	684	695	691	708	652	700	681	669	684	660	687	674	668
671	665	698	684	695	691	708	652	700	681	669	684	660	687	674	668

**R0\_45 A [mOhm]**

mod1	mod2	mod3	mod4	mod5	mod6	mod7	mod8	mod9	mod10	mod11	mod12	mod13	mod14	mod15
9,0	9,1	8,6	10,1	8,9	9,1	9,1	8,8	9,0	8,8	9,2	9,0	15,8	9,1	9,2
9,0	9,1	8,6	10,1	8,9	9,1	9,1	8,8	9,0	8,8	9,2	9,0	15,8	9,1	9,2
7,8	7,7	7,5	7,9	7,6	7,7	7,7	7,5	7,7	7,5	7,8	7,7	8,6	7,7	7,7
7,2	7,0	6,9	7,0	6,9	7,1	7,1	6,9	7,1	6,9	7,2	7,0	7,3	7,0	7,1
6,7	6,5	6,4	6,5	6,4	6,6	6,6	6,4	6,6	6,4	6,6	6,5	6,6	6,5	6,5
6,4	6,2	6,2	6,1	6,2	6,2	6,3	6,1	6,3	6,1	6,3	6,2	6,2	6,2	6,2
6,2	6,0	6,0	6,0	6,0	6,1	6,1	5,9	6,1	5,9	6,1	6,0	6,0	6,0	6,0
6,1	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,8	5,9	5,8	5,9	5,9	5,9	5,8	5,9
6,0	5,8	5,8	5,8	5,7	5,8	5,8	5,7	5,8	5,7	5,8	5,8	5,8	5,7	5,8
6,0	5,8	5,8	5,8	5,7	5,8	5,8	5,7	5,8	5,7	5,8	5,8	5,8	5,7	5,8
14,1	18,3	10,1	16,9	16,5	20,4	10,4	10,1	12,8	11,5	13,2	9,9	18,3	15,6	17,3

mod16	mod17	mod18	mod19	mod20	mod21	mod22	mod23	mod24	mod25	mod26	mod27	mod28	mod29	mod30	mod31
8,8	8,9	9,1	8,5	9,8	8,4	15,1	9,6	8,8	9,5	9,3	8,8	9,0	9,3	8,3	9,2
8,8	8,9	9,1	8,5	9,8	8,4	15,1	9,6	8,8	9,5	9,3	8,8	9,0	9,3	8,3	9,2
7,6	7,6	7,8	7,4	7,9	7,3	8,8	7,7	7,6	8,1	7,8	7,5	7,6	7,8	7,2	7,8
7,1	7,1	7,1	6,9	7,1	6,9	7,4	7,0	7,0	7,3	7,1	6,9	6,9	7,1	6,7	7,1
6,5	6,5	6,6	6,4	6,5	6,4	6,7	6,4	6,5	6,8	6,6	6,5	6,4	6,6	6,3	6,6
6,2	6,2	6,2	6,1	6,2	6,1	6,3	6,1	6,2	6,4	6,2	6,1	6,1	6,2	6,0	6,2
6,0	6,0	6,0	5,9	6,0	5,9	6,1	5,9	6,0	6,2	6,1	6,0	5,9	6,0	5,9	6,0
5,9	5,9	5,9	5,8	5,9	5,8	5,9	5,8	5,9	6,0	5,9	5,8	5,8	5,8	5,7	5,9
5,9	5,8	5,8	5,7	5,8	5,7	5,8	5,7	5,8	5,9	5,8	5,7	5,7	5,7	5,7	5,8
5,8	5,8	5,8	5,7	5,7	5,8	5,8	5,8	5,8	5,9	5,8	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
9,7	11,6	12,1	9,2	22,0	10,0	14,6	18,7	14,2	13,3	12,4	11,7	15,6	11,5	7,4	10,0

**R1\_45 A [mOhm]**

mod1	mod2	mod3	mod4	mod5	mod6	mod7	mod8	mod9	mod10	mod11	mod12	mod13	mod14	mod15
4,8	4,9	4,6	5,6	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,7	4,8	4,8	9,4	4,9	5,1
4,8	4,9	4,6	5,6	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,7	4,8	4,8	9,4	4,9	5,1
9,5	9,4	9,1	9,7	9,1	9,3	9,3	9,1	9,2	9,0	9,3	9,1	10,3	9,2	9,3
8,8	8,6	8,4	8,5	8,4	8,5	8,5	8,3	8,5	8,3	8,5	8,4	8,7	8,4	8,5
8,7	8,6	8,5	8,4	8,4	8,5	8,5	8,4	8,5	8,4	8,6	8,4	8,5	8,4	8,5
8,8	8,6	8,6	8,4	8,5	8,6	8,6	8,4	8,5	8,4	8,6	8,5	8,4	8,5	8,6
9,1	9,0	8,9	8,7	8,8	8,9	8,9	8,8	8,9	8,7	8,9	8,8	8,7	8,8	8,9
9,8	9,7	9,6	9,4	9,5	9,5	9,5	9,4	9,5	9,3	9,5	9,4	9,3	9,3	9,5
10,9	10,7	10,6	10,4	10,5	10,5	10,5	10,4	10,5	10,4	10,5	10,5	10,3	10,4	10,5
11,8	11,6	11,5	11,4	11,6	11,5	11,5	11,4	11,4	11,4	11,5	11,4	11,4	11,4	11,6
11,8	11,6	11,5	11,4	11,6	11,5	11,5	11,4	11,4	11,4	11,5	11,4	11,4	11,4	11,6

mod16	mod17	mod18	mod19	mod20	mod21	mod22	mod23	mod24	mod25	mod26	mod27	mod28	mod29	mod30	mod31
4,8	4,7	5,0	4,6	5,3	4,5	8,0	5,2	4,7	5,1	5,0	4,8	5,0	5,0	4,5	4,9
4,8	4,7	5,0	4,6	5,3	4,5	8,0	5,2	4,7	5,1	5,0	4,8	5,0	5,0	4,5	4,9
9,3	9,3	9,5	8,9	9,6	8,9	10,5	9,4	9,2	9,7	9,4	9,1	9,2	9,4	8,7	9,3
8,6	8,6	8,7	8,3	8,7	8,3	9,0	8,4	8,4	8,8	8,6	8,4	8,4	8,6	8,2	8,5
8,6	8,5	8,6	8,4	8,5	8,4	8,7	8,3	8,5	8,8	8,6	8,4	8,4	8,5	8,3	8,5
8,6	8,6	8,6	8,5	8,5	8,5	8,6	8,4	8,5	8,8	8,6	8,5	8,4	8,5	8,4	8,6
9,0	9,0	9,0	8,9	8,9	8,9	8,9	8,7	8,9	9,1	9,0	8,8	8,8	8,8	8,8	8,9
9,7	9,7	9,6	9,6	9,5	9,5	9,5	9,3	9,5	9,7	9,6	9,4	9,4	9,4	9,4	9,5
10,8	10,7	10,6	10,6	10,5	10,5	10,5	10,4	10,5	10,7	10,6	10,4	10,4	10,4	10,4	10,5
11,6	11,5	11,4	11,4	11,5	11,4	11,4	11,4	11,4	11,6	11,5	11,4	11,4	11,3	11,3	11,4
11,6	11,5	11,4	11,4	11,5	11,4	11,4	11,4	11,4	11,6	11,5	11,4	11,4	11,3	11,3	11,4

**R2\_45 A [mOhm]**

mod1	mod2	mod3	mod4	mod5	mod6	mod7	mod8	mod9	mod10	mod11	mod12	mod13	mod14	mod15
2,6	2,7	2,5	3,1	2,6	2,6	2,5	2,4	2,6	2,4	2,6	2,5	3,9	2,6	2,7
2,6	2,7	2,5	3,1	2,6	2,6	2,5	2,4	2,6	2,4	2,6	2,5	3,9	2,6	2,7
3,1	3,1	3,1	3,5	3,2	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	3,2	3,2	3,6	3,2	3,3
3,0	3,0	2,9	3,1	2,9	2,8	2,8	2,8	2,9	2,8	2,9	2,9	3,1	2,9	3,0
2,7	2,7	2,7	2,7	2,6	2,6	2,6	2,5	2,6	2,5	2,6	2,6	2,7	2,6	2,7
2,9	2,9	2,9	2,8	2,8	2,8	2,8	2,7	2,8	2,7	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
3,1	3,1	3,1	3,0	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	3,0
3,4	3,4	3,3	3,2	3,2	3,2	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	3,1	3,2
3,2	3,1	3,1	3,0	3,0	2,9	2,9	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9
2,7	2,7	2,7	2,6	2,6	2,5	2,5	2,4	2,5	2,5	2,5	2,4	2,5	2,5	2,5
1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0

mod16	mod17	mod18	mod19	mod20	mod21	mod22	mod23	mod24	mod25	mod26	mod27	mod28	mod29	mod30	mod31
2,5	2,6	2,6	2,4	2,9	2,3	3,5	2,8	2,5	2,7	2,7	2,5	2,6	2,6	2,3	2,5
2,5	2,6	2,6	2,4	2,9	2,3	3,5	2,8	2,5	2,7	2,7	2,5	2,6	2,6	2,3	2,5
3,1	3,2	3,2	3,1	3,3	2,9	3,4	3,3	3,1	3,2	3,3	3,2	3,3	3,2	3,0	3,2
3,0	3,0	3,0	2,9	2,9	2,8	3,0	3,0	2,8	2,9	3,0	2,8	3,0	2,9	2,8	2,9
2,7	2,7	2,7	2,6	2,7	2,6	2,7	2,7	2,6	2,7	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
3,3	3,3	3,2	3,2	3,2	3,2	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,1	3,0	3,1	3,1	3,1
3,1	3,0	3,0	2,9	2,9	3,0	2,9	2,9	2,8	2,9	2,9	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
2,6	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,4	2,5	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9