

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento Energia DENERG “Galileo Ferraris”

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare**

Tesi di Laurea Magistrale

**Design e simulazione di sistema autonomo fotovoltaico/fuel cell
integrato da batterie per progetto europeo**



Relatori

Prof. Massimo Santarelli
Prof. Paolo Marocco

Candidato

Masis Shahbazians

ANNO ACCADEMICO 2018/ 2019

Sommario

Introduzione.....	3
1° Capitolo: Descrizione delle Tecnologie	4
1.1 Pannello Fotovoltaico	4
1.1.1 Effetto Solare.....	4
1.1.2 Il campo elettrico del silicio cristallino	4
1.1.2 Efficienza della cella fotovoltaica	7
1.2 Pacco Batteria	8
1.3 Fuel Cell	12
1.3.1 Introduzione.....	12
1.3.2 Struttura della fuel cell.....	13
1.3.3 Funzionamento	15
1.4 Elettrolizzatore.....	19
2° Capitolo: Modello Ginostra	21
2.1 Dati del luogo	21
2.2 Design del sistema	24
2.3 MGE	28
2.4 Caratteristiche dei componenti del sistema	30
3° Capitolo: Risultati Simulazione	33
3.1 Condizioni iniziali	33
3.2 Variazioni SOCmax.....	35
3.3 Variazioni Volume serbatoio.....	39
3.4 Variazioni capacità batteria	43
3.5 Aumento prestazioni.....	47
4° Capitolo: Conclusioni	49
Ringraziamenti.....	50
Bibliografia.....	51

Introduzione

In seguito alla creazione del “Piano 20-20-20” e successivamente del piano climatico per il 2050, l’Unione Europea si è decisa a ridurre drasticamente i consumi da fonti fossili e a spronare il mercato dell’energia rinnovabile per salvaguardare le sorti del pianeta. Ad oggi, però, siamo ancora lontani dal raggiungere tale obiettivo, con il panorama dominato da centrale termoelettriche a metano, e ancora da centrali a carbone.

Alla base del problema si trova una non ben ampliata rete elettrica europea, e da un alto costo della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili. Inoltre aumentando la quota di energia da fonti rinnovabili, si erge il problema dell’intermittenza della produzione della stessa, causata dalla non sempre presenza della risorsa (di notte il sole non c’è e il vento non soffia in maniera costante). Per risolvere tale problema vanno studiati e implementati sistemi di stoccaggio dell’energia, tali da poter immagazzinare l’energia prodotta in eccesso in periodi di poca richiesta, per poi essere rilasciata in periodi di bassa produzione.

Seppur a livello industriale ciò comporti grossi problemi e alti costi, a livello locale risulta una forte soluzione, soprattutto per zone remote, lontane dalla rete elettrica nazionale, che fanno uso di generatori termici a combustibile fossile a basso rendimento.

Nasce dunque “Remote”, un programma europeo per lo studio e lo sviluppo di sistemi autonomi per località remote.

Sono state scelte quattro località che ricadessero in questa categoria: sono località montane o insulari che fanno uso di generatori diesel per la produzione di energia elettrica, con un costo del combustibile elevato, dovendo essere trasportato in maniera non convenzionale (elicotteri o nave). Recenti stime calcolano che vi è un enorme mercato che è un possibile candidato per sistemi autonomi, pari a 40-240 GW.

In questa tesi si tratterà la località di Ginostra, frazione del comune di Lipari, in provincia di Messina. La popolazione stabile è di 40 persone, ma d’estate Ginostra attrae turismo per la visita del vulcano dello Stromboli.

Verrà studiato e implementato un sistema autonomo di pannelli fotovoltaici collegati a batterie e a fuel cell/elettrolizzatori, cercando di dimostrare i benefici portati dallo stoccaggio dell’energia in eccesso tramite batterie o Idrogeno.

1° Capitolo: Descrizione delle tecnologie

1.1 Pannello Fotovoltaico

1.1.1 Effetto Solare

La conversione diretta dell'energia solare in energia elettrica, realizzata con la cella fotovoltaica, utilizza il fenomeno fisico dell'interazione della radiazione luminosa con gli elettroni di valenza nei materiali semiconduttori, denominato effetto fotovoltaico. Qualunque sia il materiale impiegato, il meccanismo con cui la cella trasforma la luce solare in energia elettrica è essenzialmente lo stesso.

Consideriamo per semplicità il caso di una convenzionale cella fotovoltaica di silicio cristallino.

1.1.2 Il campo elettrico del silicio cristallino

Normalmente l'atomo di silicio possiede 14 elettroni, quattro dei quali sono elettroni di valenza, che quindi possono partecipare alle interazioni con altri atomi, sia di silicio sia di altri elementi. Due atomi affiancati di un cristallo di silicio puro hanno in comune una coppia di elettroni, uno dei quali appartenente all'atomo considerato e l'altro appartenente all'atomo vicino. Esiste quindi un forte legame elettrostatico fra un elettrone e i due atomi che esso contribuisce a tenere uniti. Tale legame può essere però spezzato da una certa quantità di energia: se l'energia fornita è sufficiente, l'elettrone viene portato ad un livello energetico superiore (banda di conduzione), dove è libero di spostarsi, contribuendo così al flusso di elettricità.

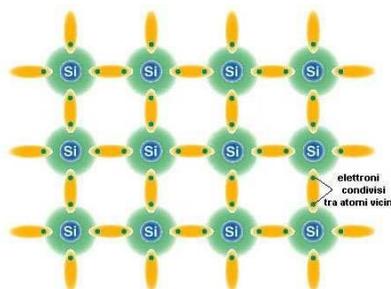


Figura 1: Reticolo cristallino del silicio [3]

Quando passa alla banda di conduzione, l'elettrone si lascia dietro una "buca", cioè una lacuna dove manca un elettrone. Un elettrone vicino può andare facilmente a riempire la buca, scambiandosi così di posto con essa.

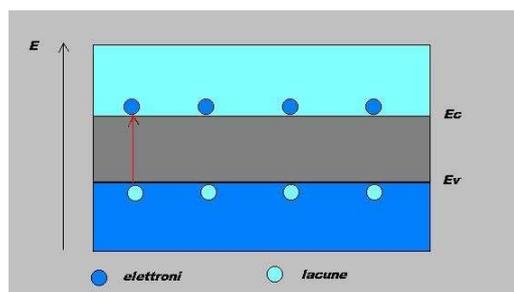


Figura 2: Rappresentazione bande di energia [3]

Per sfruttare l'elettricità è necessario creare un moto coerente di elettroni (e di buche), ovvero una corrente, mediante un campo elettrico interno alla cella.

Il campo si realizza con particolari trattamenti fisici e chimici, creando un eccesso di atomi caricati positivamente in una parte del semiconduttore, ed un eccesso di atomi caricati negativamente nell'altro. In pratica questa condizione si ottiene immettendo piccole quantità di atomi di boro (carichi positivamente) e di fosforo (carichi negativamente) nel reticolo di silicio, ovvero drogando il semiconduttore. L'attrazione elettrostatica fra le due specie atomiche crea un campo elettrico fisso che dà alla cella la struttura detta "a diodo", in cui il passaggio della corrente, costituita da portatori di carica liberi, per esempio elettroni, è ostacolato in una direzione e facilitato in quella opposta.

La spiegazione di tale fenomeno si può esemplificare come segue.

Nello strato drogato con fosforo, che ha cinque elettroni esterni o di valenza contro i quattro del silicio, è presente una carica negativa debolmente legata, composta da un elettrone, detto "di valenza", per ogni atomo di fosforo.

Analogamente, nello strato drogato con boro, che ha tre elettroni esterni, si determina una carica positiva in eccesso, composta dalle lacune presenti negli atomi di boro quando si legano al silicio. Il primo strato, a carica negativa, si indica con N, l'altro, a carica positiva, con P, la zona di separazione è detta giunzione P-N.

Affacciando i due strati si attiva un flusso elettronico dalla zona N alla zona P che, raggiunto il punto di equilibrio elettrostatico, determina un eccesso di carica positiva nella zona N, dovuto agli atomi di fosforo con un elettrone in meno, e un eccesso di carica negativa nella zona P, dovuto agli elettroni migrati dalla zona N.

Il risultato è un campo elettrico interno al dispositivo che separa gli elettroni in eccesso generati dall'assorbimento della luce dalle rispettive buche, spingendoli in direzioni opposte (gli elettroni verso la zona N e le buche verso la zona P) in modo che un circuito esterno possa raccogliere la corrente così generata.

E' importante che il campo "incorporato" sia ubicato il più vicino possibile alla regione del dispositivo che assorbe la luce.

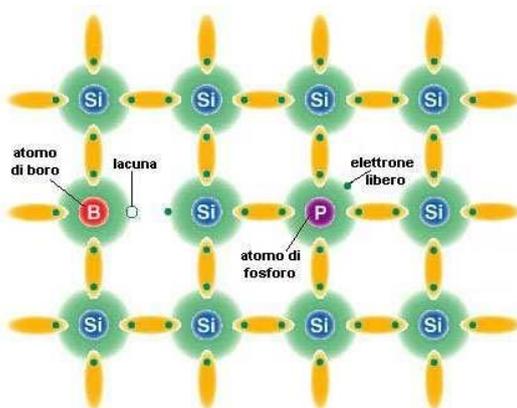


Figura 3: Struttura cristallina del silicio drogato con atomi di Boro e Fosforo [3]

I fotoni della luce che dispongono di sufficiente energia possono strappare un elettrone da uno stato legato ed elevarlo ad uno stato libero nella banda di conduzione del materiale. Si ha così la produzione di due portatori di carica liberi: l'elettrone libero, nella banda di conduzione, e la buca libera, nella banda di valenza.

Se si connette la giunzione P-N con un conduttore, nel circuito esterno si otterrà un flusso di elettroni che parte dallo strato n, a potenziale maggiore, verso lo strato p, a potenziale minore. Fino a quando la cella resta esposta alla luce, l'ellettricità fluisce con regolarità sotto forma di corrente continua. E' importante che lo strato esposto alla luce, generalmente lo strato N, sia tale da garantire il massimo assorbimento di fotoni incidenti in vicinanza della giunzione.

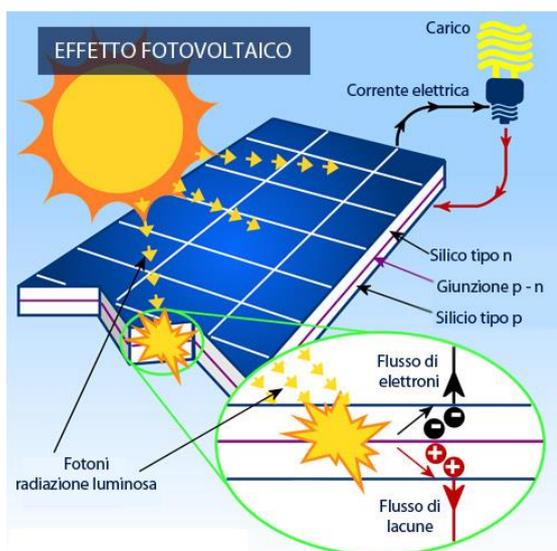


Figura 4: pannello fotovoltaico, funzionamento [3]

1.1.2 Efficienza della cella fotovoltaica

Di tutta l'energia che investe la cella solare sotto forma di radiazione luminosa, solo una parte viene convertita in energia elettrica disponibile ai morsetti. L'efficienza di conversione per celle al Silicio monocristallino è in genere inferiore al 20%, anche se ultimamente si stanno affacciando sul mercato nuove celle che superano tale soglia, mentre in laboratorio si riesce tranquillamente a ottenere valori intorno al 32.5%.

I motivi di tale bassa efficienza sono molteplici e possono essere raggruppati in quattro categorie:

- riflessione: non tutti i fotoni che incidono sulla cella penetrano al suo interno, dato che in parte vengono riflessi dalla superficie della cella e in parte incidono sulla griglia metallica dei contatti;
- fotoni troppo o poco energetici: per rompere il legame tra elettrone e nucleo è necessaria una certa energia, e non tutti i fotoni incidenti possiedono energia sufficiente. D'altra parte alcuni fotoni troppo energetici generano coppie elettrone-lacuna, dissipando in calore l'energia eccedente quella necessaria a staccare l'elettrone dal nucleo.
- ricombinazione: non tutte le coppie elettrone-lacuna generate vengono raccolte dal campo elettrico di giunzione e inviate al carico esterno, dato che nel percorso dal punto di generazione verso la giunzione possono incontrare cariche di segno opposto e quindi ricombinarsi;
- resistenze parassite: le cariche generate e raccolte nella zona di svuotamento devono essere inviate all'esterno. L'operazione di raccolta viene effettuata dai contatti metallici, posti sul fronte e sul retro della cella. Anche se durante la fabbricazione viene effettuato un processo di lega tra silicio e alluminio dei contatti, resta una certa resistenza all'interfaccia, che provoca una dissipazione che riduce la potenza trasferita al carico. Nel caso di celle al silicio policristallino, l'efficienza è ulteriormente diminuita a causa della resistenza che gli elettroni incontrano ai confini tra un grano e l'altro e, ancor più nel caso di celle al silicio amorfo, per la resistenza dovuta all'orientamento casuale dei singoli atomi.

1.2 Pacco Batteria

Gli accumulatori al Litio sono tutt'ora i più impiegati nell'elettronica di consumo e rappresentano quindi la tipologia di batteria commerciale più diffusa in assoluto sul mercato. Il motivo per cui queste batterie trovano un così largo impiego è il materiale con il quale esse sono realizzate, il Litio infatti è il più leggero dei metalli e proprio questa sua caratteristica rappresenta uno dei punti di forza di queste batterie poiché il loro peso è molto contenuto.

In maniera del tutto simile all'architettura delle tradizionali batterie, gli accumulatori al litio presentano un catodo (polo positivo) e un anodo (polo negativo). Il catodo è formato da un ossido metallico, in questo caso ossido di Litio metallico, l'anodo invece è formato da carbonio poroso.

Nel processo di scarica si instaura un flusso di ioni dall'anodo al catodo attraverso una soluzione elettrolitica. Generalmente negli accumulatori al Litio l'elettrolita è formato da un sale di Litio disciolto in una sostanza organica, tipo l'etere, e si presenta sotto forma di un liquido. I sali di Litio possono essere l'esafluoruro di fosforo (LiPF_6), il tetrafluoroborato (LiBF_4) o il perclorato di Litio (LiClO_4).

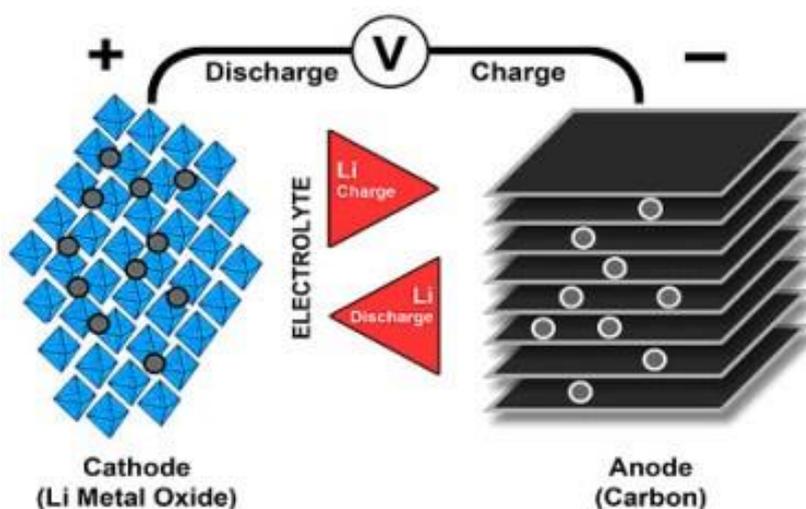


Figura 5: Flusso ionico in batteria Li-ion [1]

Attualmente sul mercato sono presenti varie tipologie di accumulatori al Litio. Ognuno di essi presenta gli stessi principi di funzionamento, ma differisce nel materiale con cui il catodo è realizzato. I materiali più comuni sono: ossido di litio cobaltato (LiCoO_2), diossido manganese del litio (LiMnO_2), fosfato ferroso di litio (LiFePO_4), litio nichel manganese diossido di cobalto

(LiNiMnCoO_2) e litio nichel cobalto diossido di alluminio (LiNiCoAlO_2). Ognuno di questi materiali rende gli accumulatori al Litio unici per quanto concerne la loro densità energetica e i loro cicli di carica e scarica. Sebbene esistano molte tipologie di batterie Li-ion, ognuna di esse presenta una caratteristica comune, ogni cella di cui sono composte ha una tensione nominale standard di 3,6 V.

La prima batteria Li-ion commercializzata utilizzava un residuo di carbone, il Coke, come anodo; attualmente si utilizza invece la *grafite* poiché permette di ottenere una curva di scarica più piatta (*Figura 6 [1]*).

E' preferibile, infatti, commercializzare una batteria con una curva di scarica più piatta possibile poiché se così non fosse, installata in un veicolo elettrico potrebbe causare una perdita di potenza dopo un certo periodo di funzionamento; oppure se la batteria fosse installata su di un dispositivo elettronico, potrebbe verificarsi un malfunzionamento causato da una graduale riduzione della tensione di alimentazione.

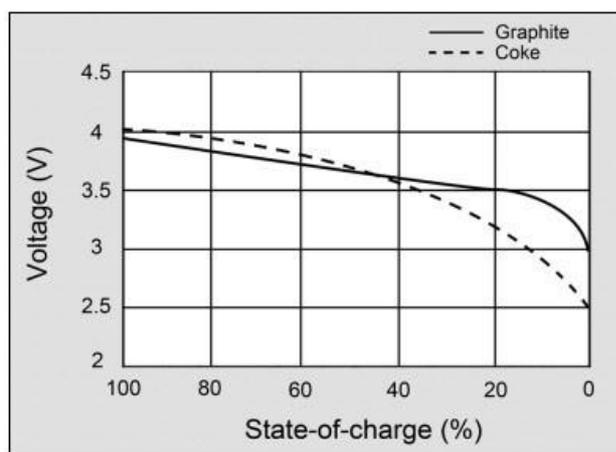


Figura 6: Curva di scarica di un accumulatore Li-ion [1]

Per quanto riguarda la carica di una cella di una batteria agli ioni di Litio, essa avviene generalmente a 4.20 V costanti, con una tolleranza molto limitata di 50 mV/cella.

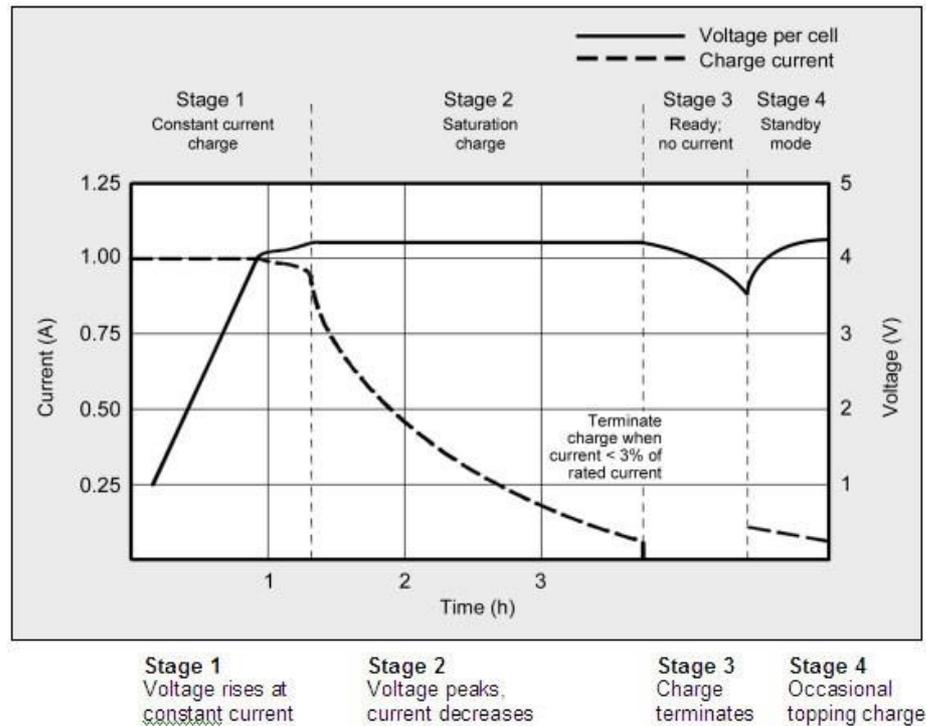


Figura 7: Fase di carica di una batteria Li-ion [1]

Dalla *Figura 7* [1] si nota come inizialmente la carica avviene a corrente costante (normalmente 1 A) fino a quando la cella raggiunge una tensione di 4.2 V. Una tensione maggiore potrebbe tuttavia essere impiegata per incrementare la capacità della cella ma si ridurrebbe sensibilmente la vita della batteria, poiché per tensioni maggiori intervengono dei fenomeni di ossidazione interni alla cella stessa. Da questo punto in poi, in cui la tensione rimane costante, la corrente inizia a decrescere fino al raggiungimento del 3% del suo valore iniziale. Alla fine di questa seconda fase, chiamata fase di carica di saturazione, la carica della cella può dirsi conclusa. Si termina quindi la fase di carica, e la si riprende (fase 4) solamente quando la tensione della cella, per il fenomeno dell'auto scarica, scende sotto un determinato valore limite di tensione.

E' interessante soffermarsi sul tempo di carica riportato nel grafico, da esso infatti si deduce che la carica di una cella è molto lenta, dell'ordine di qualche ora. Esistono tuttavia degli accorgimenti per rendere la carica più veloce, pensiamo ad esempio al tempo di carica di una batteria Li-ion di uno smartphone la quale impiega, in media, meno di un'ora per caricarsi. E' possibile infatti caricare la cella di una batteria Li-ion, fermando la sua carica al termine della fase 1 a corrente costante a discapito di una State of Charge (SoC) variabile attorno all'85% . In *Figura 8* [1] sono riportati dei valori caratteristici di carica di una batteria Li-ion standard. Si può notare come il valore della capacità e del tempo di carica dipenda direttamente dalla

tensione di carica della cella, in presenza o meno della fase di saturazione di carica (fase 2).

Charge V/cell	Capacity at cut-off voltage	Charge time	Capacity with full saturation
3.80	60%	120 min	65%
3.90	70%	135 min	76%
4.00	75%	150 min	82%
4.10	80%	165 min	87%
4.20	85%	180 min	100%

Figura 8: Caratteristiche tipiche di una batteria Li-ion [1]

Se si elimina la fase 2 dal processo di carica di una Li-ion, si ottiene una batteria con una capacità minore, un tempo di carica ridotto e anche dei benefici per quanto riguarda la durata di vita della batteria. Le celle Li-ion, infatti, non necessitano di una carica completa, al contrario ad esempio delle batterie al piombo, poiché elevate tensioni per periodi di tempo prolungati causano continui stress alla batteria che col tempo si degrada. Si deve quindi, come si nota osservando la *Figura 9* [1], cercare un compromesso tra la durata di vita e la capacità massima della batteria in ogni applicazione che richieda un tempo di carica ridotto.

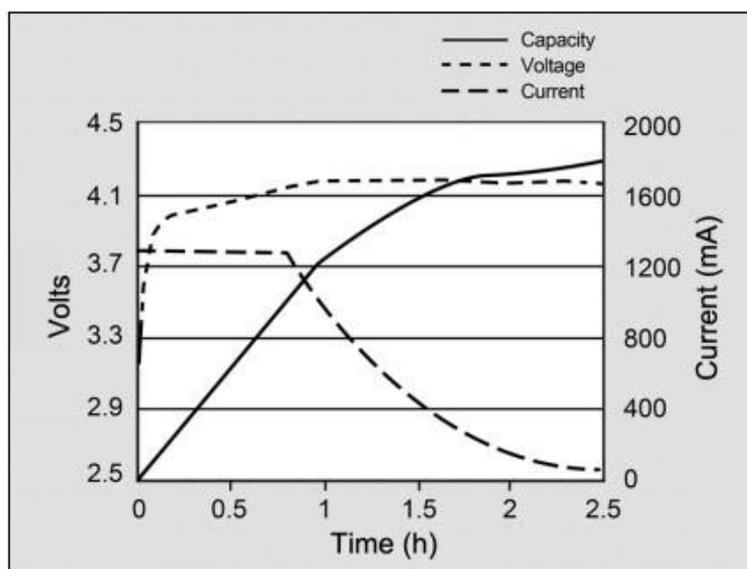


Figura 9: Capacità in funzione della tensione di carica [1]

1.3 Fuel cell

1.3.1 introduzione



Figura 10: Fuel cell da 25 Kw della Redox Power System

Una pila a combustibile (detta anche cella a combustibile dal nome inglese fuel cell) è un dispositivo elettrochimico che permette di ottenere elettricità direttamente da certe sostanze, tipicamente da idrogeno ed ossigeno, senza che avvenga alcun

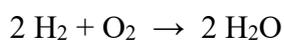
processo di combustione termica e con rendimenti di conversione molto più alti rispetto a quelli ottenibili con i tradizionali motori termici. Le pile a combustibile producono corrente continua come le normali batterie, e le reazioni seguono in entrambi i casi le leggi dell'elettrochimica. La differenza essenziale è dove l'energia viene immagazzinata. In una batteria, l'energia è immagazzinata nella batteria stessa. In una pila a combustibile, l'energia è immagazzinata al di fuori della pila, in un serbatoio di idrogeno. La pila è solo un convertitore e non contiene di per sé alcuna energia. Non ha quindi senso parlare di "stato di carica" di una pila a combustibile, che può funzionare indefinitamente (o almeno finché non si usura) fintanto che viene fornito nuovo combustibile.

Esistono 6 principali tipi di famiglie di fuel cells, classificate in base al tipo di elettrolita utilizzato. La scelta di impiegare un tipo di fuel cells piuttosto che un'altra dipende strettamente dal tipo di applicazione specifica e dalle condizioni operative previste. Nel caso di Ginostra si è scelto di utilizzare una PEM-FC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). Essa opera a temperature abbastanza basse (70-85°C) e può avviarsi e raggiungere metà della potenza

nominale quasi immediatamente. La piena potenza di erogazione viene raggiunta in circa 3 minuti (in ogni caso molto lentamente in confronto alla erogazione istantanea delle batterie tradizionali, o dei motori a combustione).

Il rendimento si aggira sui valori compresi tra il 45% e il 50%, facilmente migliorabile attuando modifiche sul sistema ausiliare di funzionamento.

Il principio di funzionamento si basa sul fatto che la combustione è un processo di ossido-riduzione. La cella a combustibile produce elettricità grazie alla reazione elettrochimica dell'idrogeno (combustibile) con l'ossigeno (comburente) per formare acqua:



1.3.2 Struttura della fuel cell

Una fuel cell è generalmente caratterizzata da una struttura a strati, detta anche wafer, che prevede due superfici piane (la prima composta dalla compattazione degli strati catalizzatore-anodo, la seconda da quella catalizzatore-catodo) fabbricate con materiali conduttori a struttura porosa separati da una lamina di materiale che può presentarsi allo stato liquido (acido) o allo stato solido. Nelle applicazioni automobilistiche si tratta principalmente di una membrana di materiale polimerico. Tale materiale deve possedere la proprietà di essere facilmente attraversabile da alcuni tipi di ioni e impermeabile alle cariche elettroniche; caratteristica indispensabile per il funzionamento di un fuel cells. Le PEM-FC usano un elettrolita polimerico allo stato solido. Il tipo di materiale più utilizzato è il Nafion, un polimero brevettato dalla Dupont de Nemours, abbastanza simile al Teflon, che alla vista sembra un semplice foglio di plastica semitrasparente. Il Nafion è un materiale semipermeabile che consente il passaggio degli ioni positivi e blocca quello degli elettroni, garantendo l'isolamento elettrico. Tale membrana deve essere costantemente idratata per garantire una buona conducibilità agli ioni, stando attenti che un eccesso

d'acqua, tuttavia, potrebbe risultare dannoso. A tale scopo si usa umidificare i gas di ingresso mediante un sistema ausiliario che assicura alla membrana il giusto livello di idratazione.

Presso l'anodo vengono prodotti elettroni per ossidazione dell'idrogeno, come vedremo in dettaglio più avanti. Gli elettroni prodotti vanno poi a reagire nell'altro elettrodo (catodo) con l'ossigeno fornito dal sistema e gli ioni di idrogeno che attraversano la membrana.

Il catalizzatore è un componente fondamentale, poiché provvede ad innescare la reazione ad una velocità adeguata nelle celle che, lavorando a temperature relativamente basse (60-100 °C), non possiedono abbastanza energia per farlo. Solitamente è un componente molto costoso, essendo realizzato in Platino, Rutenio e Palladio.

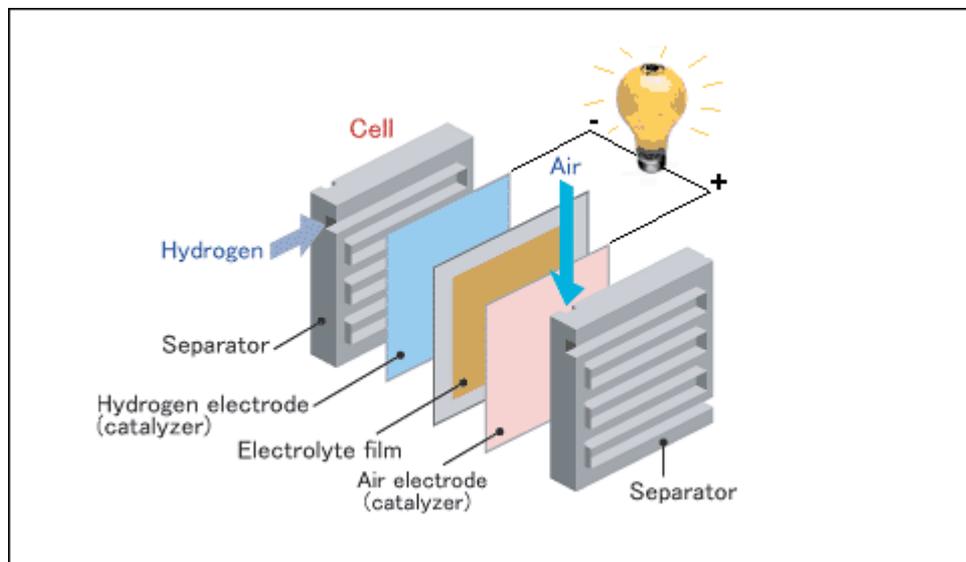


Figura 11: Struttura interna di una fuel cell [2]

1.3.3 Funzionamento

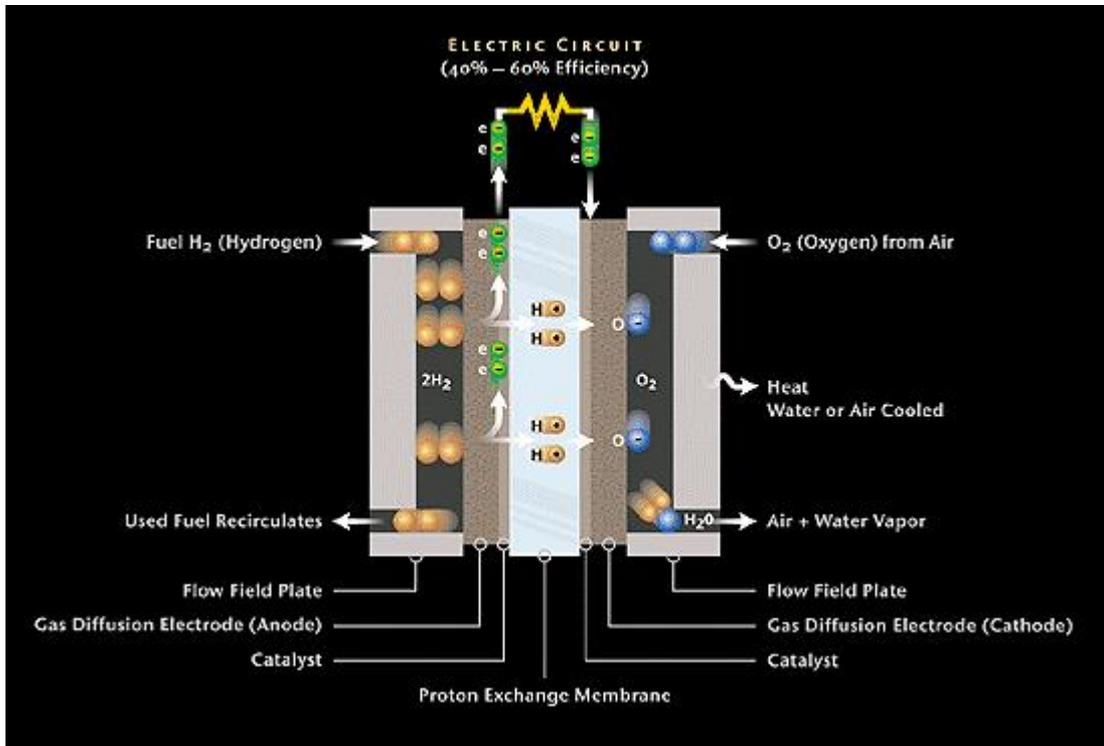


Figura 12: Schema del processo di produzione di energia elettrica [2]

Il principio alla base delle pile a combustibile è quello della generazione diretta, a partire dalle sostanze reagenti di energia elettrica per mezzo di una reazione elettrochimica, in modo analogo alle batterie, anziché attraverso processi di conversione di energia, come si fa invece nei generatori elettrici azionati da macchine a combustione termica.

La reazione elettrochimica si basa sull'idea di spezzare le molecole del combustibile o del comburente (ossigeno atmosferico) in ioni positivi ed elettroni; questi ultimi, passando da un circuito esterno, forniscono una corrente elettrica proporzionale alla velocità della reazione chimica, utilizzabile per qualsiasi scopo.

La scelta dei combustibili è molto limitata: ionizzare molte molecole è difficile,

e la reazione risulta spesso bisognosa di una grande energia di attivazione, rendendo il processo lento e praticamente inutilizzabile. L'idrogeno è un gas in grado di essere ionizzato facilmente, perché la sua molecola è costituita da due atomi legati da un legame relativamente debole (H-H). Il comburente usato è l'ossigeno dell'aria: non solo reagisce con l'idrogeno dando un prodotto innocuo come l'acqua, ma è anche disponibile in abbondanza e gratuitamente dall'atmosfera. Tuttavia, il doppio legame (O=O) tra gli atomi nella molecola di ossigeno è più forte che nel caso della molecola di idrogeno, e rappresenta spesso un ostacolo maggiore nella catalisi delle reazioni elettrochimiche; si parla in gergo tecnico di sovratensione catodica, visto che l'ossigeno viene consumato al catodo della cella, e che una parte della tensione generata dalla cella viene assorbita per promuovere la reazione dell'ossigeno.

Il principio generale della catalisi consiste nella variazione del meccanismo di reazione, e quindi dei vari "salti" (corrispondenti al valore dell'energia di attivazione) che i reagenti devono compiere per arrivare ai prodotti. L'effetto della catalisi è di natura cinetica, e non termodinamica: l'azione del catalizzatore infatti modifica gli stadi intermedi di una reazione, ma non ne modifica gli stati finali. Questo significa che la catalisi non influisce sulla possibilità o meno che una reazione ha di svolgersi.

Nella maggioranza dei casi sfruttati nella pratica, la catalisi conduce a percorsi di reazione caratterizzati da una minore energia di attivazione totale, con un conseguente aumento della velocità di reazione;

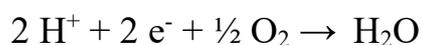
ci sono anche casi in cui l'intervento di un catalizzatore implica meccanismi che abbassano la velocità: si parla in questo caso di catalisi negativa o inibizione (e il catalizzatore viene più propriamente chiamato inibitore della reazione).

Il flusso di gas (H_2) attraversa l'anodo fluendo nelle sue porosità, dove avviene la reazione di ossidazione, sotto l'influenza delle condizioni presenti (temperatura, pressione, concentrazione dell'elettrolita). La molecola di idrogeno (H_2) viene scomposta negli ioni H^+ e nell'equivalente numero di elettroni che vengono rilasciati sulla superficie dell'elettrodo, secondo la reazione:



Il catalizzatore facilita e aumenta la velocità della reazione, migliorando il rendimento del sistema. Il suo impiego evita anche la formazione di residui che potrebbero danneggiare gli elettrodi, quando l'idrogeno non è perfettamente puro. Si genera così un flusso di elettroni attraverso il filo conduttore che collega gli elettrodi che instaura una corrente elettrica e un flusso di ioni H^+ attraverso l'elettrolita, e diretto verso il catodo.

La seconda reazione, quella di riduzione, avviene al catodo. Gli elettroni si combinano con gli ioni H^+ e l'ossigeno (O_2) fornito dall'esterno, generando acqua:



Si ottiene così una tensione ai capi della cella pari al valore della differenza tra il potenziale elettrico anodico e quello catodico. Tale valore è solo teorico, poiché è influenzato anche da fattori che interessano la struttura degli elettrodi e le proprietà dei materiali che vengono usati nelle celle.

Nel complesso, l'energia potenziale contenuta nell'idrogeno, grazie alla conversione elettrochimica appena descritta, viene trasformata direttamente in elettricità pur con piccole dispersioni energetiche, in parte sotto forma di calore in parte come dissipazioni elettriche.

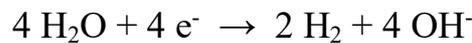
Allo scopo di raffreddare il sistema si utilizza una parte dell'acqua ottenuta dalla reazione, eliminandola poi attraverso lo scarico sotto forma d'acqua; mentre una parte più cospicua viene utilizzata per mantenere la membrana umida, condizione necessaria per un buon funzionamento.

Il sistema eroga energia elettrica fino a che si dispone di idrogeno nel serbatoio, poi cessa di funzionare. Se la potenza richiesta dall'utilizzatore è elevata i flussi attraverso l'elettrolita sono maggiori e le reazioni si mantengono attive; se invece la corrente richiesta è nulla, il flusso elettrolitico è nullo e le reazioni non avvengono, con notevole risparmio di combustibile. Inoltre, è possibile ottenere un'efficienza quasi costante nel tempo parzializzando la potenza richiesta.

1.4 Elettrolizzatore

L'idrogeno può essere prodotto facendo il processo inverso che avviene dentro la fuel cell: alimentando a corrente elettrica una cella elettrolitica, se riesce a separare da una molecola di acqua le sue componenti basi, Idrogeno e Ossigeno, da poter poi immagazzinare per un successivo utilizzo nella Fuel Cell.

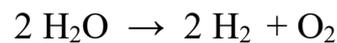
La cella elettrolitica è in genere composta da due elettrodi di un metallo inerte, (ad esempio platino) immersi in una soluzione elettrolitica (soluzione alcalina con idrossido di potassio) e connessi ad una sorgente di corrente (ad esempio una batteria). Anodo e catodo sono separati da una membrana microporosa permeabile solo agli ioni. La corrente elettrica dissocia la molecola d'acqua negli ioni OH^- e H_3O^+ (e da una bassissima percentuale di protoni liberi H^+ , i quali tendono a reagire con le molecole di acqua per dare ioni H_3O^+). Al catodo gli ioni di idrogeno (H_3O^+) acquistano elettroni in una reazione di riduzione che porta alla formazione di idrogeno gassoso:



All'anodo, gli ioni idrossido (OH^-) subiscono ossidazione, cedendo elettroni:



Dalla somma delle due semireazioni precedenti si ottiene la seguente reazione completa:



Tale processo richiede acqua costantemente reintegrata ed elettricità, fornendo in uscita ossigeno e idrogeno puro al 99,95% e ad una pressione di 6 bar. L'idrogeno, così ottenuto, non necessita di ulteriori e costosi processi di purificazione e può essere usato subito per l'uso nelle fuel cell, soprattutto per quelle di uso automobilistico.

Per ottenere un “impatto zero” sull’ambiente è necessario che l’energia elettrica utilizzata sia ricavata da fonti rinnovabili, attraverso impianti fotovoltaici, eolici o idroelettrici. Non è ancora un processo economicamente conveniente (attualmente solo il 5% della produzione mondiale adotta questa tecnologia) a causa del massiccio consumo di energia elettrica, che incide sui costi di produzione per l’80%, ma con la diffusione della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili diventerà uno strumento necessario per l’immagazzinamento dell’energia.

2° Capitolo: Modello Ginostra

2.1 Dati del luogo

Ginostra è un paese di poco più di 40 abitanti stabili sull'isola di Stromboli, in provincia di Messina.

Non è collegata alla rete nazionale, dunque fa utilizzo di tre motori diesel da 40 kW e uno da 160 kW per la produzione di energia elettrica (d'estate il paese è animato da un discreto turismo, quindi aumenterà la richiesta di energia elettrica).

L'isola di Stromboli è caratterizzata da una buona esposizione solare, come mostrato in *Figura 13*:

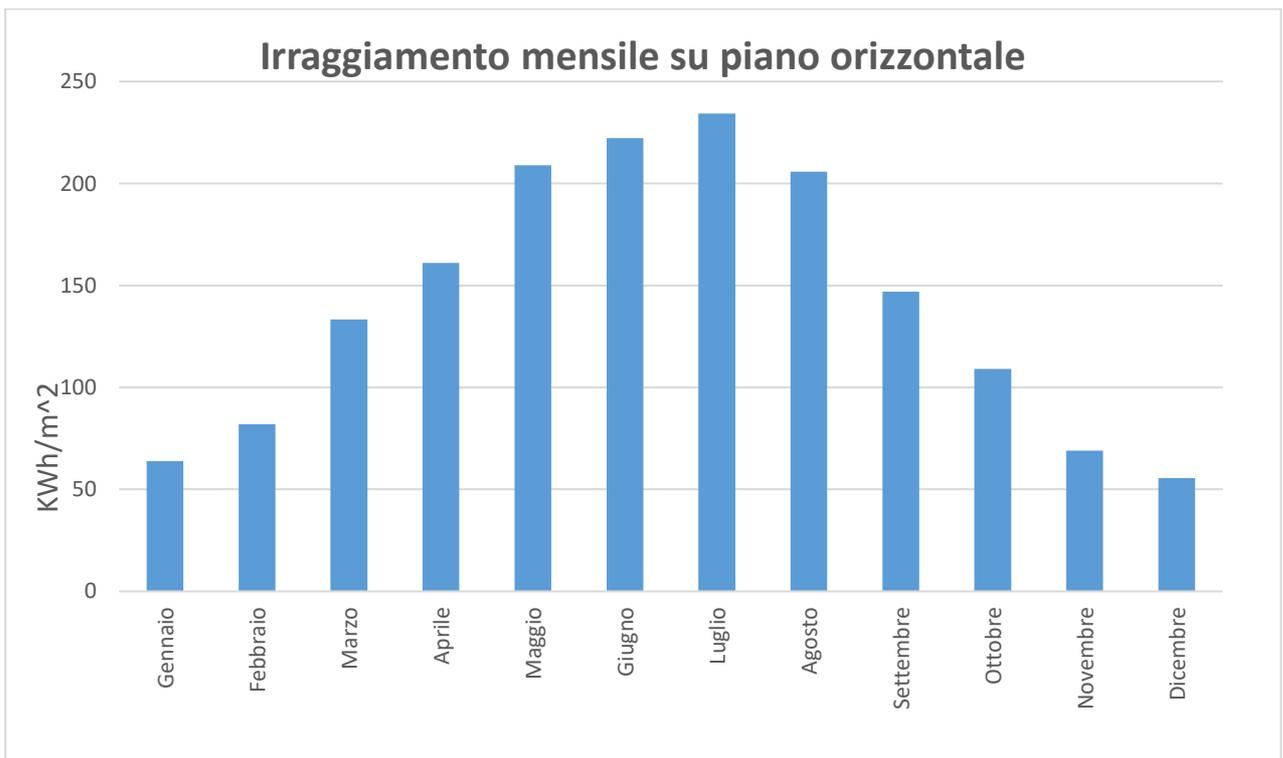


Figura 13: Irraggiamento Solare mensile

Come si può notare da *Figura 14*, il consumo mensile segue l'andamento dell'irraggiamento solare mensile, per cui in primo luogo possiamo dire che

risulterà facile coprire parte della domanda energetica tramite fotovoltaico.
Il fabbisogno energetico annuale del villaggio risulta essere 171.56 MWh.

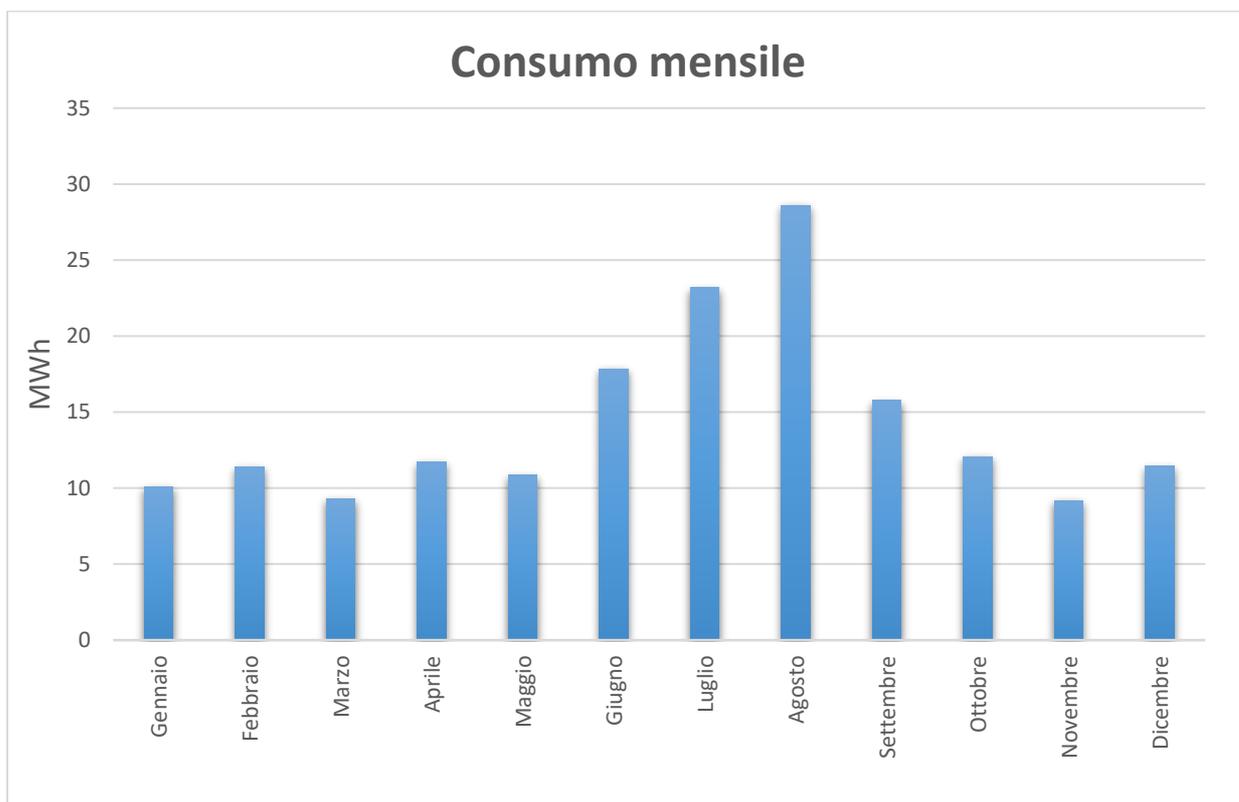


Figura 14: Consumo mensile in MWh

Fortunatamente Ginostra risulta avere un clima molto temperato, che gli assicura una bassa differenza di temperatura tra estate e inverno (*Figura 15*). Di giorno durante l'estate la temperatura massima non supera mai i 30 °C se non per pochi giorni del mese di luglio, assicurando poca perdita di potenza generata dai pannelli fotovoltaici, come vedremo in seguito.

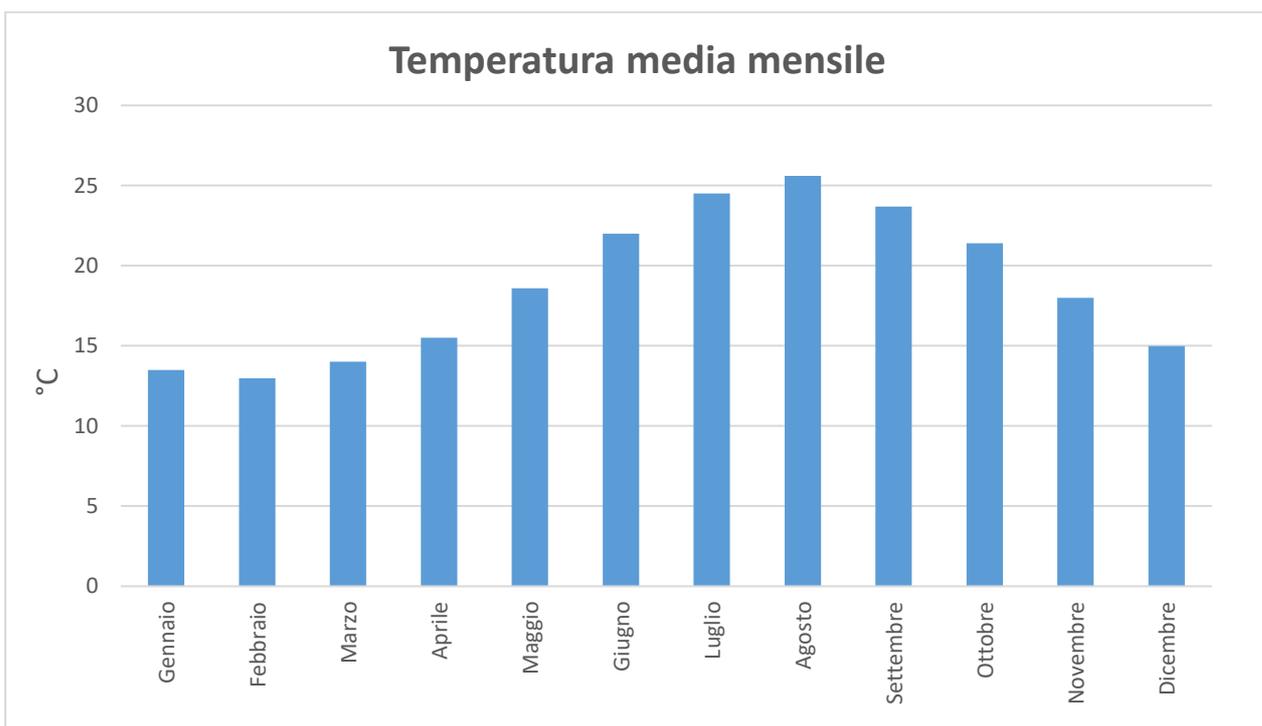


Figura 15: Temperatura media mensile

2.2 Design del sistema

L'obiettivo principale del sistema sarà quello di soddisfare la domanda energetica di Ginostra attraverso un alto utilizzo della radiazione solare. La maggior parte dell'energia elettrica prodotta da fotovoltaico (170 kW) durante la giornata soddisferà adeguatamente la domanda, e l'energia in eccesso potrà essere immagazzinata nella batteria o tramite elettrolisi dell'acqua per ottenere idrogeno. Il sistema risulterebbe particolarmente semplice se la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile fosse costante durante la giornata, sia di notte che di giorno; utilizzando però il fotovoltaico, abbiamo il principale problema della fluttuazione stocastica della risorsa, e ciò richiede un aumento della complessità del sistema per ovviare al problema.

Il sistema va integrato con la produzione e l'utilizzo di idrogeno tramite un elettrolizzatore e una fuel cell. Purtroppo tali macchinari non possono essere sottoposti a un numero elevato di accensioni, si degraderebbero molto velocemente le loro prestazioni, aumentando il costo della manutenzione e della sostituzione di componenti. Si aggiunge quindi al sistema una batteria a Li-ion, che risulta essere un componente vitale per assorbire le variazioni a breve termine date dalla produzione da fotovoltaico. D'altro canto anche la batteria risente dei continui utilizzi, soprattutto se causano scariche profonde.

Si crea quindi un modello di gestione energetica (MGE) che avrà il compito di soddisfare la domanda energetica pur mantenendo i costi operazionali bassi.

In *Figura 16* si può notare come per quasi tutto l'anno si ha un surplus di offerta da fonte rinnovabile (d'ora in poi chiamata RES, Renewable Energy System), tranne che per il mese di Dicembre, mese critico per il nostro sistema, come comunque sarà tutta la stagione invernale. Annualmente si ha una richiesta di 171.56 MWh e una produzione da RES di 269.3 MWh (più avanti si vedrà come invece sia maggiore).

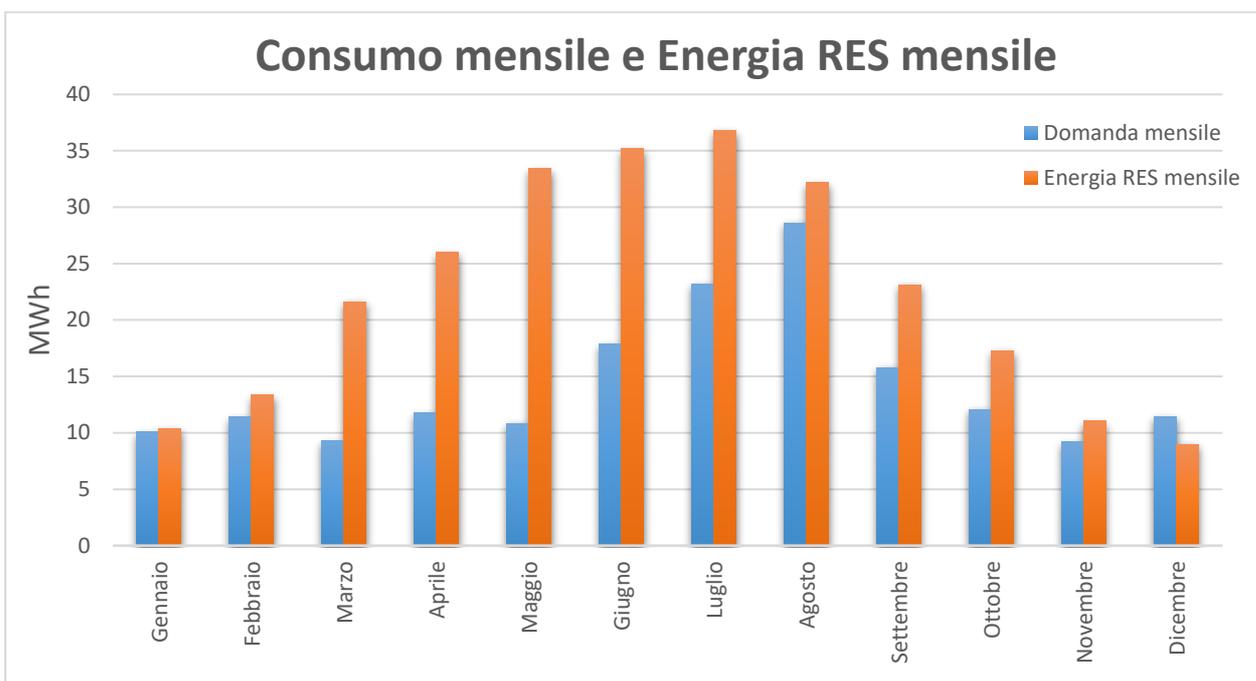


Figura 16: confronto tra domanda e offerta mensile

Figura 16 non ci permette però di apprezzare la reale situazione giornaliera di variazione del sistema. In *Figura 17* e *Figura 18* possiamo vedere meglio la situazione invernale e autunnale. La situazione invernale è caratterizzata da una bassa produzione da RES, spesso incapace di soddisfare a piena la domanda,

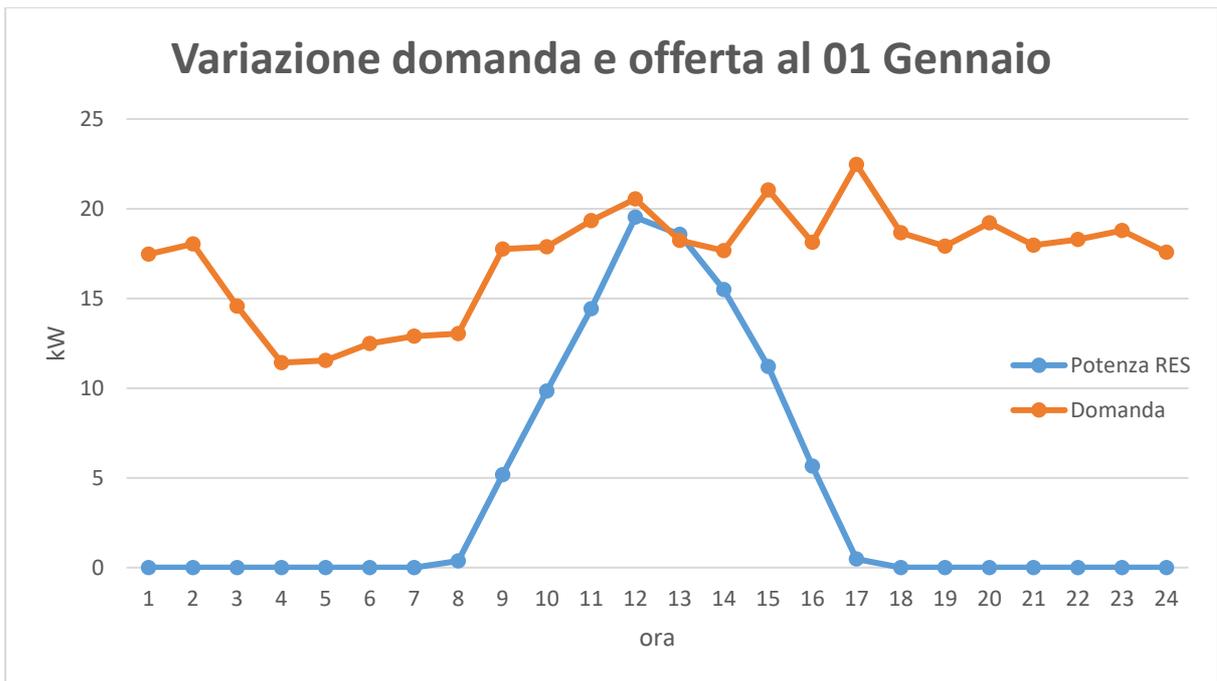


Figura 17: Variazione domanda e offerta al 01 Gennaio

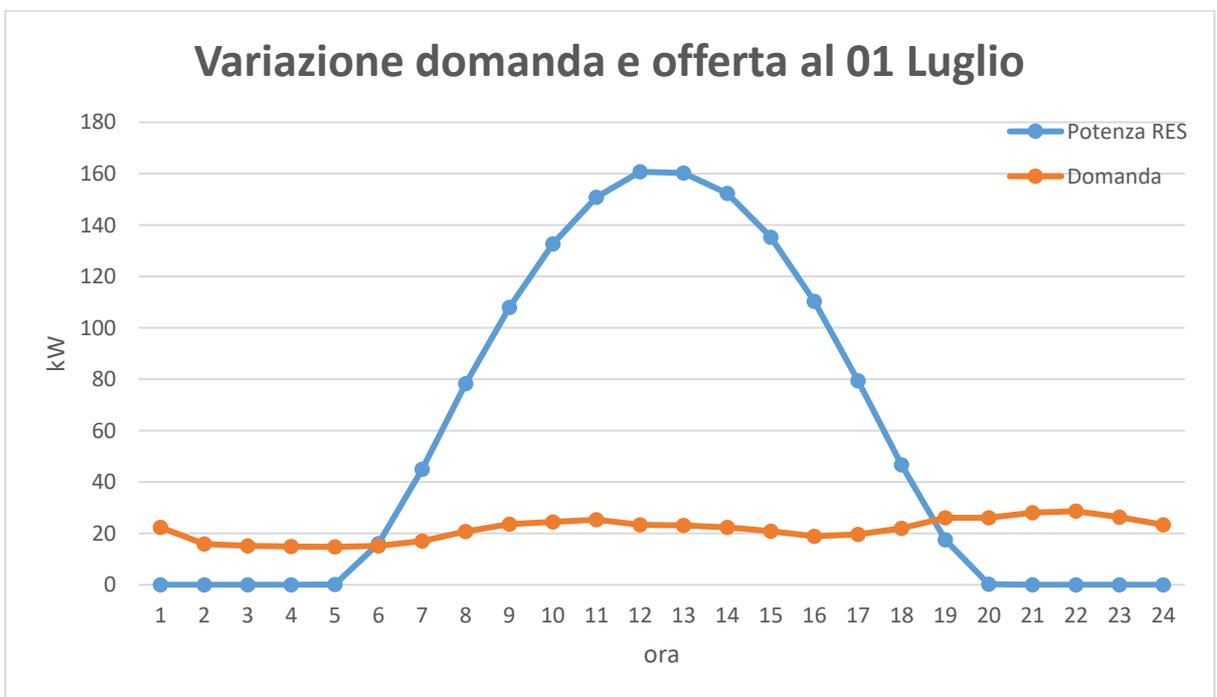


Figura 18: Variazione giornaliera domanda e offerta al 01 Agosto

mentre la situazione estiva è caratterizzata da un'elevata produzione da RES, ben oltre la domanda. Data la natura della RES, di notte non si può fornire energia elettrica con il fotovoltaico, ed è qui che entra in gioco il MGE.

Ginostra risulta essere per il 39,8% del tempo in surplus di energia, mentre per il 60,2% in deficit. Questo richiede che la batteria e la fuel cell siano in grado di operare per il lungo periodo di deficit. Il parametro che governerà il MGE è lo stato di carica della batteria (SOC). La dinamica della batteria è molto più veloce di quella dell'elettrolizzatore e della fuel cell, per cui è capace di rispondere efficacemente alle variazioni stocastiche della produzione da RES. Nonostante ciò, è vitale non superare i limiti massimi e minimi di SOC della batteria, onde evitare un degrado della stessa [1].

la batteria o se, avendo già la $SOC > SOC_{max}$, si può produrre idrogeno da stoccare. Nel caso il serbatoio di idrogeno fosse pieno, si avrebbe una perdita calcolata come $P_{surplus}$. Purtroppo l'elettrolizzatore richiede una potenza minima e massima per il funzionamento, e nel caso di avesse una Potenza inferiore alla P_{min_elec} , si dovrebbe disperdere tutta la potenza generata, così come la potenza oltre la P_{max_elec} .

Nel secondo caso, invece, si richiede di utilizzare la batteria (se la $SOC > SOC_{min}$) per sopperire alla mancanza di potenza da RES, oppure con la fuel cell. Nello sfortunato caso in cui sia batteria che il serbatoio di idrogeno fossero esauriti, si avrebbe un deficit di energia, che sarebbe coperto dai motori diesel già presenti sull'isola.

Il MGE permette comunque, tramite la variazione dei parametri del sistema, di calcolare il modello migliore per ottenere il minor deficit possibile. Questo potrebbe richiedere una batteria con più alta capacità o un serbatoio di idrogeno più capiente per poter immagazzinare più energia possibile nei momenti di scarsa richiesta.

2.4 Caratteristiche dei componenti del sistema

Come pannello fotovoltaico è stato scelto il SunPower X-Series:X22-370, un pannello dalle alte prestazioni, tra i migliori sul mercato. Il sistema consiste di 51 stringhe di pannelli, ognuna con 9 pannelli in serie, per un totale di circa 170 kW di potenza.

Potenza Nominale	rendimento	coeff. termico per la Potenza	Area
370 W	22,70%	-0.29 %/°C	1,62967 m ²

Tabella 1: dati pannello fotovoltaico

I pannelli fotovoltaici, durante il loro utilizzo, sono soggetti a una variazione di potenza emessa in funzione della temperatura ambientale. Secondo la formula

$$P_{stc} = P * (1 + \gamma * \Delta T)$$

ove P_{stc} è la Potenza emessa calcolata alle condizioni ambientali, γ è il coefficiente termico per la Potenza, e $\Delta T = T_{amb} - 25$ [°C]. All'aumentare della temperatura, si ha una perdita di potenza. Fortunatamente, come detto prima, Ginostra ha un clima temperato, per cui d'estate raramente supera i 30°C, e si ha un aumento di potenza nel periodo non estivo, che porta la produzione annuale a 290.16 MWh, un aumento del 7.8%.

Per il pacco batteria, come anche per la fuel cell e l'elettrolizzatore, si sono presi i dati appartenenti allo studio [9].

Capacità	Velocità carica/scarica	efficienza	SOCmin	SOCmax
600 [kWh]	0.5C	95%	20%	80%

Tabella 2: dati pacco batteria

Tecnologia	Potenza nominale	Efficienza	range di modulazione	massima pressione operativa
Elettrolizzatore	50 [kW]	70%	20-100	30 [bar]
Fuel cell	50 [kW]	40-45%	15-100	0.5 [bar]

Tabella 3: dati elettrolizzatore e fuel cell

Fuel cell e elettrolizzatore sono forniti come moduli da 25 kW di potenza l'una; utilizzare due moduli di questo tipo invece di un unico modulo da 50 kW permette una modulazione maggiore del sistema.

In presenza di questi moduli, nel MGE va tenuto conto di due termini

$$AUX_{fc} = 2 + 4 * \frac{P_{fc}}{P_{fc_nom}}$$

$$AUX_{el} = 2 + 4 * \frac{P_{el}}{P_{el_nom}}$$

che sono la potenza in kW per il funzionamento della fuel cell e dell'elettrolizzatore: tengono conto della potenza consumata per i sistemi di raffreddamento, di pompaggio, di sicurezza etc.

In più, bisogna tener conto di un addizionale 1 kW come potenza per il controllo del sistema stesso (serbatoio, pannelli fotovoltaici, etc.).

Inoltre l'efficienza della fuel cell segue la curva blu della *Figura 20*, e risulta essere 45% a $P_{fc} = 9\text{kW}$, e 40% a $P_{fc} = P_{nom}$.

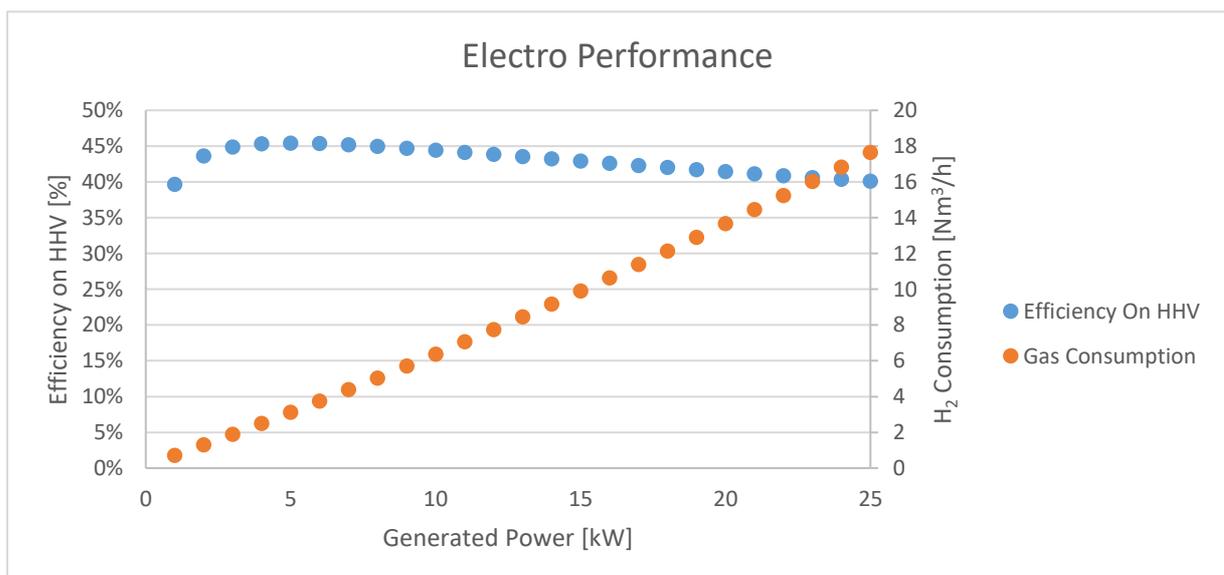


Figura 20: efficienza della Fuel cell e consumo di idrogeno

Volume serbatoio	Range pressione	Energia lorda totale (LHV)	Energia lorda utile (LHV)
21.6 [m ³]	3-28 [bar]	1793 [kWh] (28-0 bar)	1538 [kWh] (28-3 bar)

Tabella 4: dati serbatoio idrogeno

Il serbatoio di idrogeno non può essere scaricato completamente durante l'utilizzo a causa della necessità della fuel cell di ricevere idrogeno a una pressione di 1.5 bar assoluti. Si potrebbe svuotare la bombola fino a 1.5 bar, ma ciò richiederebbe un regolatore di pressione più precisione, solitamente un regolatore bistadio, più costoso e più pesante.

Infine la batteria e il serbatoio di idrogeno saranno considerati vuoti all'inizio della simulazione.

3° Capitolo: Risultati Simulazione

Tramite codice Matlab, è stato creato un modello fedele al MGE con aggiunta dei termini di potenza citati in 2.3.

3.1 Condizioni Iniziali

Nella 1° simulazione (SOCmin = 0.2, SOCmax = 0.8, Volume serbatoio=21.6 m³) e mostrato l'andamento della SOC della batteria e della percentuale di riempimento del serbatoio.

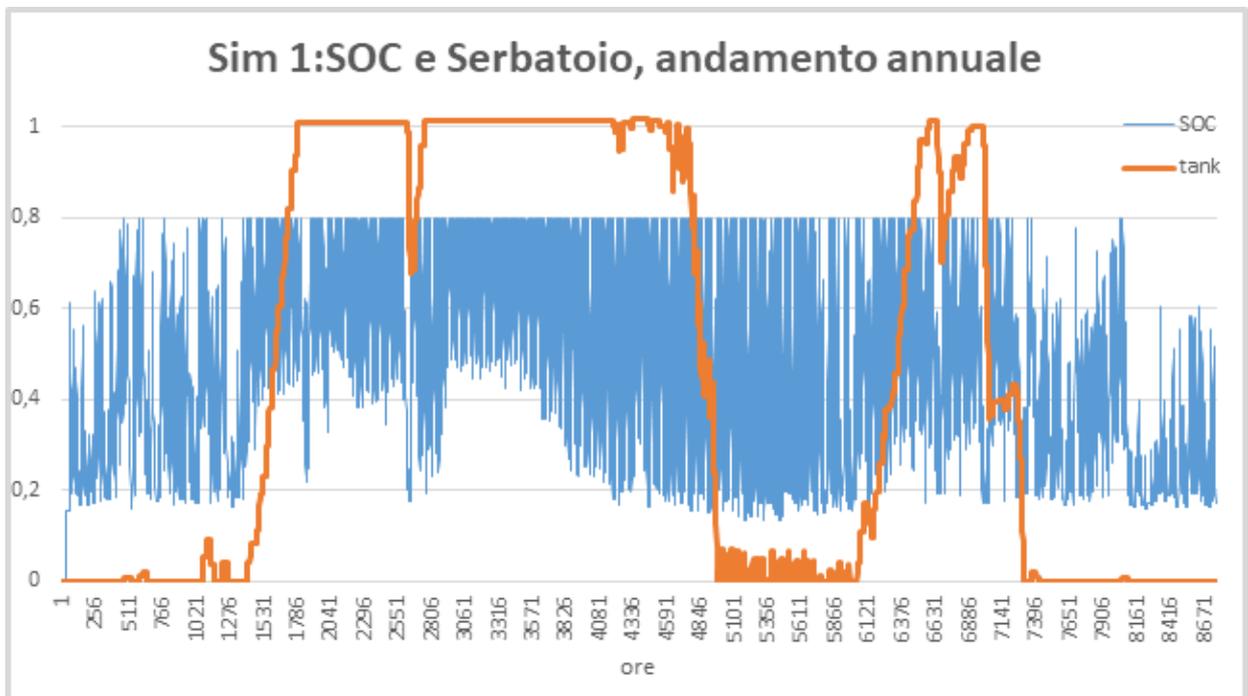


Figura 20:andamento SOC e riempimento serbatoio

Si nota subito come risultino cruciali due periodi:quello invernale e quello di Luglio-Agosto.

D'inverno non c'è abbastanza luce da avere un surplus energetico in modo da poter riempire il serbatoio di idrogeno, risultando in quasi 2 mesi di inutilizzo del modulo fuel cell-elettrolizzatore. D'estate, invece, con la sopraggiunta di turismo sull'isola,

aumenta la domanda energetica, risultando in una scarica completa del serbatoio in pochi giorni.

In questo caso si ha un deficit energetico di 15.97 MWh.

Il MGE della simulazione 1 risulta essere autonomo al 90.7%. Considerazioni successive potrebbero permettere di aumentare questa percentuale, cercando di raggiungere il 95%.

I parametri che si possono variare nel sistema sono 3: Volume del serbatoio, capacità della batteria e la SOCmax (sebbene i limiti della batteria siano utili per arginare un precoce degrado della stessa).

3.2 Variazione SOCmax

Nelle Simulazioni da 2 a 5 si sono variati i valori di SOCmax, aumentandolo del 5% di volta in volta fino ad arrivare a SOCmax=1.

Da *Figura 21* a *Figura 25* sono riportati i grafici dell'andamento di SOC e del riempimento del serbatoio a variare ella SOCmax. Mentre risulta particolarmente pericoloso scaricare fino in fondo la batteria (SOCmin = 0), non risulta essere troppo invasiva la carica completa della batteria (SOCmax = 1).

L'andamento del riempimento della bombola non varia di molto nelle 5 simulazioni, perchè la dinamica del modulo fuel cell-elettrolizzatore è ben più lenta della dinamica della batteria, per cui si registrano variazioni minime.

Invece in *Figura 26* si possono notare gli andamenti del Deficit di energia nelle 5 simulazioni. Si nota come vi sia un buon guadagno, infatti in *Figura 27* all'aumentare della SOCmax corrisponde un incremento dell'autonomia del sistema. Scegliendo la massima carica della batteria si ottiene un miglioramento dell'autonomia del 2%.

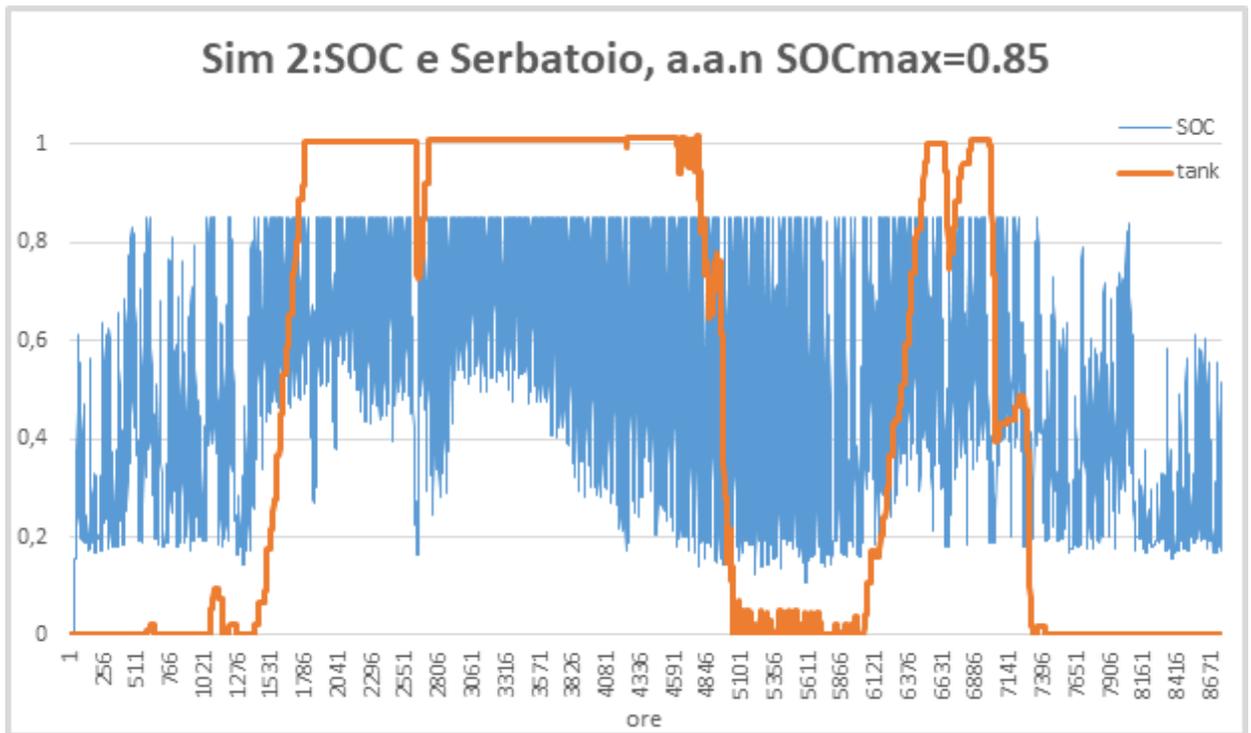


Figura 21: andamento SOC e riempimento serbatoio

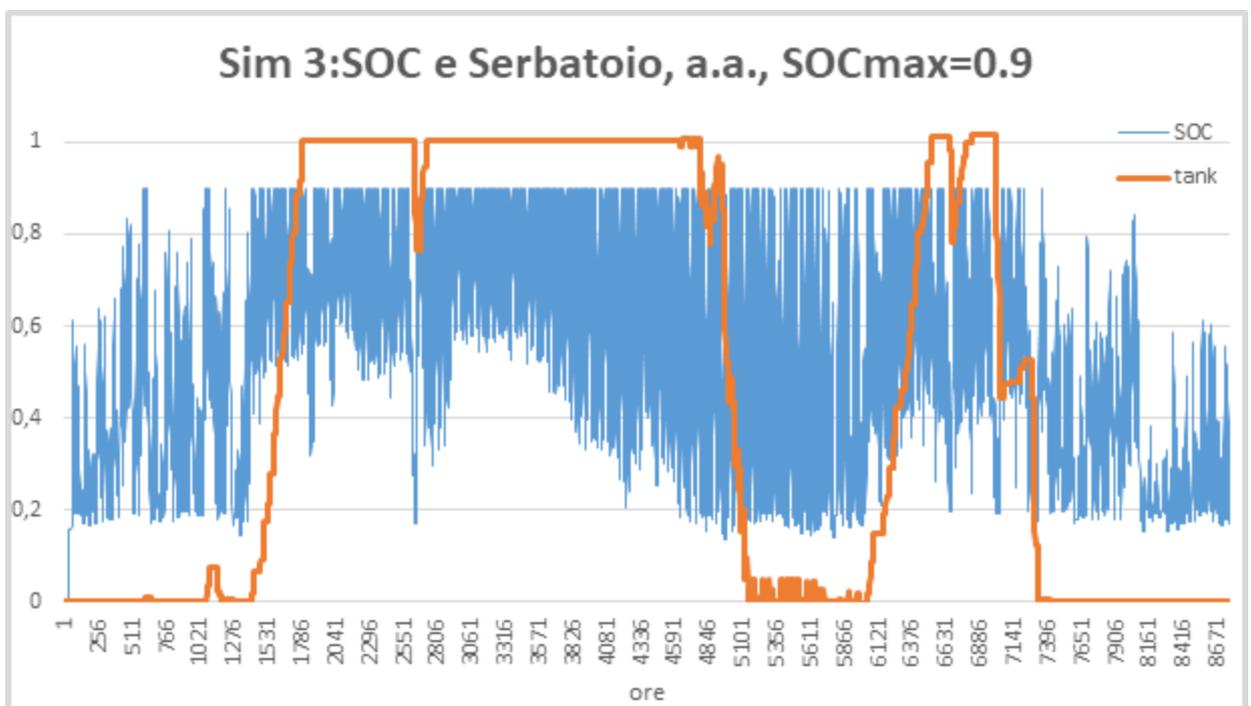


Figura 22: andamento SOC e riempimento serbatoio

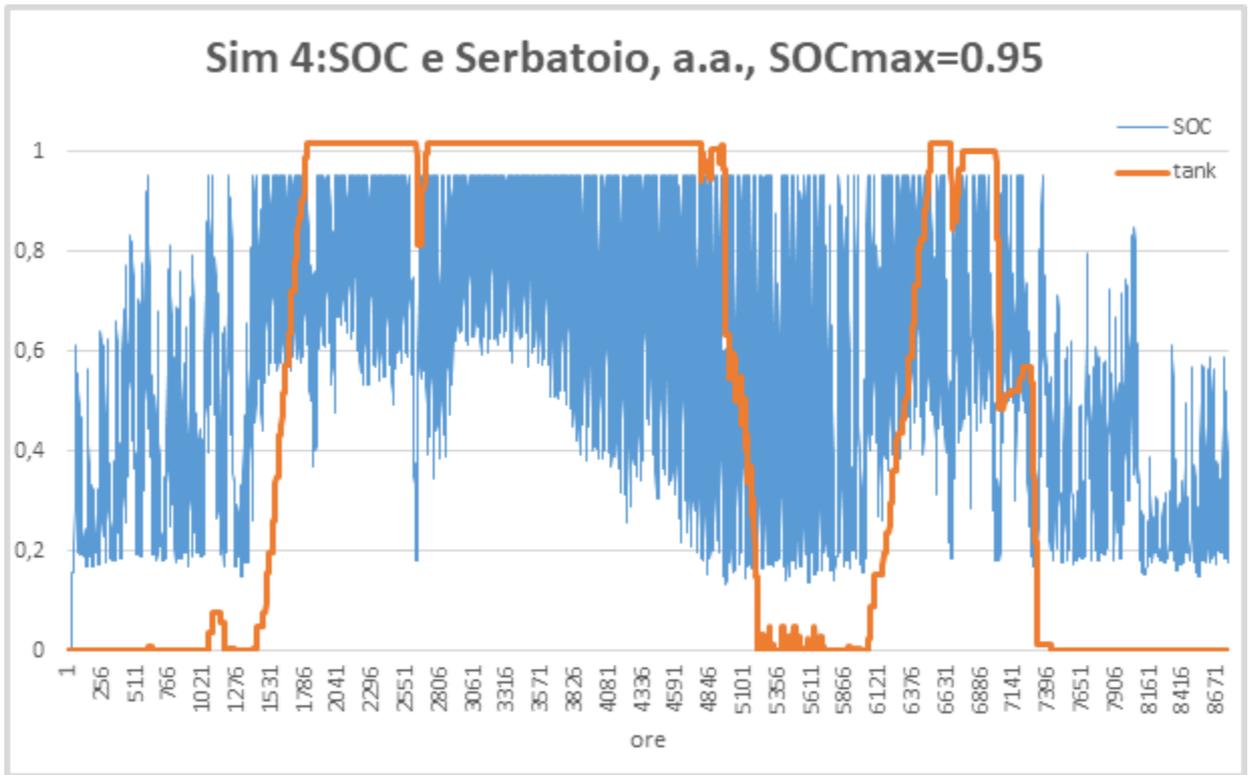


Figura 23: andamento SOC e riempimento serbatoio

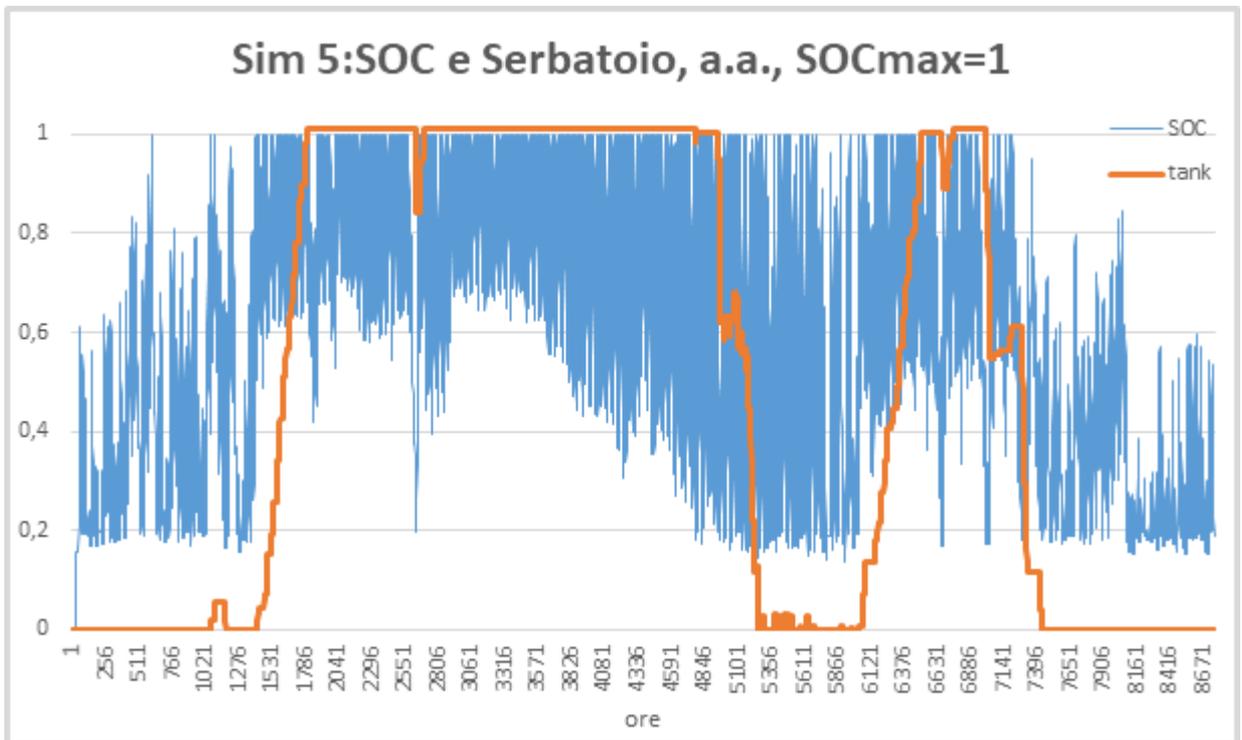


Figura 24: andamento SOC e riempimento serbatoio

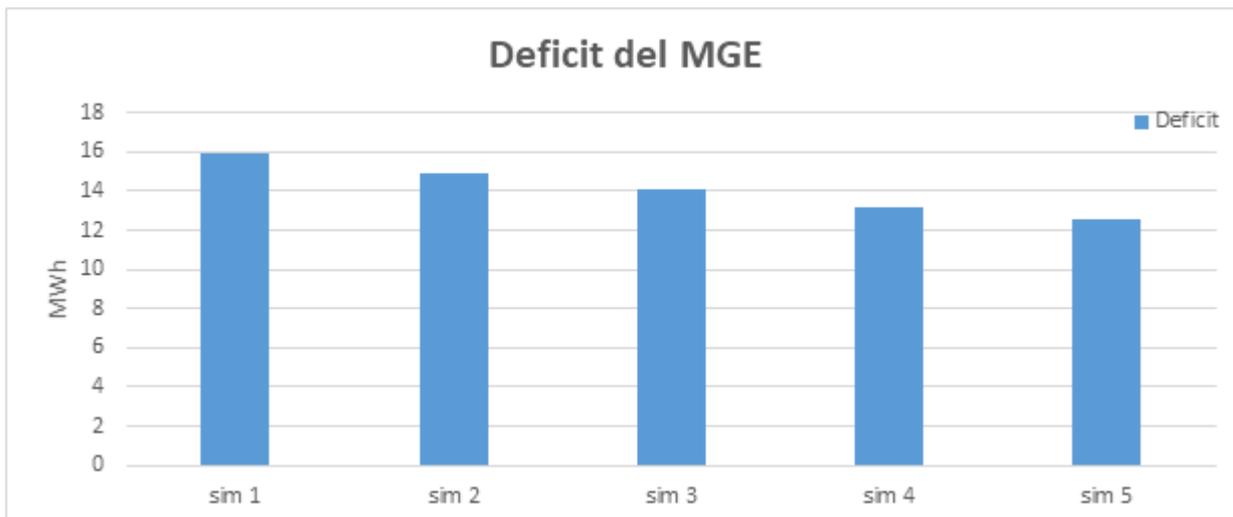


Figura 26: Deficit nelle 5 simulazioni

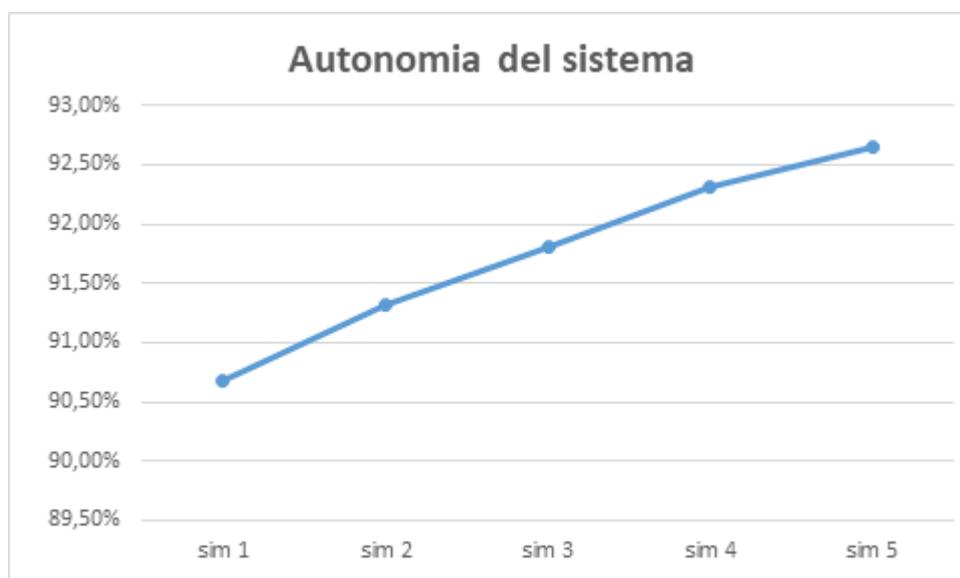


Figura 27: autonomia del sistema nelle 5 simulazioni

3.3 Variazione Volume serbatoio

Il secondo parametro da variare + il volume del serbatoio. Dalla simulazione 6 alla 9 si aggiunge un altro serbatoio delle stesse caratteristiche del primo di volta in volta.

Nonostante si quintuplichi il volume del serbatoio, l'autonomia del sistema aumenta solo di poco più di 1%, non tenendo conto dell'attuale costo di installazione di altro quattro serbatoi, rendendo la variazione del volume una scelta poco popolare.

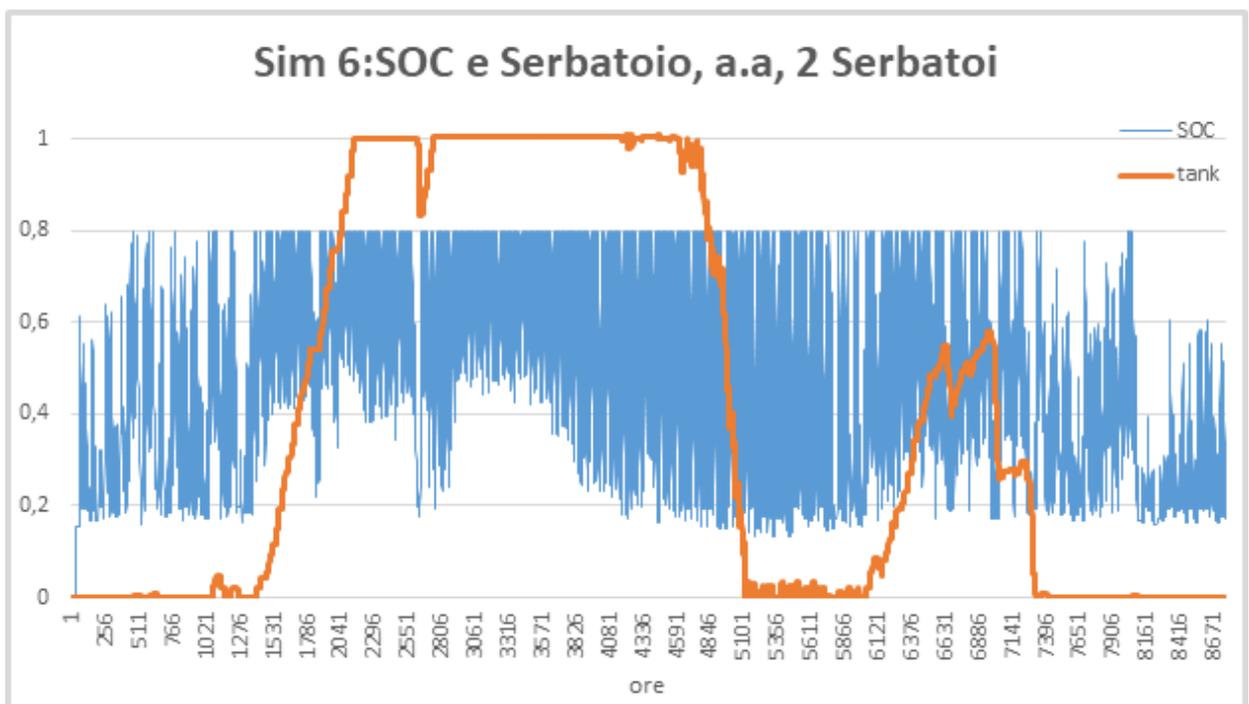


Figura 28: andamento SOC e riempimento serbatoio

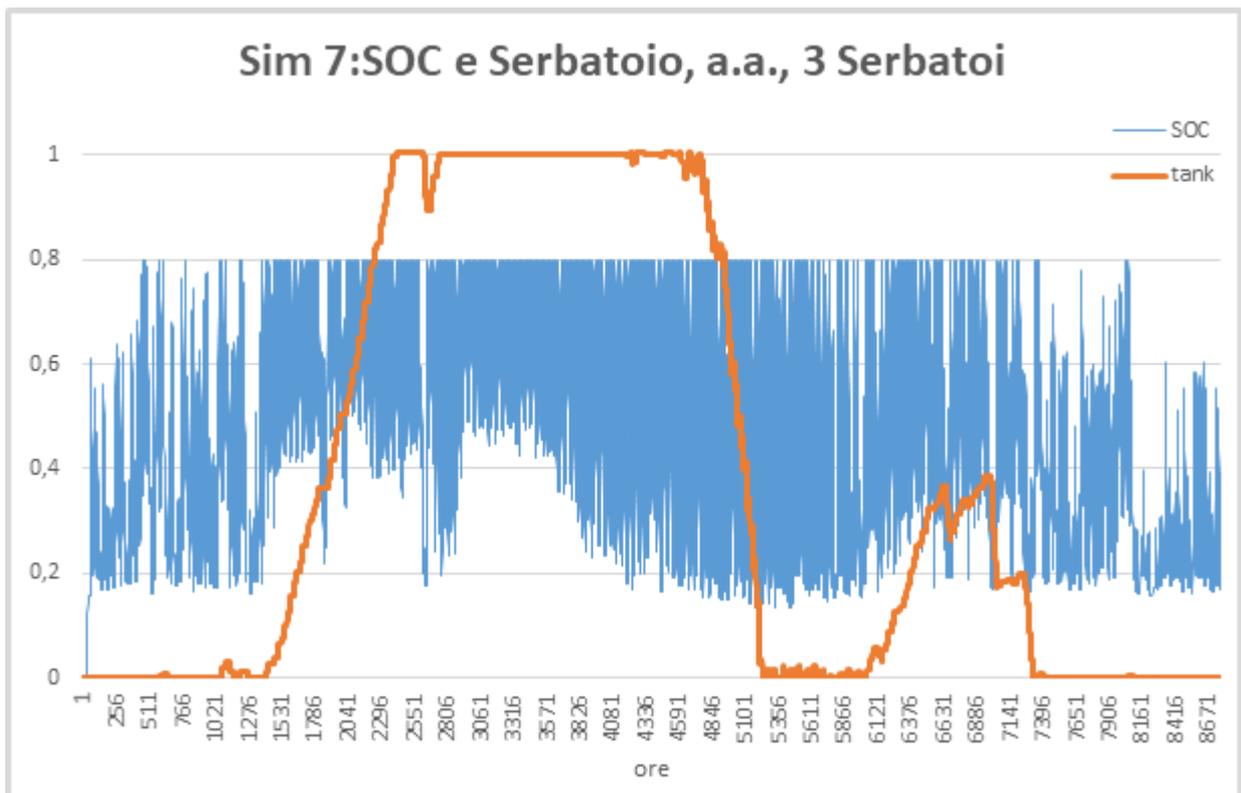


Figura 29: andamento SOC e riempimento serbatoio

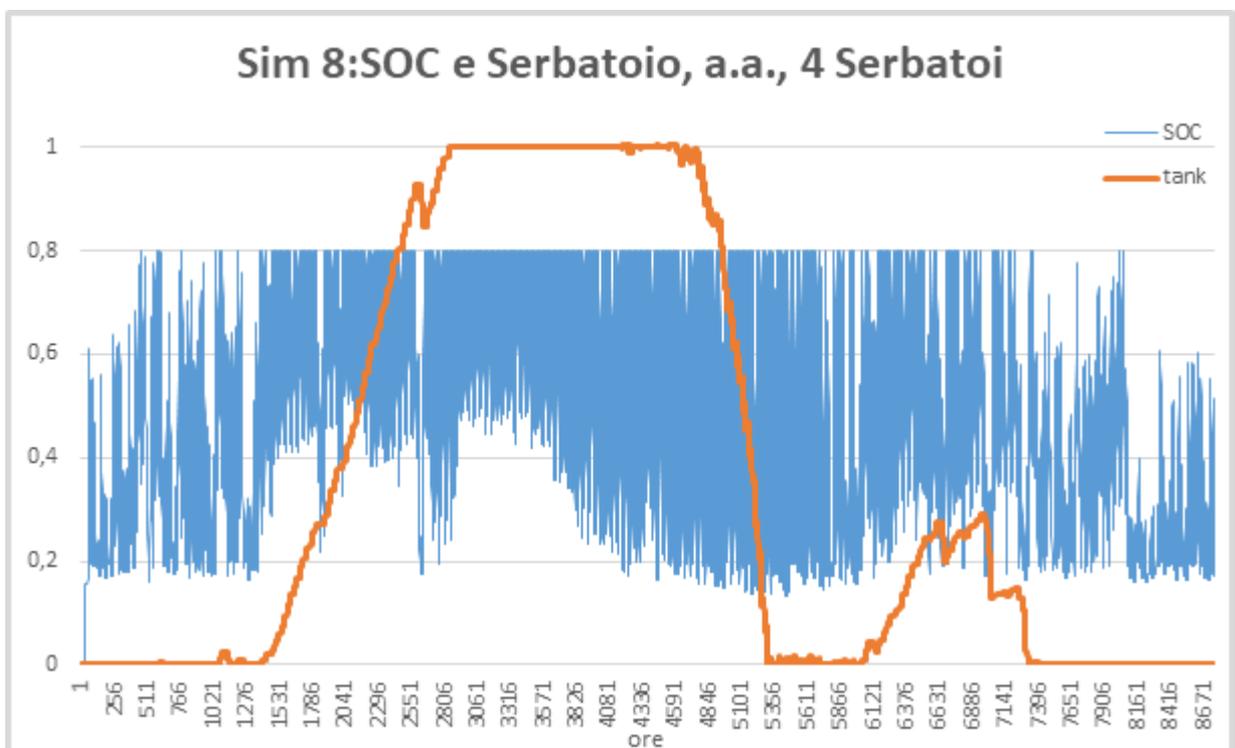


Figura 30: andamento SOC e riempimento serbatoio

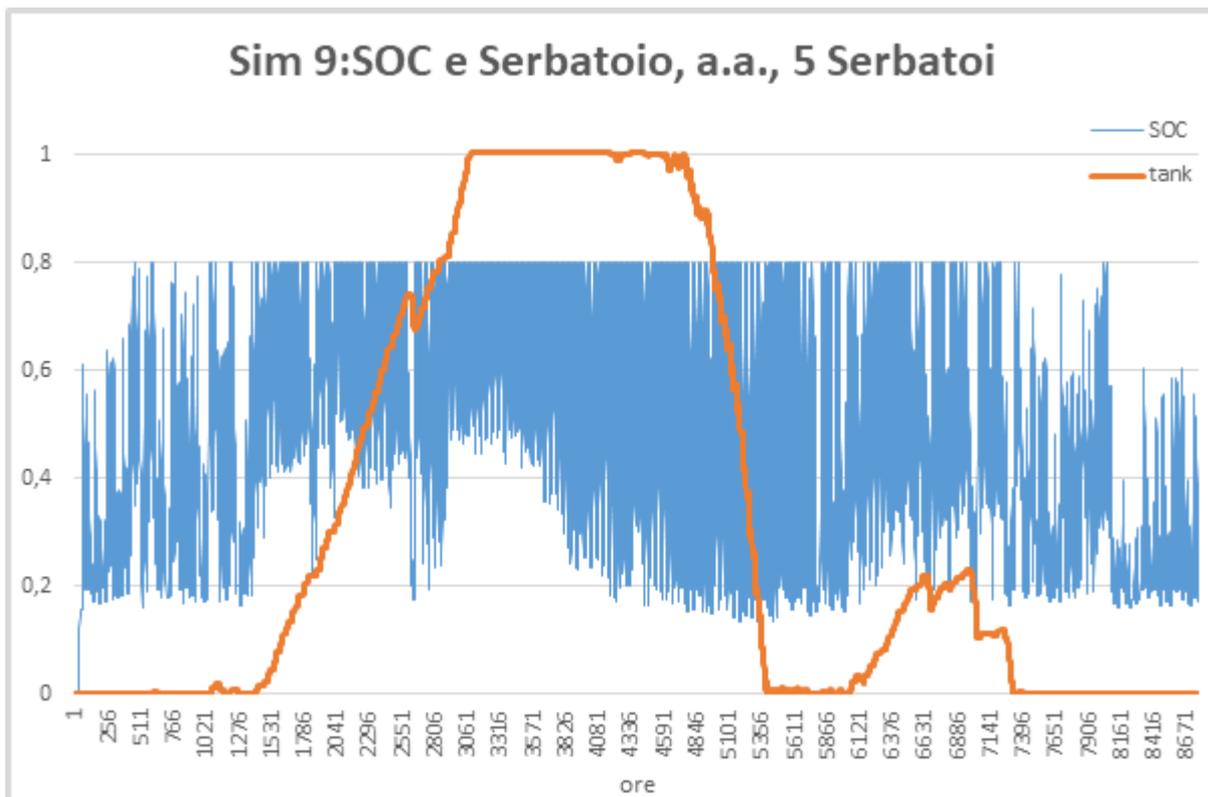


Figura 31: andamento SOC e riempimento serbatoio

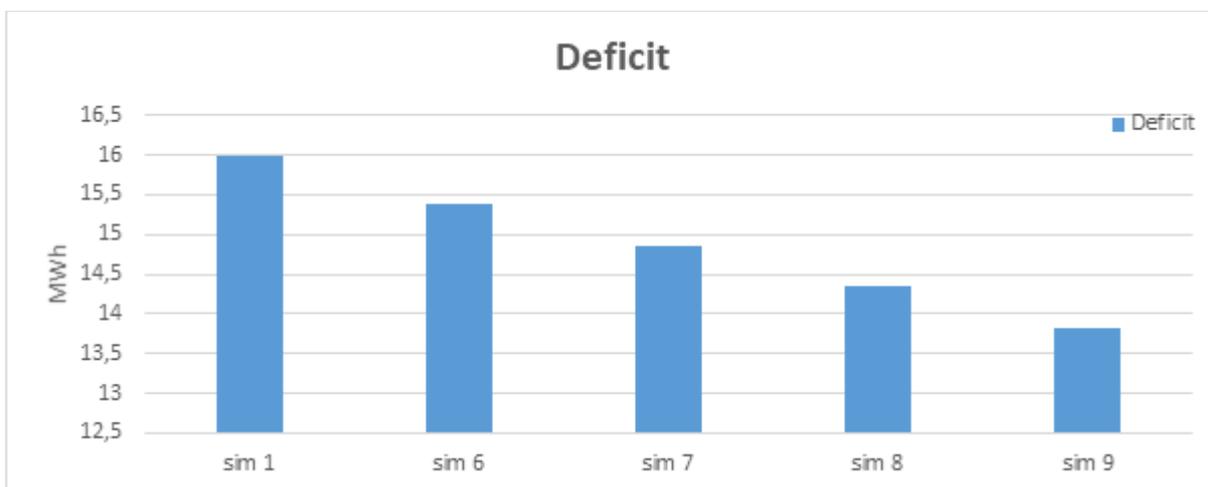


Figura 32: Deficit nelle 5 simulazioni

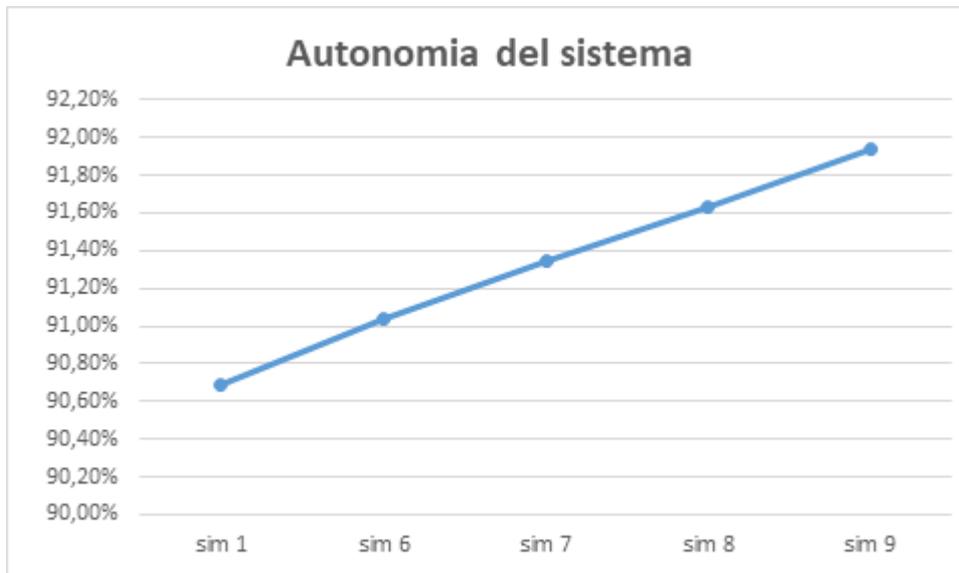


Figura 33: autonomia del sistema nelle 5 simulazioni

3.4 Variazione capacità batteria

In ultima analisi, viene presa in considerazione la possibilità di aumentare la capacità del pacco batteria, aggiungendo un pacco delle stesse caratteristiche per simulazione. Si nota dall'andamento dell'autonomia del sistema in *Figura 39* che già solo con 2 Pacchi Batterie si ha un aumento del 2,9% dell'autonomia, e successive aggiunte di pacchi batterie non creino un aumento così sostanziale.

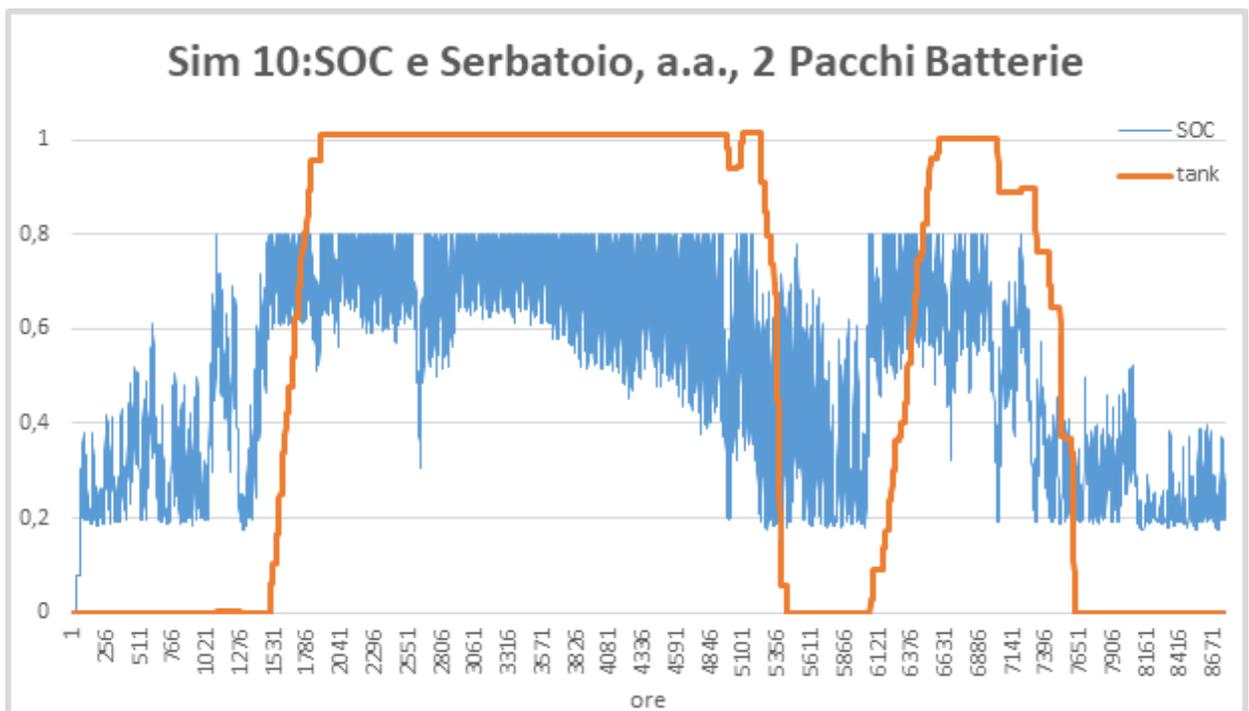


Figura 34: andamento SOC e riempimento serbatoio

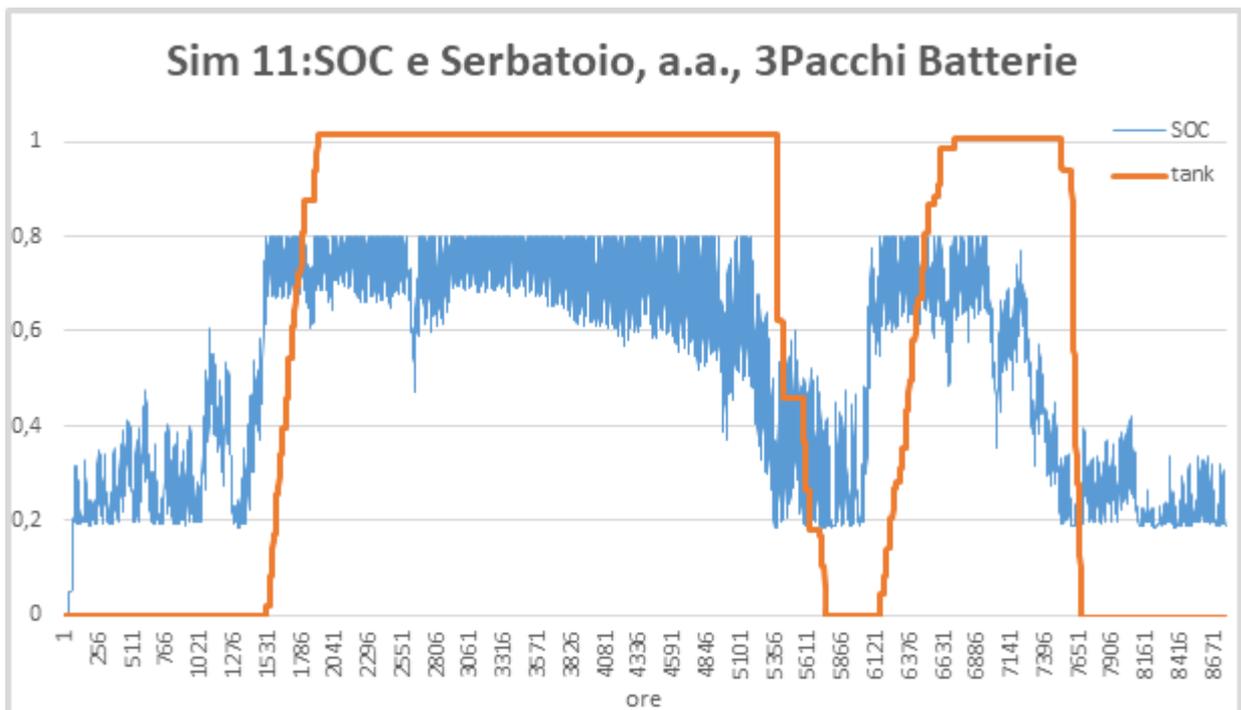


Figura 35: andamento SOC e riempimento serbatoio

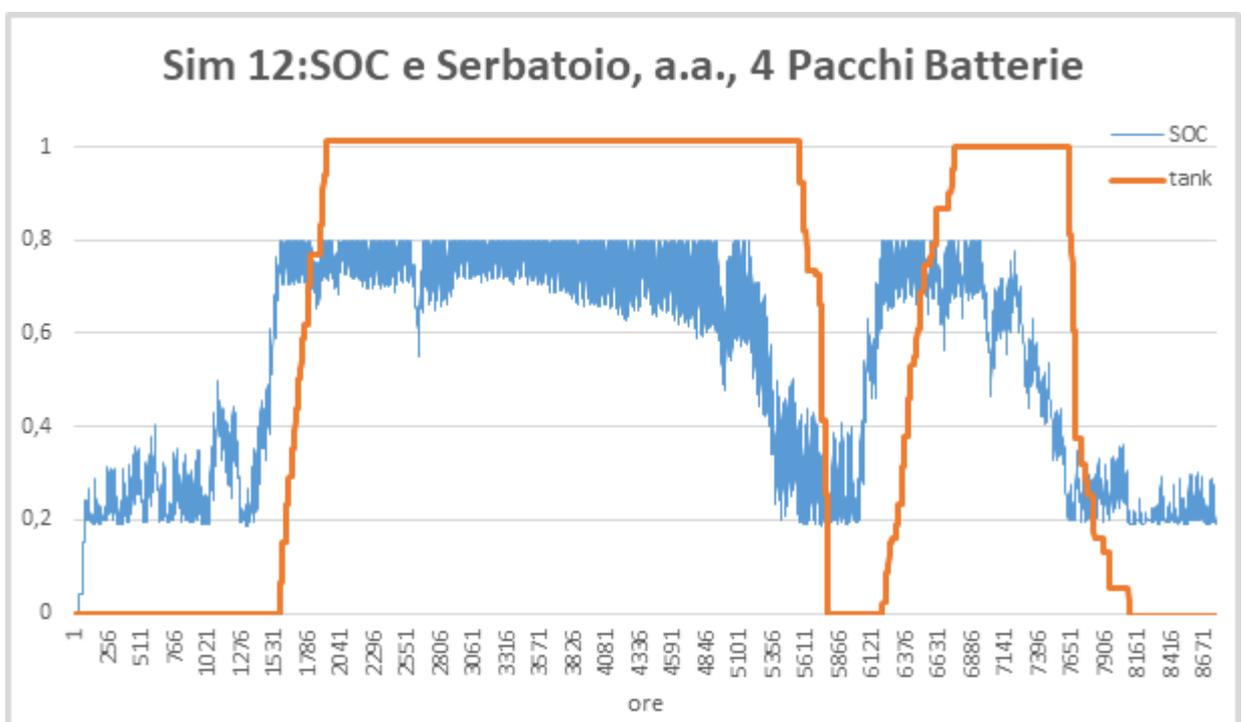


Figura 36: andamento SOC e riempimento serbatoio

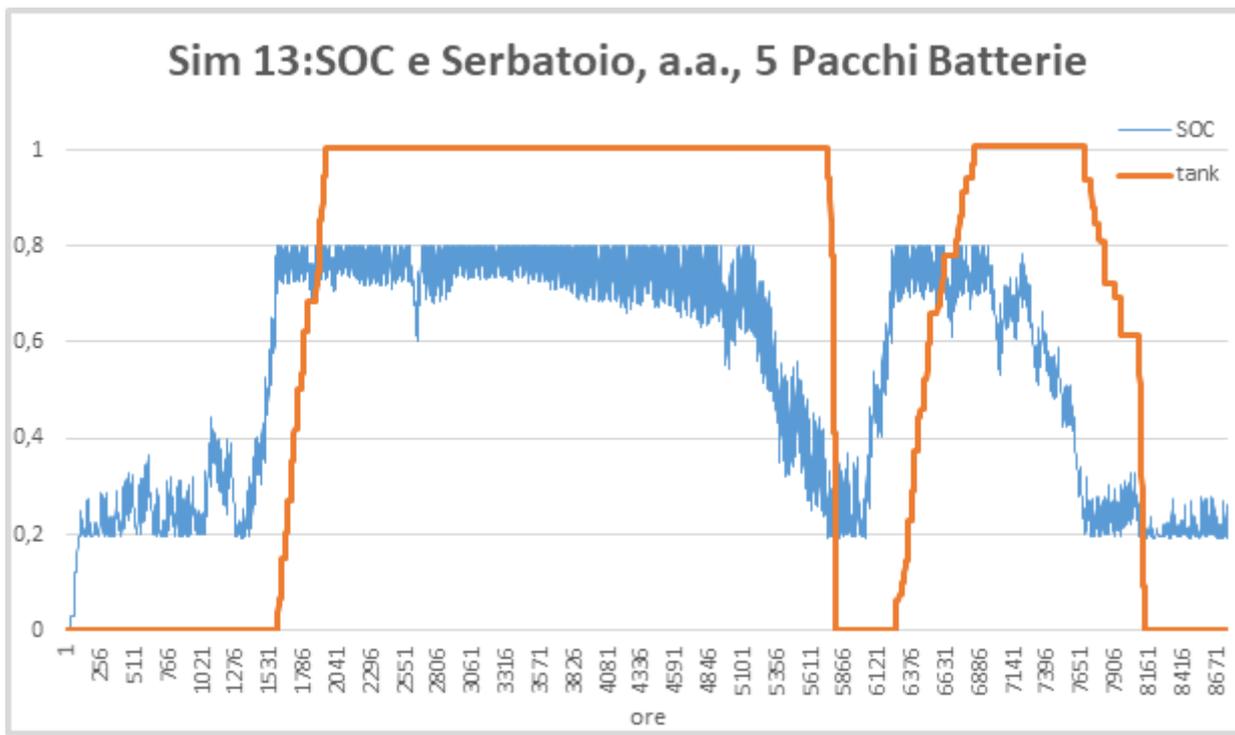


Figura 37: andamento SOC e riempimento serbatoio

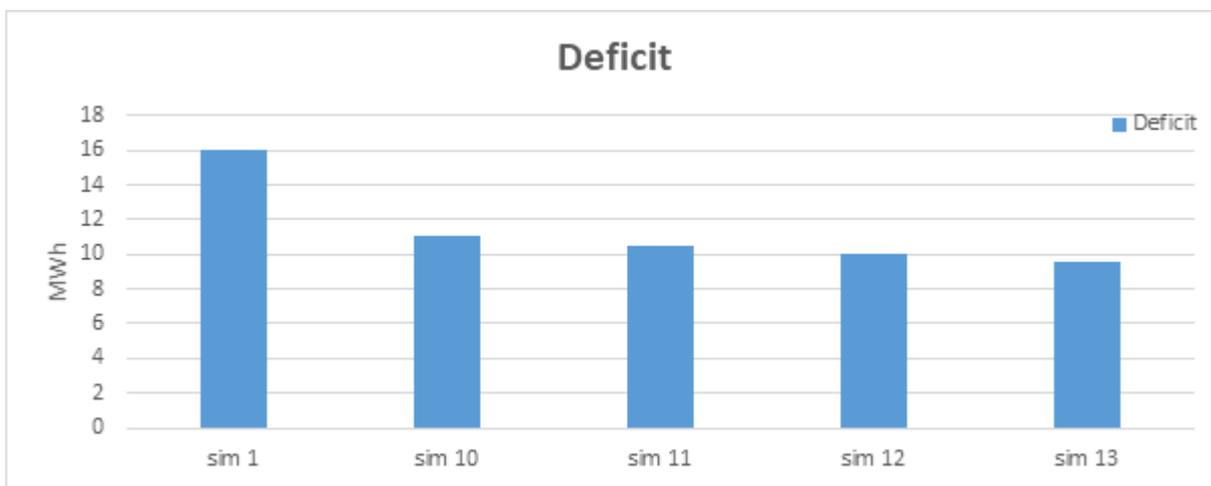


Figura 38: Deficit nelle 5 simulazioni

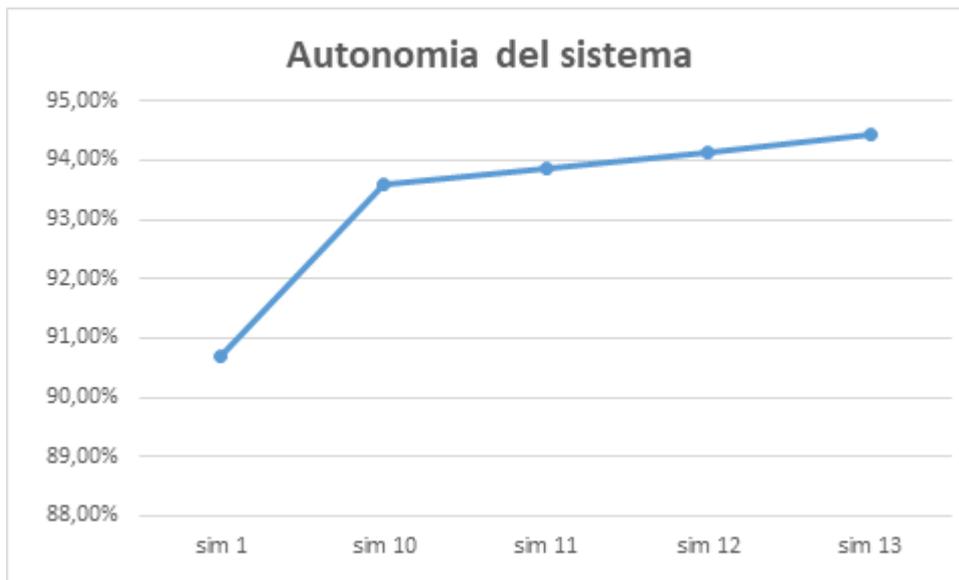


Figura 39: autonomia del sistema nelle 5 simulazioni

3.5 Aumento prestazioni

Dalle analisi precedenti si nota come giochi un ruolo fondamentale la batteria, per cui:

- lo studio [8] permette una carica della batteria fino al 95%, dimostrando come poco impatti sulla vita della batteria. Si può quindi simulare con $SOC_{max} = 0.95$.
- l'analisi 3.4 ha mostrato come basti raddoppiare la capacità della batteria per ottenere un aumento del 2.9%, per cui si può simulare con 2 pacchi batterie.
- Lo studio 3.3 ha mostrato come poco impatta la variazione del serbatoio di idrogeno, ma per ridurre il deficit che si crea nei mesi estivi più caldi (Luglio e Agosto), conviene almeno duplicare il volume del serbatoio.

Si ottiene così un'efficienza del sistema del 94.18%, un aumento di 3.49% dal caso iniziale.

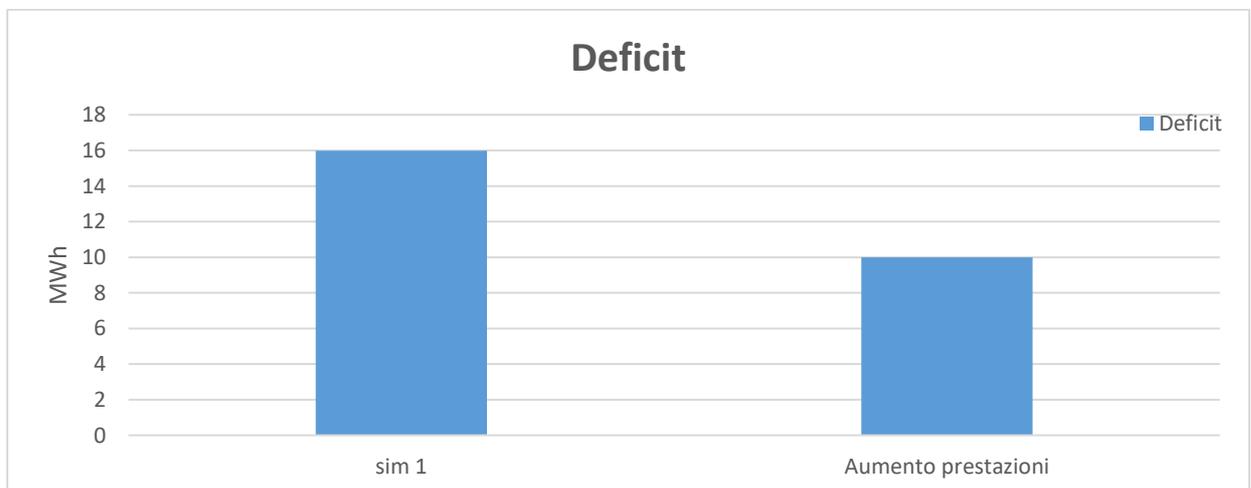


Figura 34: Deficit in sim 1 e aumento delle prestazioni

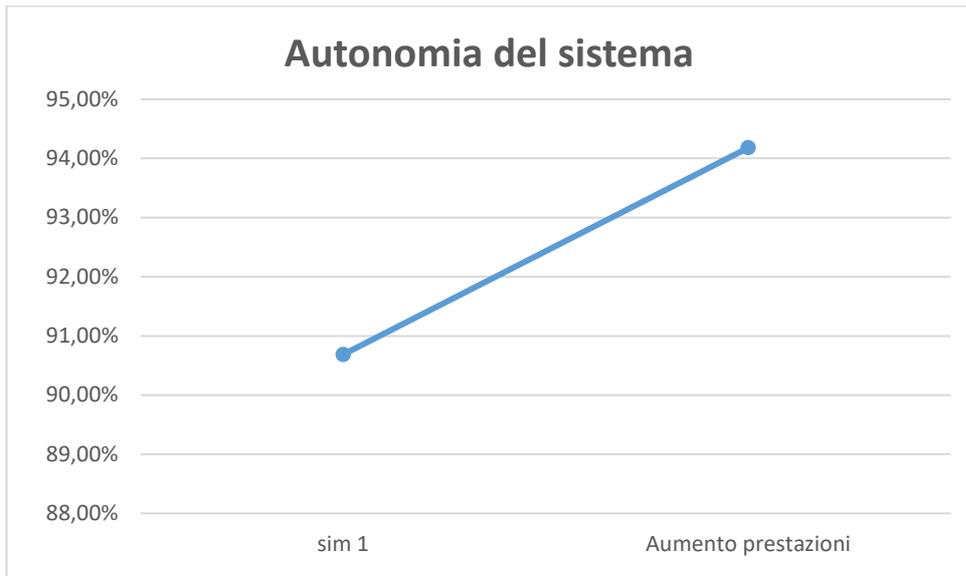


Figura 35: autonomia del sistema nelle 5 simulazioni

4° Capitolo: Conclusioni

L'ultima configurazione ha raggiunto un'efficienza prossima al 95%. Per aumentare ulteriormente l'autonomia, senza più agire sui parametri precedenti, si potrebbero attuare delle modifiche della gestione dei moduli stessi.

La fuel cell ha un canale di uscita di idrogeno dalla cella, e si potrebbe attuare un sistema di recupero per riutilizzare l'idrogeno disperso altrimenti in ambiente. Lo studio [10] tratta di un sistema a variazione di pressione come soluzione attuabile.

Si potrebbe studiare la miglior angolazione dei pannelli solari per meglio sfruttare la radiazione solare.

Il MGE risulta efficace nel ridurre l'utilizzo dei motori diesel dell'isola, rendendo gli abitanti quasi del tutto autonomi, non più dipendenti dal continuo rifornimento di carburante tramite elicotteri.

Dunque per piccole realtà risulta vincente la decisione di creare un sistema quasi autonomo, con la possibilità di poter usufruire di fondi europei per la costruzione.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare il mio relatore Massimo Santarelli, e il mio correlatore Paolo Marocco, per la pazienza mostratami per la tesi.

Un grande ringraziamento a mia madre e mio padre che con il loro sostegno, sia morale che economico, mi hanno permesso di arrivare fino a qui, anche se non li ringrazio mai abbastanza.

Ringrazio la mia ragazza Silvia, che mi ha sopportato e ha continuato ad amarmi in tutti questi anni, forse anche grazie alle prelibatezze che le cucino.

Ringrazio mio fratello Aram, che come ogni fratello maggiore mi ha aiutato in tutti i miei problemi, anche quando avevo i capelli a “materasso”, o quando tornavo disfatto da un esame.

Per ultimi ma non meno importanti i miei amici, che nonostante reputino che mi manchi qualche rotella, mi sopportano ben volentieri.

Un sentito grazie a tutti!

Masis Shahbazians

Bibliografia

1. Nicola Caon, “Tecnologia e Innovazione dell’Immagazzinamento Elettrochimico dell’Energia”, Università degli Studi di Padova, Facoltà di Ingegneria Elettrotecnica.
2. Mattia Zuin, “I Veicoli ad Idrogeno e Fuel Cells per un Mondo Libero e Pulito”, Università degli Studi di Padova, Facoltà di Ingegneria Gestionale.
3. Vera Bettinardi, “Il Fotovoltaico a Film Sottile”, Università degli Studi di Padova, Facoltà di Ingegneria Informatica.
4. D.Scamman, M. Newborough, H. Bustamante,”Hybrid hydrogen-battery systems for renewable off-grid telecom power”, ITM power, United Kingdom 24 Agosto 2015.
5. G. Andrea, M. Gandiglio, A. Lanzini, M. Santarelli, “Dynamic model with experimental validation of a biogas-fed SOFC plant”, Energy Department del Politecnico di Torino, Energiteknik del Royal Institute of Technology KTH.
6. L. Valverde-Isorna, D. Ali, D.Hogg, M. Abdel-Wahab, “Modelling the performance of wind-hydrogen energy systems: Case study the Hydrogen Office in Scotland/UK”,Dipartimenti di Energia dell’Università di Siviglia, Electrical and Computer Engineering University del Texas, School of the Built Environment di Edinburgo.
7. B. Madaci, R. Chenni, E. Kurt, K.E. Hemsas,”Design and control of a stand-alone hybrid power system”, University Mentouri Constantine, Gazi University di Ankara,University Setif 1 Department of Electrical Engineering.
8. D. Ipsakis, S. Voutetakis, P. Seferlis, F. Stergiopoulos, C. Elmasides, “Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy sources and hydrogen storage”,Chemical Process Engineering Research Institute (C.P.E.R.I.), Centre for Research and Technology Hellas, System Sunlight SA di Neo Olvio.
9. P. Marocco, D. Ferrero, M. Gandiglio, M. Santarelli, “Remote area Energy supply with Multiple Options for integrated hydrogen-base Technologies”, Politecnico di Torino.
10. M. Uno, T. Shimada, et K. Tanaka, “Reactant recirculation system utilizing pressure swing for proton exchange membrane fuel cell”.