

**A. GIANNINI, E. CALÒ**

Dipartimento Tecnologie Energetiche  
Divisione di Produzione, Conversione e Uso Efficienti dell'Energia  
Laboratorio Sviluppo Processi Chimici e  
Termofluidodinamici per l'Energia  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

**G. NIGLIACCIO**

Dipartimento Tecnologie Energetiche  
Divisione Smart Energy  
Laboratorio Cross Technologies per distretti urbani e industriali  
Centro Ricerche Bologna

**M. PASQUALI**

Dipartimento Tecnologie Energetiche  
Divisione di Produzione, Conversione e Uso Efficienti dell'Energia  
Laboratorio Sistemi e Tecnologie per la Mobilità e l'Accumulo  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

**SPERIMENTAZIONE DI UN SISTEMA  
INTEGRATO *FUEL PROCESSOR/POLYMER  
ELECTROLYTE FUEL CELL* ALIMENTATO A GPL  
PER LA GENERAZIONE ELETTRICA  
STAZIONARIA (1 kWe)**

RT/2017/32/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

A. GIANNINI, E. CALÒ

Dipartimento Tecnologie Energetiche  
Divisione di Produzione, Conversione e Uso Efficienti dell'Energia  
Laboratorio Sviluppo Processi Chimici e  
Termofluidodinamici per l'Energia  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

M. PASQUALI

Dipartimento Tecnologie Energetiche  
Divisione di Produzione, Conversione e Uso Efficienti dell'Energia  
Laboratorio Sistemi e Tecnologie per la Mobilità e l'Accumulo  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

G. NIGLIACCIO

Dipartimento Tecnologie Energetiche  
Divisione Smart Energy  
Laboratorio Cross Technologies per distretti urbani e industriali  
Centro Ricerche Bologna

SPERIMENTAZIONE DI UN SISTEMA  
INTEGRATO *FUEL PROCESSOR/POLYMER*  
*ELECTROLYTE FUEL CELL* ALIMENTATO A GPL  
PER LA GENERAZIONE ELETTRICA  
STAZIONARIA (1 kWe)

RT/2017/32/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

Partecipanti alla sperimentazione (Enea):

Ing. Eugenio Calò  
Ing. Antonella Giannini  
Ing. Manlio Pasquali  
Ing. Giuseppe Nigliaccio  
P.I. Saverio Santomassimo  
P.I. Marcello Marchetti

Tesi di laurea sperimentale correlata all'attività di ricerca:  
Anno 2008

*"Produzione di idrogeno da combustibili fossili: modellazione di un impianto alimentato a GPL"* Ing. Alessio De Marzo

Si desidera ringraziare per il gentile e prezioso contributo:

Ing. Francesco Di Credico (Exergy)  
P.I. Gilberto Cicconi (Enea)  
P.I. Francesco Sacco (Enea)  
P.I. Carmine Grasso (Enea)  
Ing. Vincenzo Sglavo (Enea)  
Ing. Ennio Rossi (Enea)

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina  
<http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/rapporti-tecnici>

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano  
l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion  
of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

## **SPERIMENTAZIONE DI UN SISTEMA INTEGRATO FUEL PROCESSOR/POLYMER ELECTROLYTE FUEL CELL ALIMENTATO A GPL PER LA GENERAZIONE ELETTRICA STAZIONARIA (1 kWe)**

A. Giannini, E. Calò, M. Pasquali, G. Nigliaccio

### **Riassunto**

Questo rapporto tecnico presenta l'attività di ricerca realizzata dall'ENEA sul tema dello "Sviluppo delle celle a combustibile e dei sistemi per le loro applicazioni". Tale attività è stata finanziata dal FISR (Fondo Integrativo Speciale per la Ricerca) per il periodo 2005-2008 (poi prorogato al 2009) nell'ambito del programma strategico "Nuovi sistemi di produzione e gestione dell'energia" del Ministero dell'Economia e delle Finanze, del Ministero dell'Istruzione, Università e Ricerca e del Ministero dell'Ambiente, della Tutela del Territorio, delle Politiche Agricole e Forestali.

Scopo dell'attività è stata la realizzazione e la sperimentazione dell'unità di generazione elettrica Orion 1 CHP fornita da Morphic. Tale sistema è un prototipo costituito dall'integrazione del fuel processor APS 1000 alimentato a GPL, progettato e realizzato da Helbio SA (già testato nel laboratorio del Centro Ricerche Casaccia nel periodo giugno-settembre 2008) con lo stack di celle a combustibile di tipo PEM da 1 kWe (32 celle da 278 cm<sup>2</sup>) prodotte da Exergy FC. Tale attività di ricerca è stata condotta dal 'Laboratorio Sviluppo Processi Chimici e Termofluidodinamici per l'Energia' (SPCT) della 'Divisione di Produzione, Conversione e Uso Efficienti dell'Energia' (PCU) appartenente al "Dipartimento di Tecnologie Energetiche" (DTE) del Centro di Ricerca ENEA Casaccia (ex Unità Tecnica Fonti Rinnovabili, Laboratorio Idrogeno e Celle a Combustibile).

**Parole chiave:** Idrogeno, Celle a combustibile ad elettrolita polimerico, Efficienza, GPL, micro-CHP, APU.

### **Abstract**

*This work describes the activities performed in ENEA during 2008-2010 and it deals with the analysis of a small scale cogeneration system based on a 1 kWe Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC). It is a prototype consisting of the integration of LPG fuel processor (APS 1000, supplied by Helbio SA) with 1 kWe-PEM fuel cell stack (32 cells of 278 cm<sup>2</sup>, supplied by Exergy FC). An integrated analysis of the fuel cell stack and mass and energy balances were obtained. Efficiency maps for a varying fuel utilization and current density of the stack are taken into account.*

**Key words:** Hydrogen, Polymer Electrolyte Fuel Cell, LPG, Efficiency, micro-CHP, APU.



# INDICE

1. PREMESSA	7
2. DESCRIZIONE DELL'ATTIVITA' DI RICERCA "SPERIMENTAZIONE DI SISTEMI ALIMENTATI CON COMBUSTIBILI DIVERSI"	8
3. <i>FUEL PROCESSOR</i> HELBIO APS 1000	9
3.1 Descrizione del processo	10
4. STACK DI CELLE A COMBUSTIBILE DI TIPO PEM	11
4.1 Scelta dei piatti	12
4.2 Dimensionamento di massima dello <i>stack</i>	12
4.3 Scelta del <i>blower</i>	13
4.4 <i>Air bleeding</i>	16
4.5 Calcolo della coppia di serraggio	17
5. SISTEMA INTEGRATO <i>FUEL PROCESSOR/POLYMER ELECTROLYTE FUEL CELL</i> : ORION 1 CHP	18
5.1 Descrizione della stazione di prova	19
6. ATTIVITA' SPERIMENTALE NEL PERIODO 2009-2010:	23
6.1 Interventi di tipo elettrico effettuati sul sistema Orion 1 CHP	23
6.2 Sistema di acquisizione dati	25
6.3 Sintesi dei risultati sperimentali	30
7. EFFICIENZA DEL SISTEMA INTEGRATO	38
8. PROVA SPERIMENTALE DI FUNZIONAMENTO STAND-ALONE	40
8.1 Criterio di scelta delle batterie per il funzionamento in isola ( <i>stand-alone</i> )	41
8.2 Avviamento del sistema nella prova <i>stand-alone</i>	46
9. CONCLUSIONI	50
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI	52
BIBLIOGRAFIA	53
ALLEGATO A: P&ID del Fuel Processor HELBIO "APS 1000"	54
ALLEGATO B: P&ID dell'unità "ORION 1 CHP Morphic"	55



## 1 PREMESSA

L'attività di ricerca presentata in questo rapporto tecnico è riferita alla generazione di energia elettrica isolata impiegando le PEFC (*Polymer Electrolyte Fuel Cell*, celle a combustibile ad elettrolita polimerico), sviluppate inizialmente per applicazioni nel campo della trazione elettrica, il cui interesse è stato poi ampliato al campo della generazione/cogenerazione stazionaria di piccola taglia e della generazione elettrica portatile.

Il requisito più importante per questo ultimo tipo di sistemi, è quello della indipendenza dalla rete elettrica e da altre reti di distribuzione (acqua, combustibili). Si tratta quindi sostanzialmente di realizzare sistemi che non devono essere connessi alla rete elettrica e che possono essere alimentati da combustibili facilmente disponibili e trasportabili (quali GPL, gasolio, benzina, etanolo, combustibili liquidi in genere).

L'alimentazione di celle a combustibile nel campo di 1–50 kW elettrici, in assenza di sistemi centralizzati di produzione e distribuzione di idrogeno (H<sub>2</sub>), richiederà lo sviluppo e la diffusione di impianti di produzione (*Fuel Processor*, FP) e distribuzione decentrata di H<sub>2</sub> su piccola scala (da 1 a 70 Nm<sup>3</sup>/h di H<sub>2</sub>) anche a partire da gas naturale, GPL, biomasse, gas da discarica, gas da digestori (biogas).

Le prospettive di mercato per i FP in piccola scala atti ad alimentare FC (*Fuel Cell*, FC) riguardano principalmente:

- cogenerazione residenziale (fig.1),
- generazione elettrica isolata,
- piccole stazioni di rifornimento di idrogeno (fig.2).



**Figura 1** - Cogenerazione Residenziale: impianto dimostrativo con Fuel Cells di Tokyo Gas [1]

La taglia oggetto della presente ricerca (1-5 kW<sub>e</sub> equivalenti) interessa il campo della cogenerazione residenziale, applicata a singole abitazioni o condomini, e quella della generazione elettrica isolata (APU, *Auxiliary Power Unit*) per imbarcazioni e caravan.



**Figura 2** - Produzione di idrogeno di piccola taglia: Impianto per produzione di Idrogeno GTI (Gas Technology Institute, Illinois, USA), Compact Fuel Processor, Generatore di 50-80 kg/giorno di H<sub>2</sub> [2]

Nella taglia 1–5 Nm<sup>3</sup>/h di H<sub>2</sub>, equivalenti approssimativamente a 1–5 kW elettrici, i principali vantaggi attesi dall'utilizzo dei sistemi FP/FC rispetto ad altri sistemi e impianti di piccola cogenerazione o di produzione localizzata di energia elettrica sono:

- maggiore efficienza elettrica (sino al 35% [3] in caso di alimentazione del FP con gas naturale e PEFC e sino al 55% [4] in caso di alimentazione del FP con biomasse e MCFC, *Molten Carbonate Fuel Cell*);
- indipendenza del rendimento elettrico dal carico [5];
- ridotto impatto ambientale [5] soprattutto in termini di minori emissioni di NO<sub>x</sub> (ma anche di CO e C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>) e di emissioni acustiche e, nel caso di utilizzo di biomasse, gas da discarica o gas da digestori, anche in termini di limitazione dell'effetto serra.

Recentemente l'interesse delle industrie (soprattutto europee, giapponesi e americane) per i FP atti ad alimentare FC si è focalizzato più sull'applicazione della micro-cogenerazione residenziale che non sull'applicazione come generazione elettrica isolata APU [6] [7] [8].

## **2 DESCRIZIONE DELL'ATTIVITA' DI RICERCA 'SPERIMENTAZIONE DI SISTEMI ALIMENTATI CON COMBUSTIBILI DIVERSI'**

Il programma di ricerca FISR finanziato dal MIUR per il periodo 2005-2008 (prorogato fino al 2009) sul tema "Sviluppo delle tecnologie delle celle a combustibile e dei sistemi per le loro applicazioni" prevedeva una linea di attività dal titolo "Realizzazione e sperimentazione di *stack* e sistemi da 1–5 kW, con diversi

combustibili” all’interno della quale vi era l’attività di ricerca “Sperimentazione di sistemi alimentati con combustibili diversi” in cui è stato coinvolto il laboratorio di Sviluppo di Processi Chimici e Termofluidodinamici (SPCT), Divisione di Produzione, Conversione ed Uso Efficienti dell’Energia (PCU) del Dipartimento di Tecnologie Energetiche (DTE) del Centro Ricerche Enea Casaccia.

Gli obiettivi di partenza erano quattro:

- *Obiettivo 1.3.1* Progettazione e realizzazione di un prototipo da 1 kW a GPL per applicazioni portatili (Arcotronics). Realizzazione del prototipo di un sistema da 1 kW alimentato a GPL e fornitura dello stesso ad ENEA per una campagna di prova presso i suoi laboratori (2005 – 2006)
- *Obiettivo 1.3.2* Allestimento della stazione di prova del sistema di generazione elettrica alimentato a GPL (ENEA). Si trattava di realizzare una stazione di prova in grado di sperimentare e monitorare un sistema completo FP/FC alimentato a GPL della potenza di 1 kW (2006 - 2007)
- *Obiettivo 1.3.3* Prove dinamiche e a carichi parziali del *reformer* a GPL (ENEA). Il sistema fornito dalla Arcotronics nell’obiettivo 1.3.1, doveva essere sottoposto ad una campagna di prove finalizzate ad individuare la flessibilità di funzionamento del FP nelle varie condizioni di lavoro (avviamento, carico parziale) ed i miglioramenti necessari per procedere alla integrazione dei diversi sottosistemi (2008 – 2009)
- *Obiettivo 1.3.4* Sperimentazione di un sistema completo da 1 kWe alimentato a GPL per applicazioni portatili (ENEA, Arcotronics). Il FP è integrato con lo *stack* di FC e l’intero sistema di generazione elettrica veniva ottimizzato nella gestione, nella prospettiva della riduzione dei costi e di una successiva industrializzazione. (2009 – 2010).

L’attività svolta nel periodo 19 gennaio 2006 - 18 gennaio 2008 (obiettivi 1.3.1 ed 1.3.2) è stata descritta nel rapporto tecnico RT/2011/5/ENEA “Sperimentazione di *Fuel Processor* per la produzione di idrogeno alimentati a GPL” (aut. Giannini, Calò).

Il presente rapporto tecnico invece riporta i risultati raggiunti e le attività svolte nel periodo settembre 2008 - 17 febbraio 2010.

### **3 FUEL PROCESSOR HELBIO ‘APS 1000’**

Il FP “APS 1000”, ampiamente descritto nel rapporto tecnico RT/2011/5/ENEA è stato progettato e realizzato dalla società greca HELBIO SA per poi essere integrato (da parte di Exergy FC) con uno *stack* di PEFC tale da produrre una unità di generazione stazionaria di energia elettrica da 1 kWe.

Nell’allegato A viene riportato un P&ID (*Process and Instrumentation Diagram*) del FP ‘APS 1000’.

L’impianto in oggetto è stato sviluppato per la produzione di gas di sintesi ad alto contenuto di idrogeno e bassissimo tenore di zolfo e monossido di carbonio. I fluidi di processo sono GPL ed acqua demineralizzata.

Il GPL è una miscela di idrocarburi paraffinici a basso peso molecolare; la sua composizione non è definita esattamente ma in generale può ritenersi costituita da un 80-90% in volume di propano ( $C_3H_8$ ) e per il resto da metano ( $CH_4$ ), etano ( $C_2H_6$ ), butano ( $C_4H_{10}$ ) e zolfo in piccole quantità a seconda dell'origine del prodotto. Le specifiche di fornitura del GPL hanno dei margini di variazione per quanto riguarda sia la composizione che la densità; per il propano commerciale quest'ultima è compresa tra i 505 ed i 530  $kg/m^3$  con un potere calorifico inferiore ( $PCI$ )  $\geq 10950$  kcal/kg, ed un contenuto di zolfo minore di 50 ppm.

### 3.1 Descrizione del processo

Nel FP 'APS 1000' l'acqua demineralizzata in ingresso viene vaporizzata dal generatore di vapore a recupero, mediante scambio termico con i gas combusti all'uscita del reattore di *Steam Reforming* (SR) (fig. 3, reattore a piastre catalitiche CPR, *Catalytic Plate Reactor*); la corrente di GPL di processo viene miscelata con il vapore d'acqua e quindi viene inviata al reattore dopo aver subito un ulteriore riscaldamento ad opera della corrente uscente dal reattore stesso (fig. 4); nel reattore di SR si ha la formazione di una corrente di *syngas* (principalmente  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$  oltre a vapore d'acqua) dalla quale deve essere rimosso il  $CO$  e che quindi viene inviata ad una prima reazione di *shift* ad alta temperatura (HTS, *High Temperature Shift*), dove si ha la reazione del monossido di carbonio con il vapore d'acqua alla temperatura di circa  $285^\circ C$ . Successivamente la corrente di *syngas* viene inviata ad una seconda reazione di *shift*, questa volta a bassa temperatura (LTS, *Low Temperature Shift*), a circa  $245^\circ C$ , all'uscita della quale il monossido di carbonio ammonta a circa lo 0,3%–1%. Poiché la miscela deve essere ulteriormente purificata per rientrare nel limite di tolleranza di  $CO$  relativo alla PEFC, essa subisce una prima metanazione (a  $200^\circ C$ ) per un'ulteriore riduzione di  $CO$ , e poi una seconda metanazione (a  $155^\circ C$ ), per portare la concentrazione di  $CO$  a valori inferiori a 10 ppm.

Prima di giungere nella PEFC la corrente di *syngas* ricca di idrogeno viene fatta passare attraverso un condensatore dove si ha la condensazione del vapore d'acqua, per eliminare la quantità non reagita (fig.5).

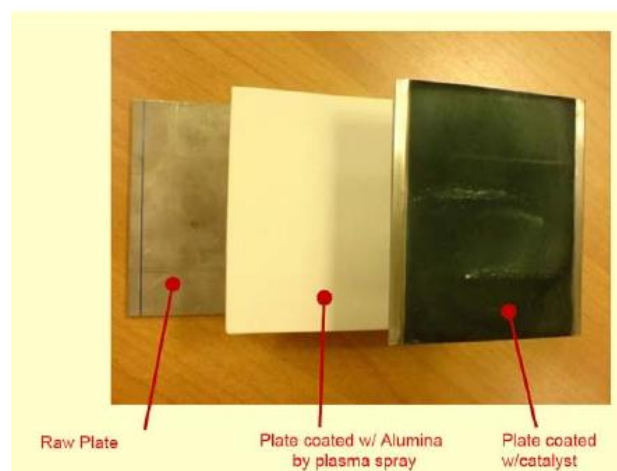
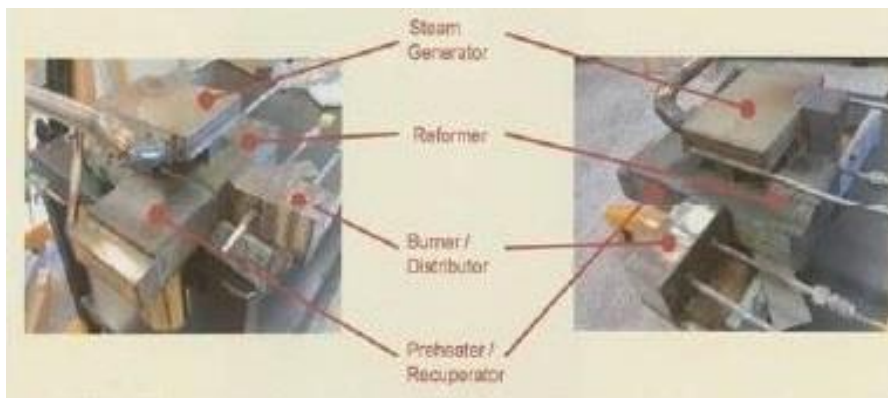


Figura 3 – Dettaglio del piatto catalitico



**Figura 4** – Generatore di vapore, bruciatore, preriscaldamento e reattore di steam reforming



**Figura 5** – Reattori di SHIFT e Metanazione; scambiatori di calore e condensatore

Il FP, è arrivato al Centro Ricerche Casaccia nel marzo 2008 ed è stato avviato per la prima volta in data 17 aprile 2008. Nel mese di ottobre 2008 è stato prelevato dalla *hall* tecnologica e portato presso i laboratori di Exergy FC per essere integrato con lo *stack* di celle a combustibile di tipo PEFC da 1 kWe. Nel mese di giugno 2009 è stato riconsegnato in Enea come sistema elettrico integrato FP/FC per proseguire la sperimentazione.

#### **4 STACK DI POLYMER ELECTROLYTE FUEL CELLS**

L'attività si proponeva l'obiettivo di migliorare la tecnologia di *stack* attualmente disponibile, sia dal punto di vista della durata che delle soluzioni adottate per i componenti e l'ingegneria, dall'altro di studiare configurazioni innovative di cella, promettenti sia per semplificare la gestione dello *stack* che per consentire il suo impiego in applicazioni specifiche. Tra le azioni principali previste vi era la progettazione, la realizzazione con tecnologie di fabbricazione innovative e la caratterizzazione di componenti di cella (piatti, tenute, elettrodi) di superficie elevata (> 500 cm<sup>2</sup>).

Lo sviluppo di uno *stack* con area attiva di dimensioni superiori a  $500 \text{ cm}^2$  è funzionale a sistemi di FC capaci di produrre sempre maggiore potenza. Con gli attuali livelli di densità di corrente che è possibile raggiungere nei MEA (*Membrane Electrode Assembly*, assemblato Membrana/Elettrodo,  $800 \text{ mA/cm}^2$  a  $0,65 \text{ V}$  per elemento), uno *stack* da soli 20 elementi con area attiva di tali dimensioni potrebbe fornire più di  $5 \text{ kW}$ ; mentre uno *stack* da 100 elementi fornirebbe  $26 \text{ kW}$ . Sono stati, quindi, affrontati una serie di aspetti che diventano essenziali nell'ottica di una corretta progettazione elettrochimica, fluidodinamica, elettrica e meccanica, e che sono esasperati dall'aumentare delle potenze e delle geometrie in gioco.

#### 4.1 Scelta dei piatti

Le sperimentazioni effettuate precedentemente sul materiale da utilizzare per la costruzione dei piatti, hanno portato ad optare verso l'impiego di un compound di grafite e resina epossidica che risulta avere caratteristiche idonee al tipo di applicazione. La variazione del FP ha comportato l'utilizzo di un diverso *flow-field* dei piatti. La nuova configurazione prevede l'impiego di piatti con superficie attiva di  $278 \text{ cm}^2$ , in luogo dei piatti da  $325 \text{ cm}^2$  (RT/2011/5/ENEA "Sperimentazione di Fuel Processor per la produzione di idrogeno alimentati a GPL", aut. Giannini, Calò). La variazione dei piatti ha chiaramente modificato l'architettura dello *stack*. La diminuzione della superficie avrebbe comportato una richiesta di aumento della densità di corrente, abbassando notevolmente il rendimento elettrico di cella. Strategicamente si è, quindi, scelto di raggiungere la potenza di  $1 \text{ kWe}$  utilizzando uno *stack* con 32 celle, numero decisamente maggiore rispetto al precedentemente. Ciò comporta un aumento della tensione dello *stack* con conseguente diminuzione della densità di corrente. Il numero di celle è stato scelto in modo da evitare l'utilizzo del DC/DC. Ciò rende lo *stack* direttamente interfacciabile con inverter di tipo commerciale aumentando ulteriormente rendimento elettrico globale del sistema.

#### 4.2 Dimensionamento di massima dello *stack*

Per effettuare la stima della curva caratteristica tensione-corrente, si sono prese in considerazione le prove effettuate con gas riformato su uno *stack* con piatti da  $325 \text{ cm}^2$ . La variazione di tensione dovuta al diverso *flow field* risulta trascurabile ai valori di densità di corrente di lavoro. Dall'analisi emerge che l'utilizzo di riformato, a  $0,25 \text{ A/cm}^2$  e su un piatto da  $278 \text{ cm}^2$ , comporta una perdita di potenza di circa  $100 \text{ W}$ , cioè circa il 7% del totale. La tensione dello *stack* varia da circa  $21/23 \text{ V}$  ai circa  $31,2 \text{ V}$  a circuito aperto. Questi valori devono essere verificati da una serie di prove sperimentali programmate da effettuare sullo *stack* con piatti da  $278 \text{ cm}^2$ . Le curve caratteristiche del sistema da  $278 \text{ cm}^2$  con diverse alimentazioni di combustibile sono rappresentate in Fig. 6. Le caratteristiche del combustibile sono: 65%  $\text{H}_2$ , 35%  $\text{CO}_2$ , 20 ppm  $\text{CO}$ .

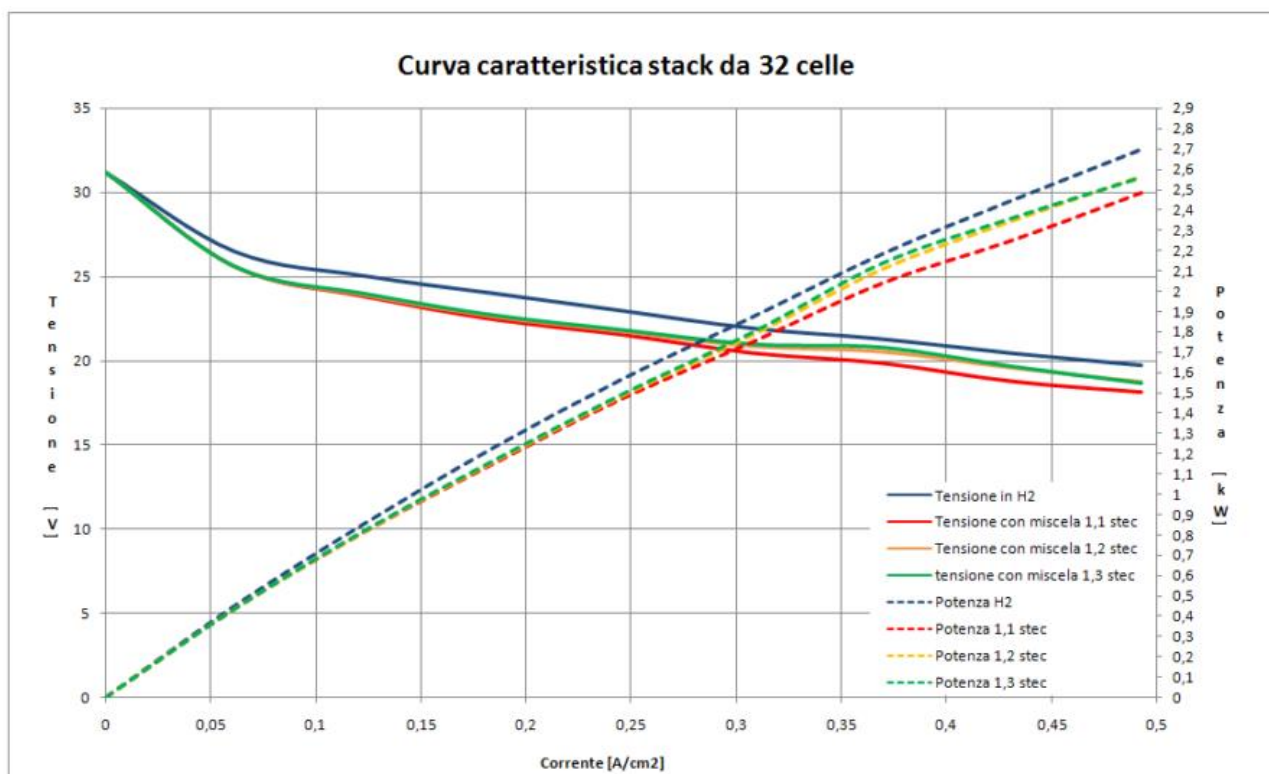


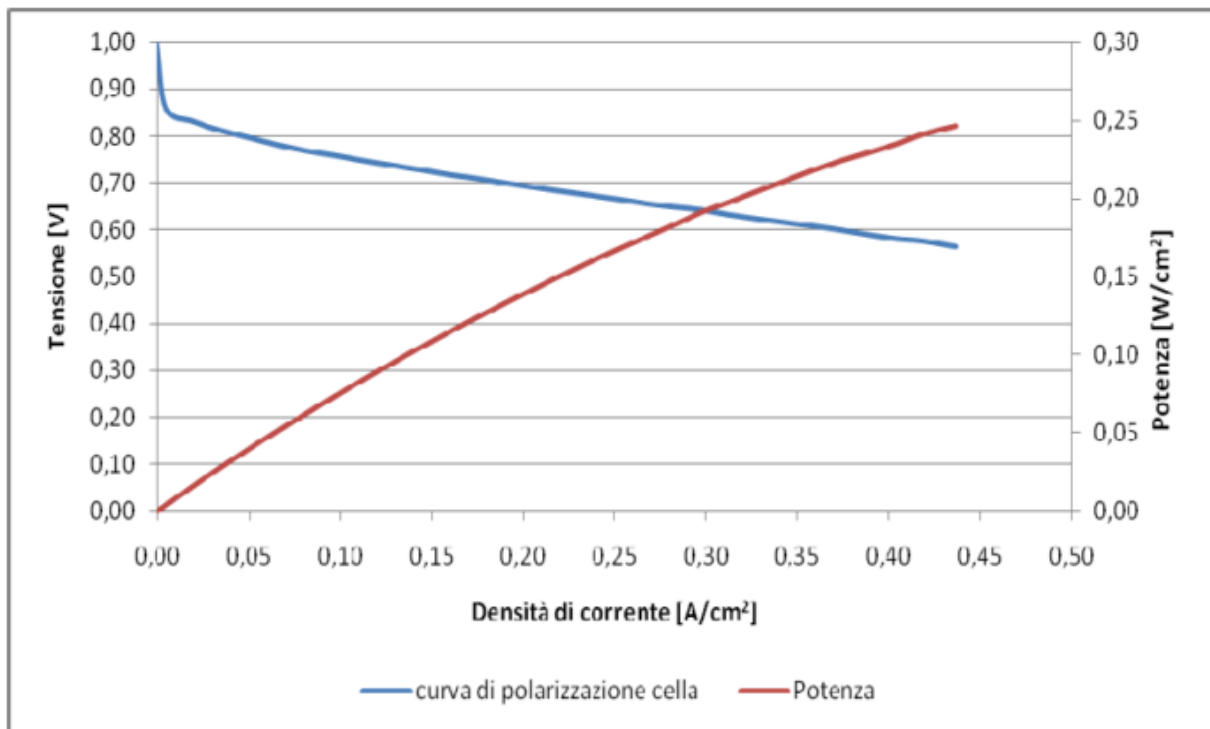
Figura 6 - Caratteristiche dello stack da 278 cm<sup>2</sup> con diverse alimentazioni di combustibile

H <sub>2</sub> 1,2 stec			miscela gas 1,1 stec			miscela gas 1,2 stec			miscela gas 1,3 stec		
Corrente	Tensione	Potenza	Corrente	Tensione	Potenza	Corrente	Tensione	Potenza	Corrente	Tensione	Potenza
[A]	[V]	[W]	[A]	[V]	[W]	[A]	[V]	[W]	[A]	[V]	[W]
0,00	31,20	0,00	0,00	31,20	0,00	0,00	31,20	0,00	0,00	31,20	0,00
17,11	26,48	0,45	17,11	25,60	0,44	17,11	25,60	0,44	17,11	25,60	0,44
34,22	25,04	0,86	34,22	23,84	0,82	34,22	23,92	0,82	34,22	24,00	0,82
51,32	24,00	1,23	51,32	22,48	1,15	51,32	22,64	1,16	51,32	22,72	1,17
68,43	22,96	1,57	68,43	21,56	1,48	68,43	21,76	1,49	68,43	21,84	1,49
85,54	21,92	1,88	85,54	20,48	1,75	85,54	20,88	1,79	85,54	21,00	1,80
102,65	21,28	2,18	102,65	19,88	2,04	102,65	20,56	2,11	102,65	20,80	2,14
119,75	20,44	2,45	119,75	18,80	2,25	119,75	19,60	2,35	119,75	19,68	2,36
136,86	19,72	2,7	136,86	18,16	2,49	136,86	18,76	2,57	136,86	18,68	2,56

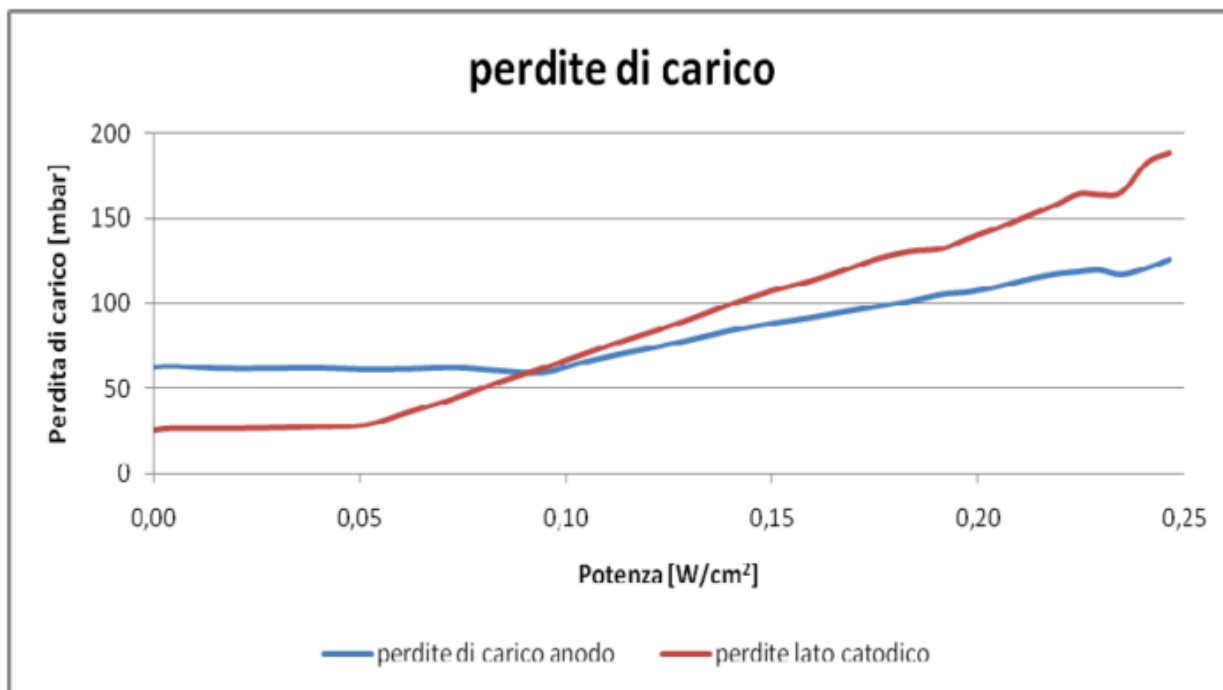
Figura 7 - Valori rilevati nella sperimentazione con gas riformato e con diversi valori di eccesso anodico

### 4.3 Scelta del blower

Per individuare il *blower* adatto all'applicazione, risulta indispensabile valutare le perdite di carico che si hanno al catodo. A tal fine si sono analizzate delle sperimentazioni effettuate sul piatto da 325 cm<sup>2</sup>, e si è assunto che la perdita di carico stimata per il piatto 278 cm<sup>2</sup> sia la stessa e si sono calcolate le caratteristiche di funzionamento della soffiante. I risultati delle prove sperimentali vengono rappresentati nelle seguenti figure.



**Figura 8** - Curva caratteristica cella, prove effettuate con H<sub>2</sub> puro lambda 1,4 Dew point = 62 °C, UR anodica=70%, UR catodica=100%.



**Figura 9** - Perdite di carico piatto, prove effettuate con H<sub>2</sub> puro lambda 1,4 Dew Point = 62 °C, UR anodica=70%, UR catodica =100%.

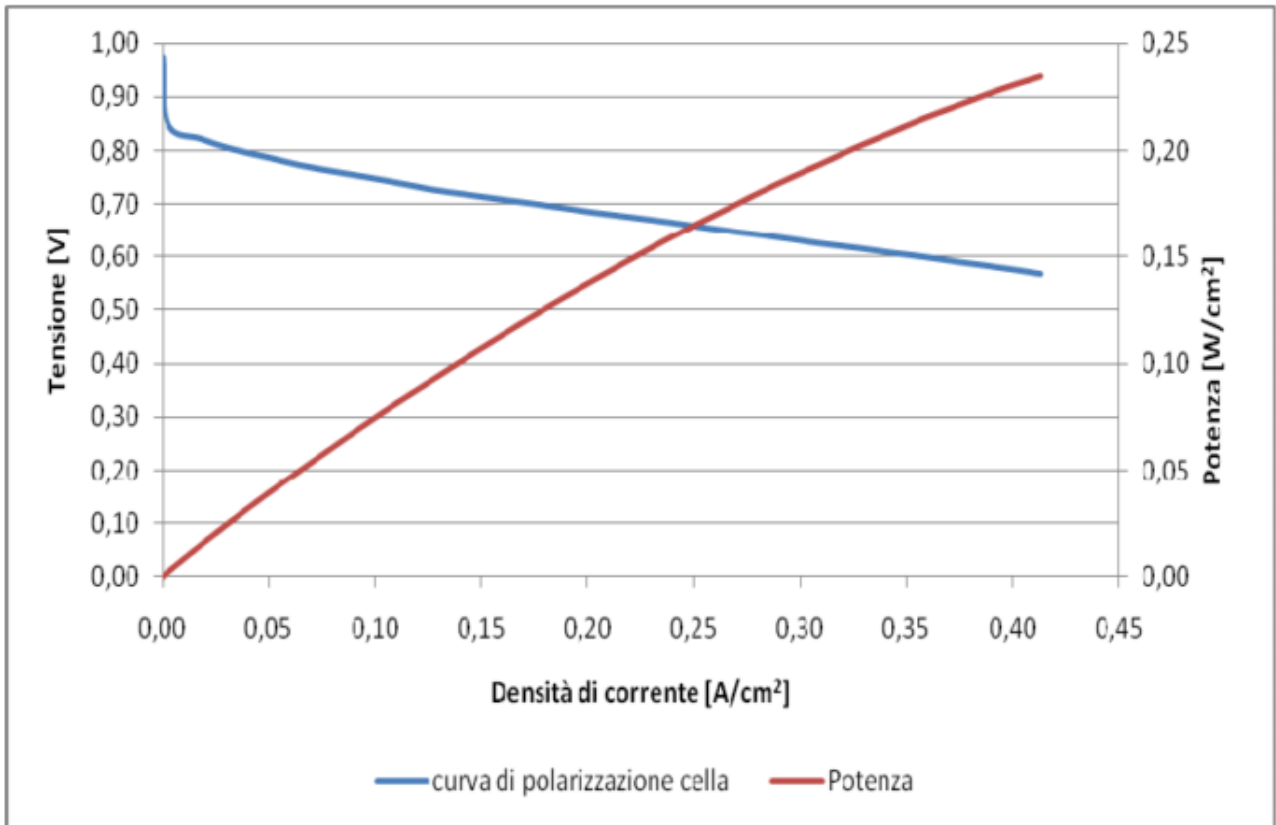


Figura 10- Curva caratteristica cella, prove effettuate con idrazoto 1,4 Dew point = 62 °C, UR anodica=70%, UR catodica =100%.

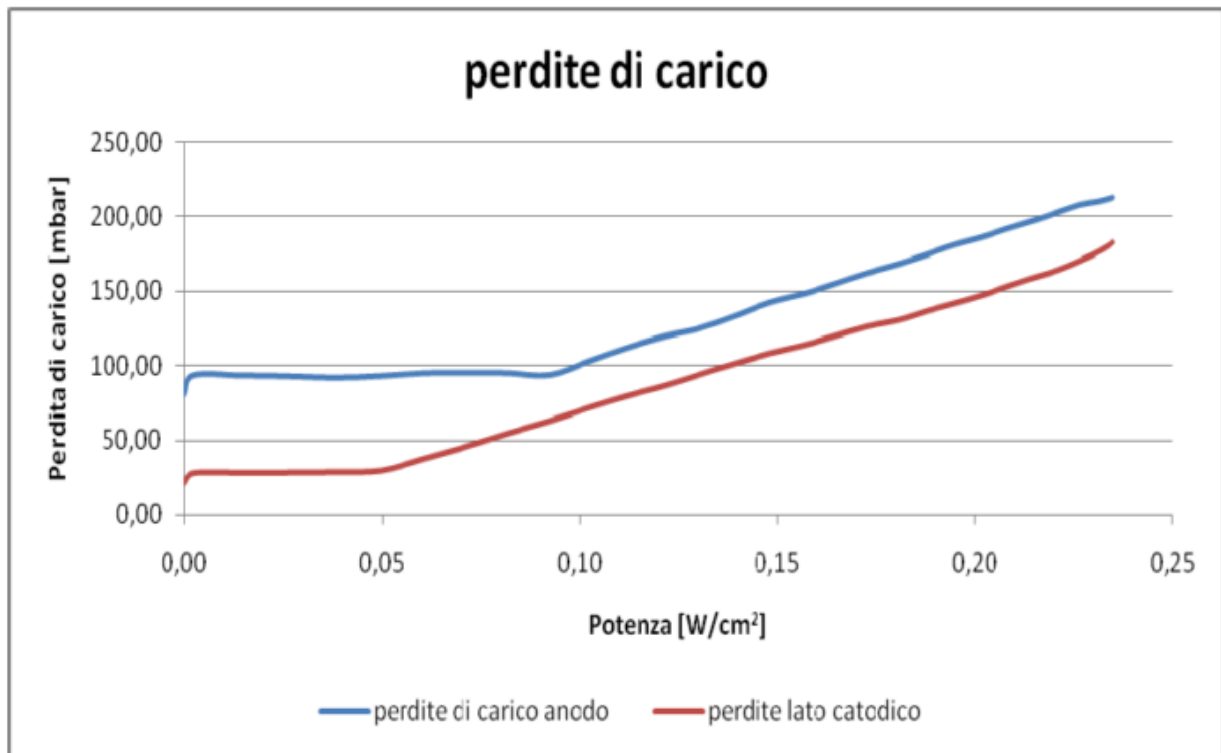


Figura 11 - Perdite di carico piatto, prove effettuate con idrazoto 1,4 Dew point = 62 °C, UR anodica=70%, UR catodica=100%.

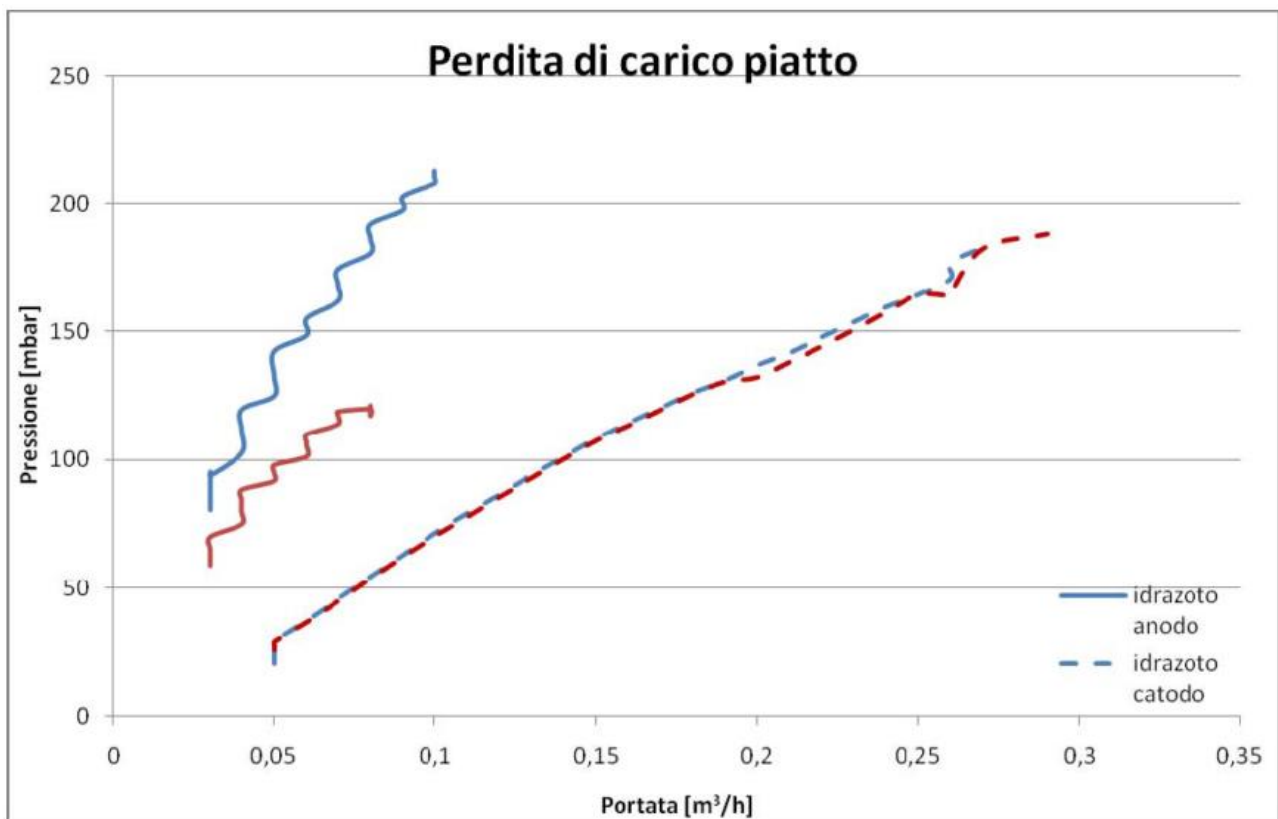


Figura 12 - Perdite di carico all'anodo e al catodo nelle diverse condizioni di alimentazione

Le prestazioni con idrogeno puro indicano che la perdita di carico dal lato anodo rimane costante a 60 mbar fino ad un valore di circa 150 mA/cm<sup>2</sup>, superato il quale cresce in maniera che in prima approssimazione si può considerare lineare. Lo stesso avviene per il lato catodo dove si ha una perdita di carico che si mantiene intorno ai 30 mbar fino a un valore di densità di corrente di 80 mA/cm<sup>2</sup> per poi crescere anche questa con andamento simile al lineare, ma con una derivata maggiore rispetto al caso precedente (Fig. 12). L'impiego di idrazoto aumenta, come era prevedibile, il valore di perdita di carico anodica. Nella fase iniziale l'incremento di perdita di carico, rispetto al caso precedente, è di circa 50 mbar all'anodo, questo valore aumenta all'aumentare della portata. Dall'analisi delle sperimentazioni si ritiene di utilizzare un blower che abbia dei valori di portata di circa 5Nm<sup>3</sup>/h e dei con valori di pressione di 115÷150 mbar.

#### 4.4 Air bleeding

Alcune sperimentazioni effettuate dimostrano come miscelare aria all'anodo, già anche soltanto 1% in termini di volume del combustibile alimentato, consente di neutralizzare l'effetto di 50 ppm di CO in ingresso. Non si sono effettuate però delle prove di durata sulla membrana per l'effetto di questa reazione di combustione che avviene dalla parte dell'anodo e che vede l'ossidazione del monossido di carbonio.

Pertanto, tra le prove programmate, si sono inserite anche delle prove che mirano a verificare la durata di uno *stack* sottoposto ad *air bleeding* nella misura del 1% in volume.

## 4.5 Calcolo della coppia di serraggio

La coppia di serraggio rappresenta un aspetto critico dell'assemblaggio di uno *stack*. Aumentando la coppia di serraggio si diminuiscono le resistenze di contatto tra il piatto ed il MEA. Il limite superiore del valore di coppia è funzione della resistenza del MEA al *crossover*. L'aumento della forza applicata comporta una progressiva diminuzione della lunghezza dello *stack* che tende asintoticamente ad un valore. Sono state effettuate delle prove su due *stack* da 278 cm<sup>2</sup>, le curve caratteristiche ottenute sono illustrate nelle seguenti figure.

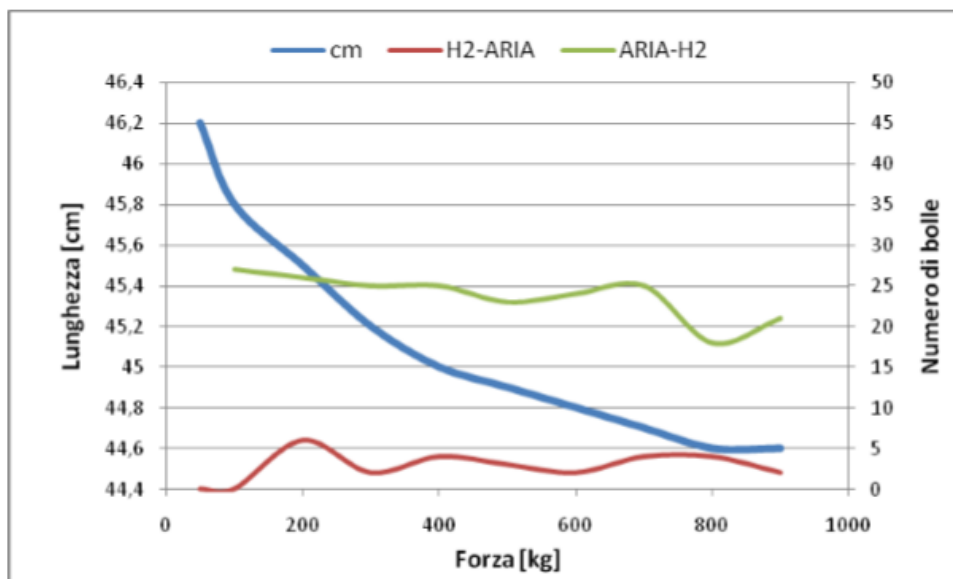


Figura 13 - Curva serraggio, prova *crossover* a 300 bar

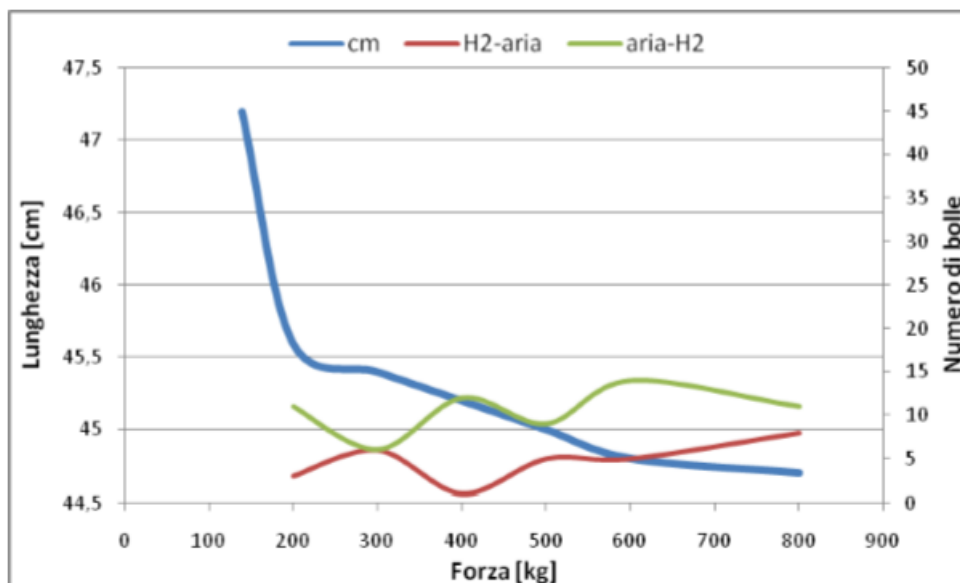


Figura 14 - Curva serraggio, prova *crossover* a 250 bar

Dalle prove effettuate si può notare che imprimendo una forza alla pressa si ha una sensibile riduzione della lunghezza, superati i 800 kg si ottiene la variazione di lunghezza praticamente nulla. Dopo l'applicazione di un carico minimo che riesca a garantire l'aderenza delle guarnizioni, si nota come i fenomeni di crossover rimangono praticamente indipendenti dalla forza applicata, ma dipendono soltanto dal valore di pressione. Il valore limite è rappresentato dalla forza di serraggio che danneggia la membrana. Sono state effettuate delle prove a 300 bar e 250 bar e sono state rilevate un numero di bolle maggiore all'aumentare della pressione. Con la tipologia di piatti utilizzati abbiamo riscontrato un idoneo valore di resistenza di contatto dello *stack* già con 800 kg, pertanto si ritiene che questo valore sia quello ottimale per garantirne il buon funzionamento.

## **5 SISTEMA INTEGRATO *FUEL PROCESSOR/POLYMER ELECTROLYTE FUEL CELL*: ORION 1 CHP**

Tale sistema è un prototipo costituito dall'integrazione del FP APS 1000, alimentato a GPL e progettato e realizzato da Helbio SA (già testato nei laboratori ENEA del C.R. Casaccia nel periodo giugno-settembre 2008 (RT/2011/5/ENEA), con uno *stack* di PEFC da 1 kWe (32 celle da 278 cm<sup>2</sup>) prodotto da Exergy FC.

Il FP APS 1000 integrato con lo *stack* di PEFC (Orion 1 CHP, Morphic) è rientrato nei laboratori ENEA del C.R. Casaccia il 22 giugno del 2009 (fig.15).

Nell'allegato B viene riportato un P&ID del sistema integrato.

La campagna sperimentale è stata effettuata nel periodo luglio 2009-dicembre 2009. Ulteriori prove, per lo studio della configurazione *stand-alone*, sono state realizzate a febbraio e marzo 2010.

Il sistema è stato sempre alimentato con GPL di tipo commerciale, ad eccezione delle prove della prima campagna sperimentale (alimentazione con solo propano).

Lo scopo dell'attività è stato quello di testare l'intera unità di generazione elettrica Orion 1 CHP.



**Figura 15** – Sistema integrato FP/FC ORION 1 CHP

### 5.1 Descrizione della stazione di prova

La stazione di prova è stata allestita nella *hall* tecnologica dell'edificio C-47 del C.R. Casaccia, utilizzando allo scopo un'area destinata specificamente alla sperimentazione di sistemi di produzione di idrogeno a partire da combustibili fossili gassosi.

Nei primi mesi del 2008 si è proceduto all'adeguamento e completamento (giugno 2008) della stazione di prova realizzata per il FP Helbio "APS 1000" (RT/2011/5/ENEA).

I dispositivi utilizzati in questa fase della sperimentazione sono stati gli stessi utilizzati per la sperimentazione del solo FP per l'analisi e l'acquisizione dei dati:

- Sistema di analisi:
  - ABB Advance Optima URAS 14 (*detector* a raggi infrarossi) per CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>
  - ABB Advance Optima Caldos 15 (*detector* a conducibilità termica) per H<sub>2</sub>
  - ABB Advance Optima cella elettrochimica per O<sub>2</sub> ;
- Acquisizione dati: Yokogawa Datum Y-XL 100, per registrazione dei segnali provenienti dal sistema analisi;

- Acquisizione dati: Yokogawa Datum CX 2000 per:
  - Portata del gas riformato (dal MFM Bronkhorst)
  - Peso della bombola del GPL (rilevato in continuo mediante una bilancia collegata)
  - Peso del recipiente dell'acqua demineralizzata (rilevato in continuo mediante una bilancia collegata)
  - Power-Meter Hameg HM8115-2 per la misura della potenza assorbita dagli ausiliari e del relativo fattore di potenza.

Nel mese di novembre 2008, in previsione delle attività sperimentali del 2009, è stato collaudato e testato il carico elettronico (CN/ELA 1500/40/200D) da inserire a valle dello *stack* di FC. Tale strumento è in grado di simulare l'assorbimento di potenza elettrica in corrente continua da parte delle utenze.

Nel periodo fine giugno-luglio 2009 è stato realizzato l'adeguamento della stazione di prova (schema semplificato in fig. 16):

- ricostruzione dei collegamenti e dei circuiti;
- realizzazione dei circuiti di uscita anodica e catodica dallo *stack*;
- installazione del carico elettronico;
- installazione della bilancia per l'acqua demineralizzata e della relativa acquisizione dati;
- realizzazione dell'acquisizione dati dalle batterie e dal carico elettronico;
- installazione di ulteriori canali di acquisizione;
- acquisizione e duplicazione dati dallo *stack* attraverso il software Penta con computer dedicato.

Il primo avviamento è stato effettuato il 13 luglio 2009, con il solo intento di testare la nuova stazione di prova così modificata.

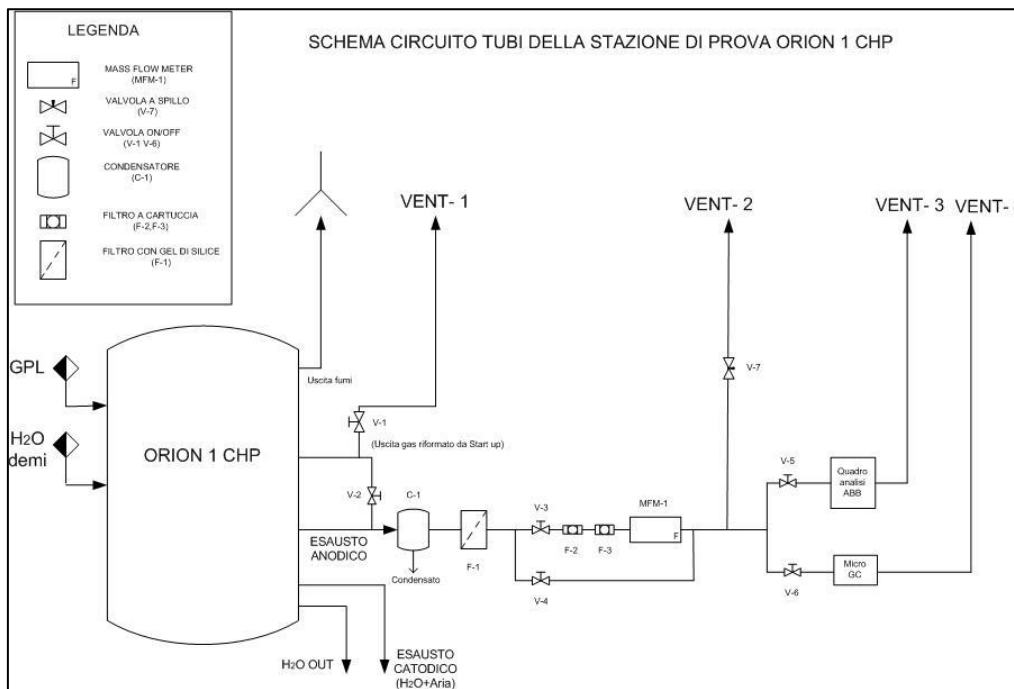


Figura 16 – Schema semplificato della stazione di prova

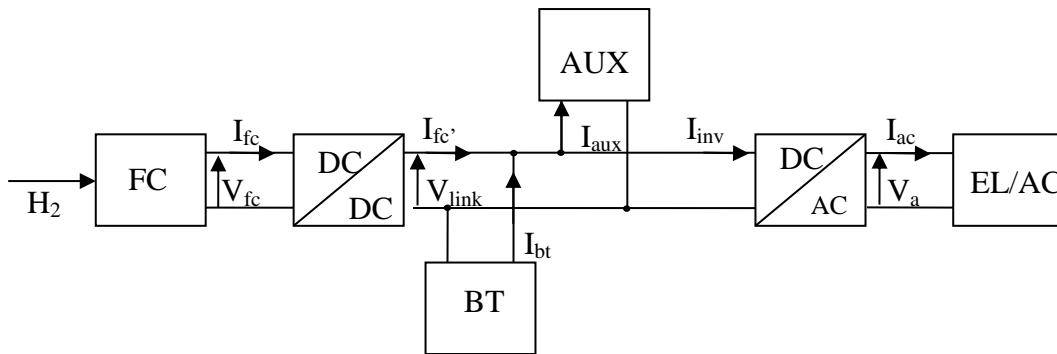


Figura 17 – Ingressi ed uscite al sistema integrato

In ingresso al sistema integrato (fig. 17) si trovano gli attacchi per l'acqua demineralizzata, per il GPL e le connessioni per la corrente alternata (ausiliari del FP) e la corrente continua (ausiliari dello *stack* di FC). In uscita si distinguono le connessioni per la corrente alternata (monofase 220 V) e gli scarichi dell'acqua del FP e dello *stack* di FC.

Lo *stack* di PEFC è stato progettato per lavorare in modo indipendente dal FP ed è stato pensato per alimentare dei carichi monofase a 220 V (la rete elettrica di una abitazione): l'idea che si è seguita (vedi schema elettrico-funzionale fig. 18) è stata quella di alimentare tramite lo *stack* un inverter della potenza di 2

kW, che trasforma un ingresso in corrente continua (DC) di 24 V in una uscita di corrente alternata (AC) monofase da 220 V e 50 Hz.



**Figura 18** – Schema elettrico funzionale del sistema Orion 1CHP

Dove,

- FC: *stack* di FC;
- BT: pacco batterie;
- AUX: ausiliari di FP e di FC;
- DC/DC: condizionatore di potenza;
- DC/AC: inverter (al carico);
- EL-AC: carico elettronico in corrente alternata (utenza).

Nello schema precedente è presente anche un pacco batterie (BT) al Pb, esso assolve le seguenti funzioni:

- 1) Alimenta gli ausiliari per lo *start-up* del sistema (quando lo *stack* non è ancora avviato),
- 2) Nel caso in cui venga interrotto il funzionamento dello *stack*, alimenta l'inverter per garantire continuità di alimentazione dei carichi,
- 3) Nel caso di un sovraccarico improvviso affianca lo *stack* nell'alimentazione del carico permettendo a quest'ultimo di operare in regime poco variabile,
- 4) Le batterie funzionano anche da accumulo di energia caricandosi se lo *stack* eroga potenza.

In altri termini il funzionamento del sistema è il seguente: finchè lo *stack* non è avviato il pacco BT alimenta il carico elettrico (DC/AC) e gli ausiliari, una volta che lo *stack* viene alimentato la tensione di *Link* ( $V_{link}$ ) sale e le BT divengono a loro volta un carico, riprendendosi l'energia spesa precedentemente. Nel caso in cui si abbia un improvviso sovraccarico o un malfunzionamento dello *stack* la  $V_{link}$  scende e le BT riprendono ad erogare energia. In questo modo viene assicurata la continuità all'alimentazione del carico.

## 6 ATTIVITA' SPERIMENTALE NEL PERIODO 2009-2010

### 6.1 Interventi di tipo elettrico effettuati sul sistema Orion 1 CHP

Nel normale funzionamento di base durante lo *start-up* gli ausiliari dello *stack* (ventole, convertitori, etc.) assorbono circa 30 W alla corrente massima di 2 A, per cui le BT da collegare al sistema potrebbero avere una piccola capacità (es. 10 Ah); però, la necessità di alimentare un carico di 2000 W per tempi non definiti a priori ha suggerito di adottare n. 2 batterie da 70 Ah, in grado di erogare 7 A per un tempo di 10 ore ciascuna.

Lo schema elettrico del FP non è stato fornito in forma completa: in ogni caso l'ingresso in alternata (220 V AC) va ad alimentare una coppia di resistenze da 450 W ciascuna necessarie per portare in temperatura il sistema, ed un convertitore AC/DC che fornisce in uscita una tensione continua di 24 V (necessaria a far funzionare il sistema di controllo, composto da un PLC, uno schermo *touch screen*, ed attuatori come relè, pompe, etc.).

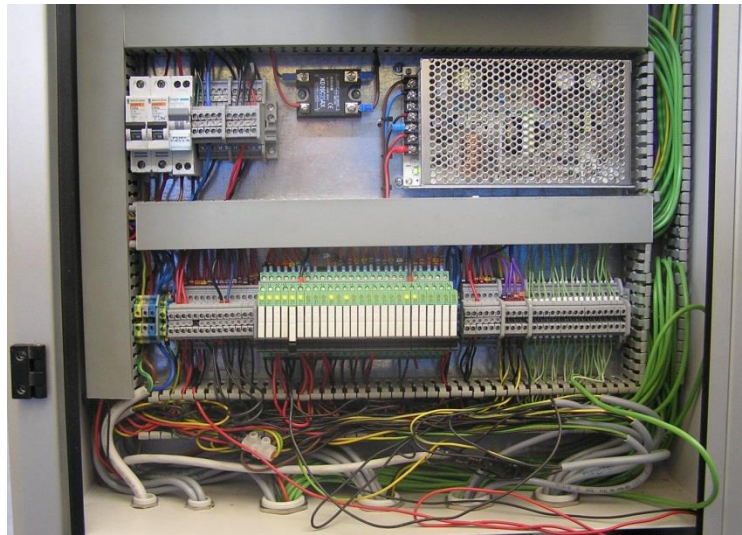
La potenza massima assorbita dal FP, lato AC, è di 900 W.

Per le necessità dell'utenza Exergy ha fornito un sistema chiuso: l'utente connette le alimentazioni e spinge un tasto di *START*, per il resto non può interagire con il software ma semplicemente leggere i valori correnti dei parametri di funzionamento. A questo scopo è previsto che il sistema parta solo con lo sportello che ospita l'interfaccia di controllo chiuso. I tecnici di Exergy ed Helbio hanno invece la possibilità di intervenire in manuale durante il processo (in collegamento remoto). La verifica della chiusura dello sportello avviene tramite un relè ad esso collegato (fig. 19):



Figura 19 - Relè di verifica chiusura porta

Tutti i contatti dei relè vengono riportati su un pannello frontale; cortocircuitando il relè dello sportello riportato in questo pannello è possibile accedere al sistema: tale intervento si è reso necessario per poter operare anche manualmente.

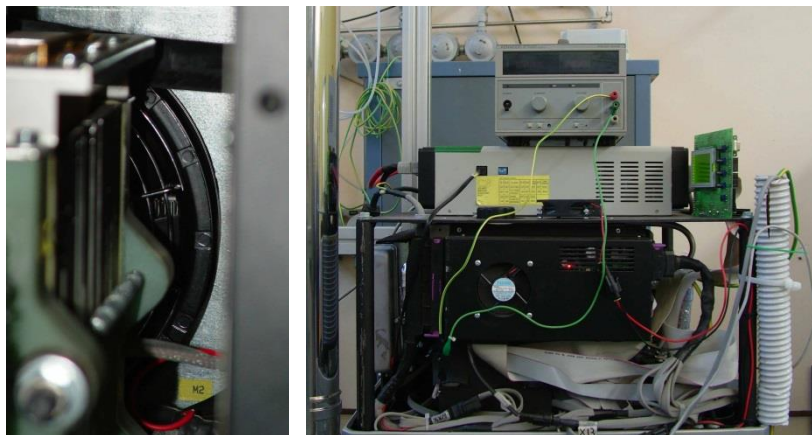


**Figura 20** - Pannello elettrico frontale del *Fuel Processor*

Altra modifica importante eseguita dagli operatori Enea è stata l'alimentazione separata della ventola di raffreddamento del radiatore: una pompa fa circolare l'acqua di raffreddamento nella FC, da dove preleva calore che viene smaltito in un radiatore, in caso di necessità per raffreddare ulteriormente il liquido interviene una ventola montata sullo stesso.

La sperimentazione ha messo in evidenza il fatto che la ventola non interviene mai, provocando quindi il surriscaldamento del liquido e non è possibile modificare le impostazioni del software di comando della stessa. Si è quindi pensato di approfittare di questo problema per migliorare tutta la concezione del sistema, alimentando la ventola a parte e prevedendo per essa un funzionamento a potenza variabile in funzione del calore da smaltire.

Per far ciò è stata individuata l'alimentazione della ventola e la si è collegata ad un alimentatore esterno (fig. 21):



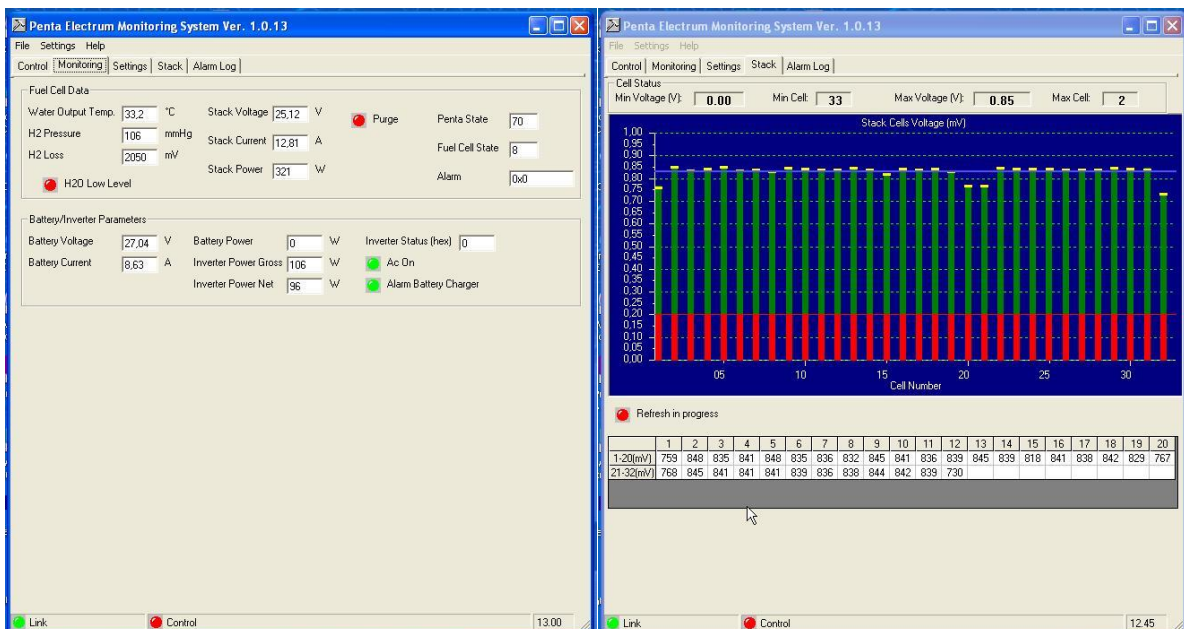
**Figura 21** - Ventola del radiatore e collegamento ad un alimentatore a tensione/corrente variabile

## 6.2 Sistema di acquisizione dati

Per poter funzionare in modo autonomo il controllore del sistema deve acquisire le misure di una serie di grandezze, in particolare esso esegue le seguenti misure:

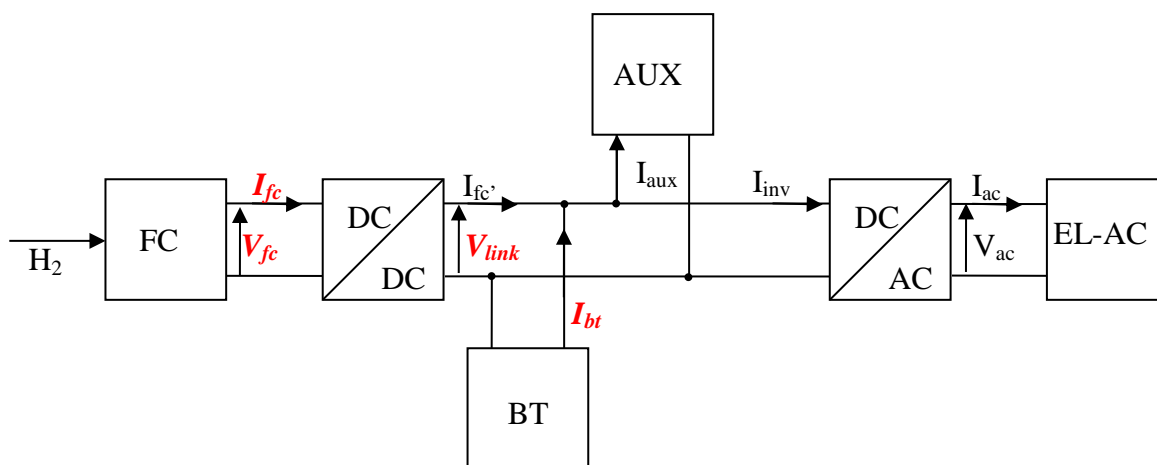
$$V_{fc}, I_{fc}, V_{bt} (V_{link}), I_{bt}, I_{link} (I_{bt} + I_{fc})$$

Il sistema considera come potenza assorbita dal carico elettrico il prodotto  $V_{link} * I_{link}$ , inglobando quindi in essa sia le perdite della conversione DC/AC che la potenza assorbita dagli ausiliari. Oltre a questo esso esegue la misura delle tensioni parziali di cella e di altri dati, il tutto viene presentato dal software *Penta Electrum Monitoring System* con delle schermate riassuntive (fig. 22):



**Figura 22** - Dati forniti dal sistema di controllo dello stack di FC: Potenze globali, Temperature di funzionamento e tensioni parziali dello stack

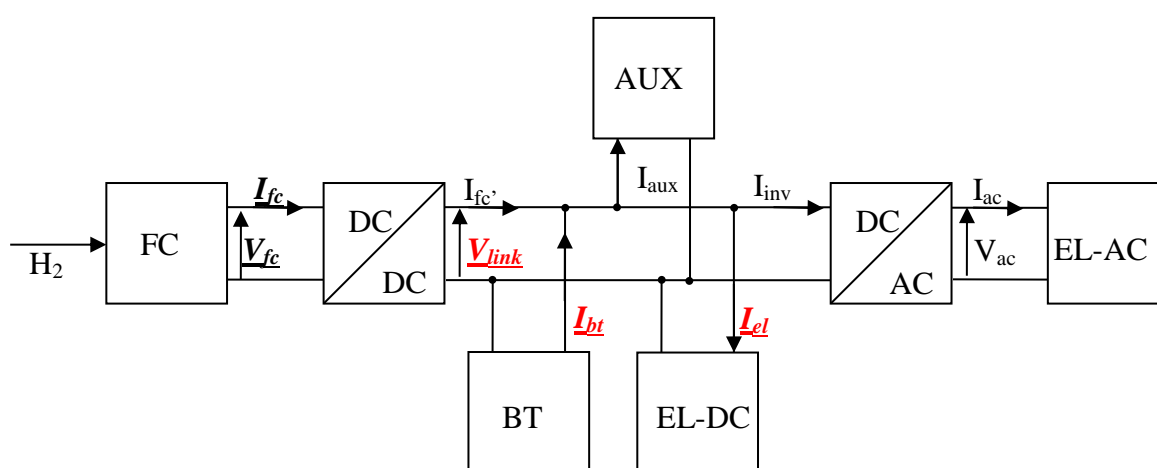
La figura seguente (fig. 23) mostra, ad eccezione delle tensioni parziali di cella, indicandole in corsivo, le grandezze elettriche monitorate da Exergy:



**Figura 23** - Grandezze monitorate dal sistema di controllo

Queste misure vanno benissimo per la gestione della FC ma non sono adatte per eseguire una corretta valutazione energetica delle prestazioni del sistema, infatti non si conosce né la precisione delle stesse, né il tempo di campionamento o il tipo di acquisizione dati utilizzata, ed inoltre non si dispone della lettura diretta della potenza in alternata assorbita dal carico. Per questi motivi il sistema è stato modificato dagli operatori Enea integrando altri componenti.

Ad esempio per poter tracciare una curva di polarizzazione della FC si è pensato di inserire un carico elettronico a valle del convertitore DC/DC. Il carico non è stato inserito in parallelo alla FC stessa ed al convertitore DC/DC ma, per motivi di ordine pratico (accessibilità del sito), ma in serie a quest'ultimo. L'inserimento del carico a valle del convertitore DC/DC non costituisce un problema: infatti regolando il carico si può comunque pilotare bene, seppure in modo indiretto, la corrente della FC. Con l'inserimento del carico ed il collegamento delle batterie si è provveduto a rilevare una prima serie di grandezze elettriche in modo autonomo dal sistema di controllo: si tratta di  $V_{link}$ ,  $I_{bt}$  ed  $I_{el}$  (fig. 24).

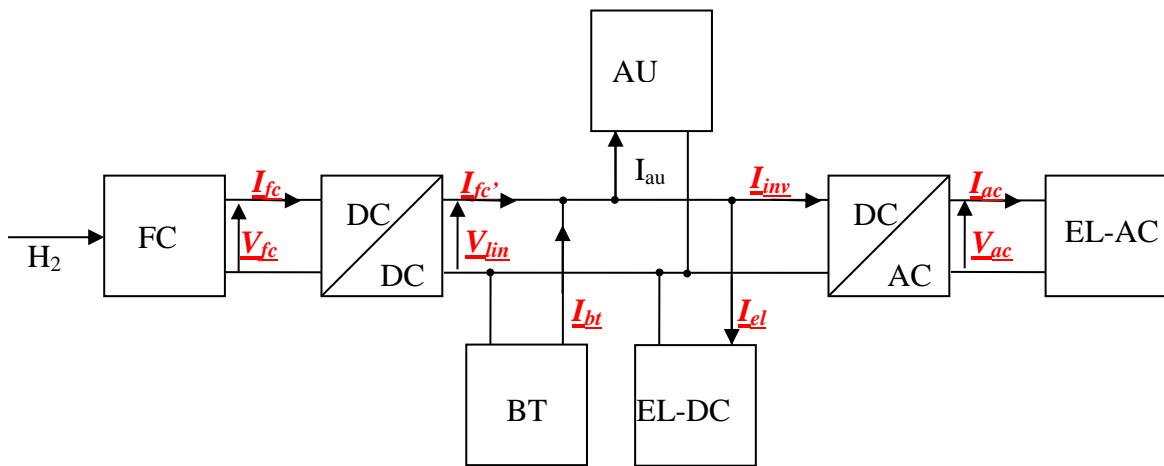


**Figura 24** - Inserzione del carico elettronico e grandezze monitorate dal sistema di acquisizione Enea (in corsivo sottolineato)

La  $I_{bt}$  di figura è stata acquisita prima tramite una sonda ad effetto *Hall* e successivamente tramite uno *shunt* di corrente (uno *shunt* è una resistenza elettrica che devia attraverso di sé una parte più o meno consistente della corrente circolante in un circuito principale a cui è posto in parallelo), dal momento che la corrente massima aspettata per la batteria è di circa 35 A si è scelto un fondo scala di 50 A.

Con il sistema così modificato è stato possibile fare delle misure a regime (stazionario) di tensione e corrente della FC, in modo da poterne tracciare, ad esempio, la curva caratteristica.

Il limite di questo approccio è che la tensione e la corrente della FC sono quelle misurate dal sistema di controllo di Exergy del quale non è nota la precisione di misura, inoltre non si ha la possibilità di mettere immediatamente in relazione queste grandezze con la portata di idrogeno in ingresso alla FC. Si è quindi deciso di ampliare il sistema di acquisizione esterna rilevando anche queste grandezze tramite uno *shunt* di precisione per la corrente e la lettura diretta della tensione per la  $V_{fc}$ . (fig.25).



**Figura 25** - Sistema di acquisizione definitivo

Con i versi adottati in figura si ha che:

$$P_{fc} = V_{fc} * I_{fc} \quad P_{fc} > 0 = \text{erogata (unica condizione possibile)}$$

$$P_{bt} = V_{bt} * I_{bt} = V_{link} * I_{bt} \quad P_{bt} > 0 \text{ se erogata}$$

$$P_{el} = V_{el} * I_{el} = V_{link} * I_{el} \quad P_{el} > 0 \text{ se assorbita (unica condizione possibile)}$$

$$P_{aux} = V_{aux} * I_{aux} = V_{link} * I_{aux} \quad P_{aux} > 0 \text{ se assorbita (unica condizione possibile)}$$

$$P_{ac} = V_{ac} * I_{ac} * \cos(\varphi) \quad \text{essendo } \varphi \text{ l'angolo elettrico tra le due grandezze}$$

$$P_{ac} > 0 \text{ se assorbita (unica condizione possibile)}$$

Le potenze entranti sono  $P_{fc}$  e  $P_{bt}$ , le uscenti  $P_{el}$  e  $P_{ac}$ , tutte misurate dall'acquisizione: con questa configurazione è quindi possibile fare il bilancio energetico del sistema senza entrare nel contesto degli scambi e perdite interni ad esso.

Per caratterizzare il sistema è possibile partire dalla considerazione che il convertitore DC/DC posto subito a valle dello *stack* di FC opera in modo da avere una tensione di uscita fissa al variare di quella di ingresso, e quindi trasforma le correnti e tensioni di cella secondo la legge:

$$P_{fc} = V_{fc} * I_{fc} = (V_{link} * I_{fc}') / \eta_{dc/dc}$$

Dove è possibile porre:

$$P_{link} = V_{link} * I_{fc}' \text{ e di conseguenza } P_{fc} = V_{fc} * I_{fc} = P_{link} / \eta_{dc/dc}$$

Con  $\eta_{dc/dc}$  rendimento del convertitore DC/DC.

Riconsiderando le grandezze definite, vale la relazione:

$$I_{fc}' + I_{bt} = I_{aux} + I_{el} + I_{inv}$$

$$\text{Da cui } I_{aux} = I_{fc}' + I_{bt} - (I_{el} + I_{inv})$$

La potenza  $P_{ac}$  viene misurata direttamente in alternata a valle dell'inverter, ma anche a monte dello stesso tramite la misura di  $I_{inv}$ , di conseguenza:

$$P_{ac} = (V_{link} * I_{inv}) / \eta_{dc/ac}$$

Per misurare le correnti elettriche sono state inserite delle resistenze di precisione, tarate in modo che al fondo scala di 50 A corrispondano 60 mV.

La fig. 26 mostra i punti inserzione delle resistenze nel circuito delle batterie e della FC:



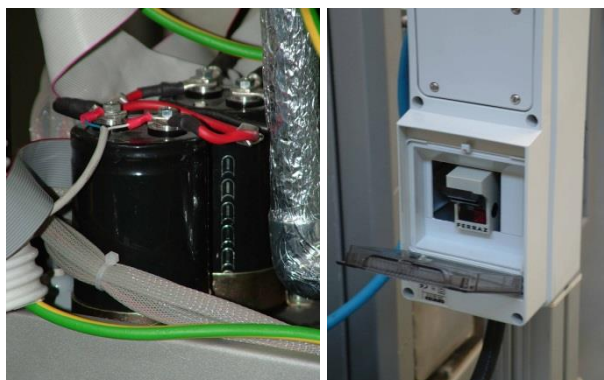
**Figura 26** - Collegamenti shunt di misura a) Batterie, b) Cella, c) Dettaglio punto di prelievo dallo *stack* di FC

Tutti i segnali vengono riportati ad un sistema di acquisizione della Yokogawa (fig. 27). Tale sistema DQ Station CX2000 è compatto (monitor LCD da 10.4 pollici) e non solo effettua una misura delle grandezze, ma opera anche il controllo delle variabili di processo. Può operare con controlli di tipo PID interni oppure controlli esterni (anche a cascata). E' dotato di 20 canali di misura e 6 canali per il controllo. Gli input di misura possono essere di tipo DCV (ingressi in tensione con range da 20 mV a 50 V), TC (vari tipi di termocoppie), RTD (sonde al platino, Pt100). Gli output di controllo sono 4-20 mA, 1-5 V e relè di contatto. L'andamento delle variabili di processo può essere visualizzato sullo schermo sia con barre che forniscono il valore istantaneo che con grafici a onde.



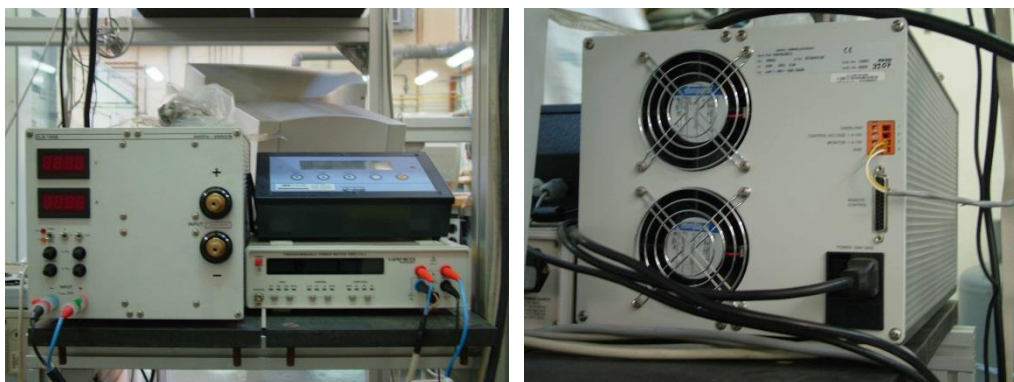
**Figura 27** - Sistema di acquisizione Yokogawa DQ Station CX2000

Visto che i fondo scala disponibili per le misure di tensione coprono sia il range 20-60 mV che i 50 V, è possibile prelevare direttamente la tensione di batteria e di cella ai capi dei componenti, ma, nel caso dello *stack*, Exergy ha previsto un collegamento della stessa in parallelo con dei condensatori: questi ne stabilizzano in parte la tensione e soprattutto permettono una lettura agevole della stessa. Per questo motivo per il nostro sistema si è utilizzato lo stesso punto di misura scelto da Exergy (fig. 28a), mentre per le batterie ci si è posti immediatamente a valle dell'interruttore (fig. 28b).



**Figura 28** – Punti di misura a) della tensione di cella b) delle batterie

Il carico elettronico (fig. 29) fornisce in uscita una tensione variabile tra 0 e 10 V in funzione della corrente assorbita:



**Figura 29** - Connessioni del carico elettronico a) Frontali (potenza) b) Posteriori (segnale)

### 6.3 Sintesi dei risultati sperimentali

Le prove sono state suddivise in tre campagne sperimentali (cui si deve aggiungere la quarta e ultima prova in modalità *stand-alone*):

- 1) 1-16 luglio 2009 (come combustibile propano puro a 2 barg),
- 2) 28 luglio - 5 agosto 2009 (combustibile GPL a 2,2 barg),
- 3) settembre-dicembre 2009 (caratterizzata da duplicazione dei segnali di tipo elettrico per acquisizione dati da parte del sistema Yokogawa DQ Station CX2000).

#### Avviamento (*start-up*) del sistema ORION 1 CHP

Nella descrizione si fa riferimento al P&ID dell'unità Orion 1 CHP fornito nell'allegato B.

L'unità è stata alimentata inizialmente con propano puro a pressione di 2 barg e acqua demineralizzata. La partenza della combustione catalitica costituisce il punto critico dello *start-up* del reattore di *reforming*. Si è

potuto verificare che quando il sistema non viene avviato per qualche giorno (tipicamente 1 settimana) si riesce a raggiungere la condizione che la temperatura nel letto catalitico del bruciatore (T1) sia maggiore di 380°C nei tempi prefissati (25 minuti). Ciò è probabilmente da riferirsi al fatto che durante l'esercizio si generi umidità all'interno del combustore catalitico e che la procedura di spegnimento non sia adeguata a smaltire tale accumulo.

L'alimentazione degli ausiliari dello *stack* di FC è stata fornita dalle batterie; nel caso specifico sono state collegate 2 batterie da 70 Ah. La sezione di *reforming* invece è stata alimentata in corrente alternata ed è stata collegata direttamente all'alimentazione di rete. E' previsto un inverter DC/AC che permette l'utilizzo della potenza prodotta dallo *stack* in AC.

La prima fase di lavoro detta di riscaldamento (*warm-up*, vedi fig. 30 ove è presente una sezione dell'impianto) termina con la stabilizzazione della temperatura T1 (intorno agli 820-830 °C) e dura mediamente 42 minuti.

All'interno di questa fase:

- quando la temperatura T1 (misurata nel letto catalitico) supera 380 °C, si passa dalla combustione con fiamma alla combustione catalitica,
- quando la temperatura T12 (misurata nel primo preriscaldatore/HTS) supera 100°C, parte l'acqua di processo,
- quando la temperatura T1 supera 770 °C, viene inviato alla reazione il GPL (o il propano).

Lo *start-up* si conclude quando la temperatura T14 (misurata nel gas di processo dopo il secondo metanatore, fig. 31) supera i 165 °C per almeno 10 minuti. La durata totale dello *start-up* è mediamente di 112 minuti, compresi 42 minuti di *warm-up*. Il *syngas* prodotto durante questa fase viene inviato al vent. Al termine dello *start-up* si chiude la valvola V5 (che manda il gas al vent) e si apre la valvola V4 (invio del *syngas* allo *stack*) per cominciare così la produzione di energia elettrica.

Il *syngas* prodotto (1,1 Nm<sup>3</sup>/h) a regime (quando lo *stack* è in fase di "produzione di energia elettrica") contiene mediamente il 74 % di H<sub>2</sub> (72-76%); la portata di H<sub>2</sub> in ingresso allo *stack* varia quindi tra 0,80-0,82 Nm<sup>3</sup>/h. Il contenuto di CO è <10 ppm (intorno a 2 ppm).

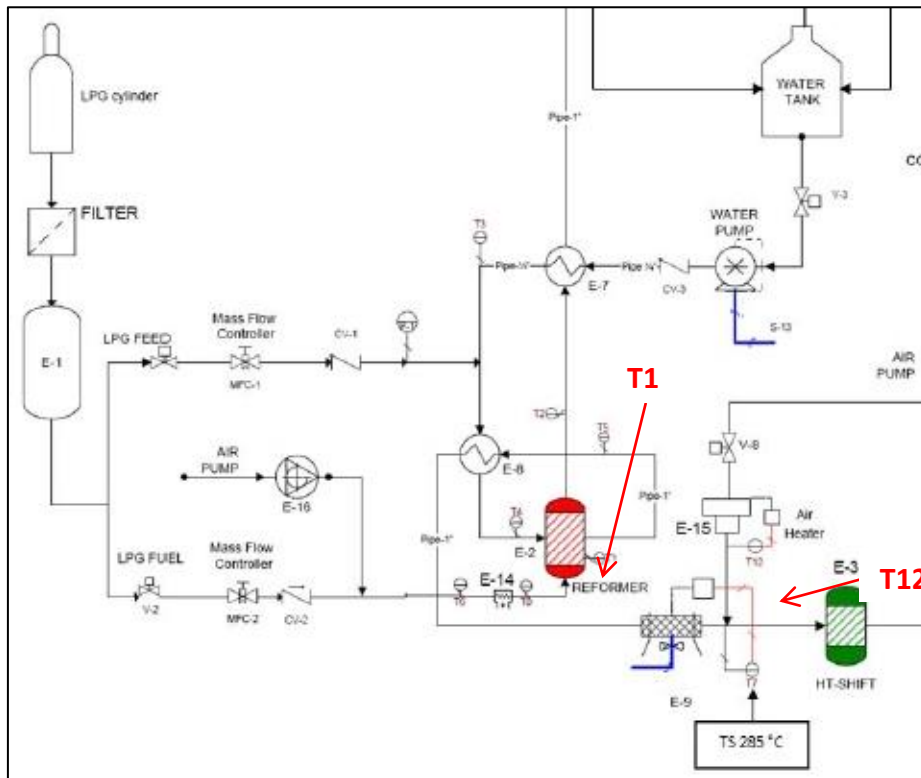


Figura 30 – Sezione A-warm-up del P&ID

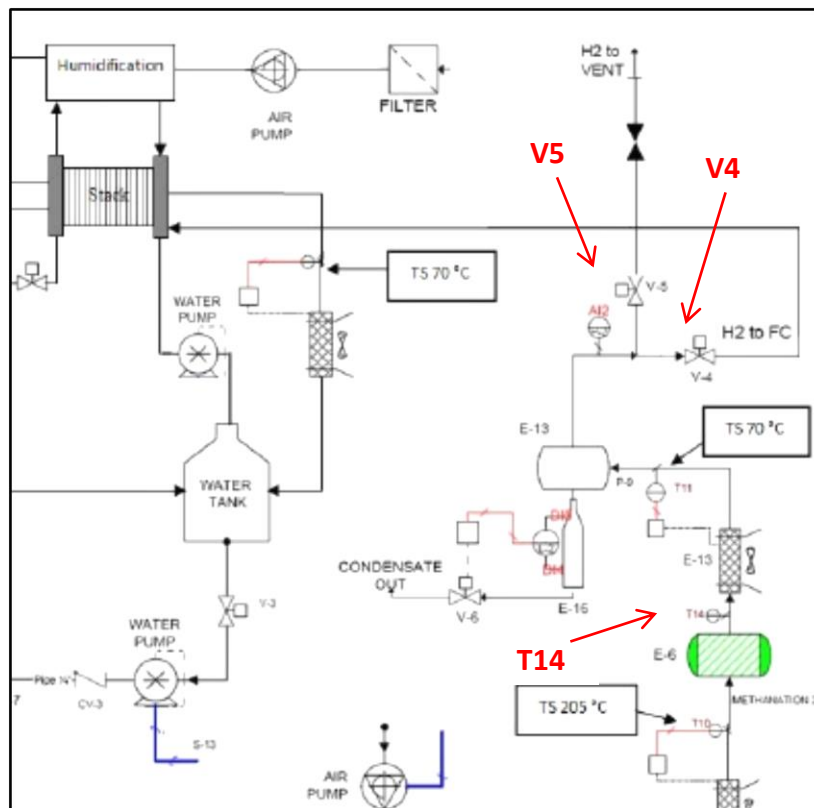


Figura 31 – Sezione B-start-up del P&ID

Consumo di H<sub>2</sub> da parte dello stack di FC durante la fase di produzione di energia elettrica

La tabella seguente (tab.1) è relativa ai dati sperimentali della seconda campagna sperimentale (luglio-agosto 2009) e riporta i consumi di GPL, acqua ed energia elettrica durante le fasi di lavoro di Orion 1 CHP.

	WARM UP	START UP	PRODUZIONE ENERGIA ELETTRICA
tempo (minuti)	0 42	112	320
consumo GPL (kg/h)	0,133	0,285	0,266
assorbimento ausiliari da rete (Watt)	500	123	187
consumo di acqua demi (kg/h)			0,65-0,70

**Tabella 1** – Consumi di GPL, acqua ed energia elettrica durante le fasi di lavoro di Orion 1 CHP

La tab. 2 invece riporta la portata (in funzione del tempo) di *syngas* in ingresso allo *stack* di FC ed in uscita dallo *stack* stesso (misurato), e la portata di H<sub>2</sub> in ingresso allo *stack* e in uscita dallo *stack* (questa volta calcolato in base alla differenza tra le portate di *syngas* in ingresso e in uscita dallo *stack*).

Come si può vedere dalla sezione di *reforming* viene prodotta una portata media di 1,1 Nm<sup>3</sup>/h di *syngas* (0,814 Nm<sup>3</sup>/h di idrogeno) in ingresso allo *stack* e a regime si ha un consumo di idrogeno pari a 0,756 Nm<sup>3</sup>/h che corrisponde ad una potenza erogata dal sistema cella pari a 693 W (ultime due colonne della tab.2).

gas riformato (ingresso stack)	% H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> in stack	gas riformato (uscita stack)	H <sub>2</sub> uscita stack	consumo H <sub>2</sub>	potenza erogata
Nm <sup>3</sup> /h	%	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	kW
1.10	0.74	0.814	1.10	0.814	0.000	0.000
1.10	0.74	0.814	1.03	0.745	0.069	0.233
1.10	0.74	0.814	0.85	0.562	0.252	0.400
1.10	0.74	0.814	0.78	0.493	0.321	0.452
1.10	0.74	0.814	0.71	0.424	0.390	0.528
1.10	0.74	0.814	0.60	0.310	0.504	0.572
1.10	0.74	0.814	0.57	0.287	0.527	0.624
1.10	0.74	0.814	0.34	0.058	0.756	0.693
			dati sperimentali			
			dati calcolati			

**Tabella 2** - Consumo di H<sub>2</sub> per produzione di energia elettrica

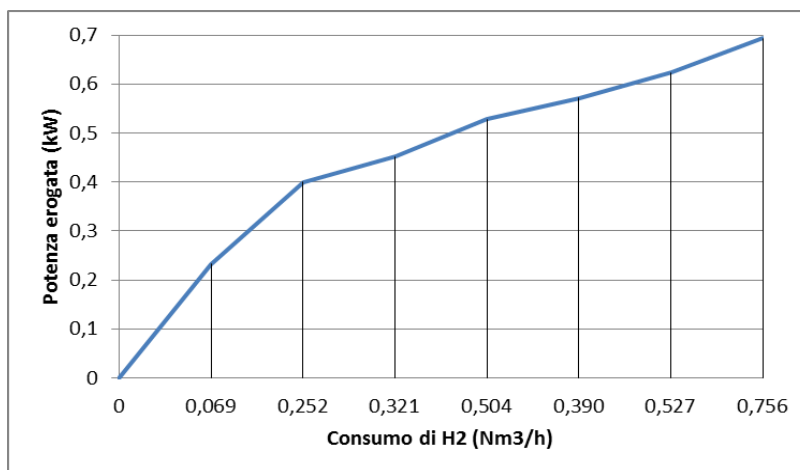


Fig. 32 – Potenza erogata dallo stack di PEMFC in funzione del consumo di idrogeno

La fig. 32 riporta l'andamento della potenza erogata dallo *stack* in funzione del consumo di H<sub>2</sub>, utilizzando sempre i dati della seconda campagna sperimentale.

Il consumo di idrogeno stechiometrico per la produzione di energia elettrica in una monocella è circa 7 Ncm<sup>3</sup>/min per Ampere (vedi Equazione 1) :

$$\text{Eq. 1: } Q \left( \frac{\text{ml}}{\text{min} * \text{cm}^2} \right) = \frac{6 * 10^4 * M \left( \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) * i \left( \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \right)}{z * F \left( \frac{\text{C}}{\text{mol}} \right) * \rho \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * U_f}$$

Dove  $F = 96485,3 \text{ C/mol}$ .

Per l'H<sub>2</sub> si ha:  $M = 2,02 \text{ g/mol}$ ;  $z = 2$ ;  $\rho = 0,0898 \text{ kg/Nm}^3$ , quindi:

$$Q (\text{H}_2, \text{Nml/min} * \text{cm}^2) = 6,97 * n * i / U_f$$

Con  $U_f =$  utilizzo del *Fuel* (*Fuel Utilization*).

Per produrre 1 kW nello *stack* (fornito da Exergy con 32 monocelle da 278 cm<sup>2</sup>) e alimentato da gas riformato con eccesso anodico 1,3 (stechiometrico), dovrebbe essere necessaria una corrente nominale di 45,3 A (0,163 A/cm<sup>2</sup>) e una tensione di 22,08 V (mediamente 0,69 V per monocella). Il consumo di idrogeno stechiometrico sarebbe quindi:

$$\begin{aligned} 7 [\text{Ncm}^3/\text{min A}] \times 45,3 [\text{A}] \times 32 (\text{n}^\circ \text{ monocelle}) &= 10147 [\text{Ncm}^3/\text{min}] \text{ di H}_2 \\ &= 0,609 [\text{Nm}^3/\text{h}] \text{ di H}_2. \end{aligned}$$

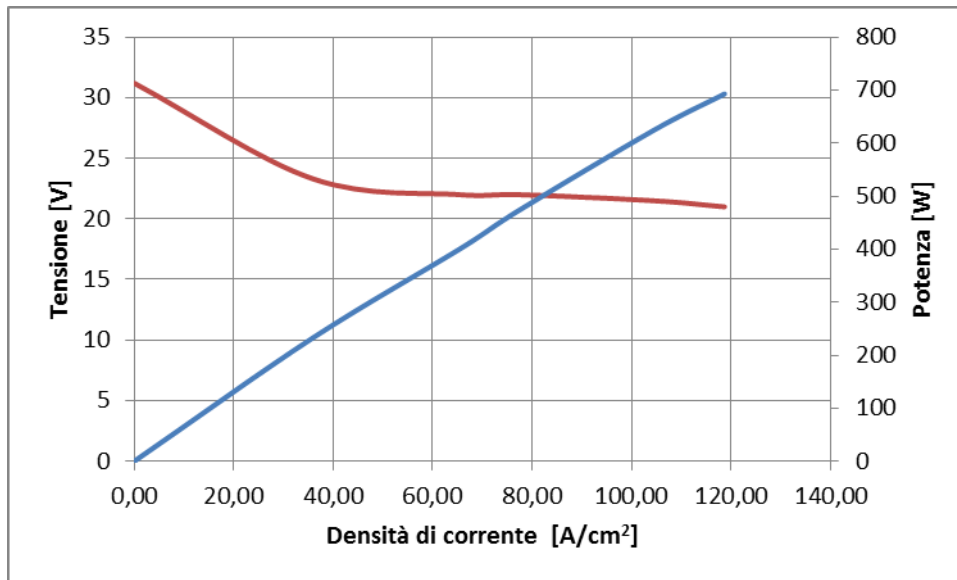
La tabella seguente (tab.3) riporta il consumo di H<sub>2</sub> effettivo in funzione della potenza e della corrente erogate sulla base dei dati sperimentali del 3 agosto 2009. La tabella riporta inoltre il consumo stechiometrico calcolato in corrispondenza della corrente erogata e, nell'ultima colonna, il rapporto fra consumo effettivo e consumo stechiometrico di H<sub>2</sub>.

Ad esempio in corrispondenza della potenza di 0,693 kW (con una corrente di stack pari a 33 A) si è registrato un consumo di idrogeno effettivo pari a 0,756 Nm<sup>3</sup>/h; il consumo stechiometrico di H<sub>2</sub> risulterebbe  $7 \text{ Ncm}^3/\text{min A} \times 33 \text{ A} \times 32 \text{ (n}^\circ \text{ monocelle)} = 7392 \text{ Ncm}^3/\text{min}$  di H<sub>2</sub> pari a 0,444 Nm<sup>3</sup>/h di H<sub>2</sub>; il rapporto fra i due è 1,71 (rapporto: consumo effettivo su consumo stechiometrico).

consumo H <sub>2</sub> effettivo	potenza erogata	corrente Stack	consumo H <sub>2</sub> stechiometrico	consumo H <sub>2</sub> effettivo su stechiometrico
Nm <sup>3</sup> /h	kW	A	Nm <sup>3</sup> /h	
0,069	0,233	10,0	0,134	0,51
0,252	0,400	18,2	0,245	1,03
0,321	0,452	21,5	0,289	1,11
0,390	0,528	22,0	0,296	1,32
0,504	0,572	26,0	0,349	1,44
0,527	0,624	29,0	0,390	1,35
0,756	0,693	33,0	0,444	1,71

**Tabella 3** - Calcolo del rapporto tra il consumo effettivo e quello stechiometrico di H<sub>2</sub> in funzione della corrente erogata

La figura seguente riporta la correlazione tra potenza elettrica (W) erogata dallo *stack* in relazione alla densità di corrente, J (fig. 33, calcolata sulla superficie di una monocella, A/cm<sup>2</sup>) e tra tensione di *stack* (V) e densità di corrente utilizzando i dati raccolti nelle prove sperimentali effettuate nel periodo agosto-dicembre 2009 (terza campagna sperimentale).



**Figura 33** – Curva caratteristica dello stack durante la terza campagna sperimentale

#### Modalità di prova della sezione FC

Le prove sperimentali sulla sezione FC sono state condotte secondo due differenti modalità:

- applicando un aumento dell'intensità della corrente di carico soltanto **dopo la stabilizzazione** di tutte le **tensioni di monocella** (ad esempio da 294 W a 631 W in 157 minuti, prova del 30 ottobre 2009, fig. 34)
- a **stack appena avviato** (mediamente dopo 112 minuti dall'inizio della sperimentazione) eseguendo un **repentino aumento del carico elettrico** (ad esempio da 285 W a 528 W in 34 min) con aumenti discreti dell'intensità della corrente di carico (prova del 1 dicembre 2009, fig. 35)

Come si può osservare dai due grafici riportati (figure 34 e 35), l'andamento della temperatura dell'acqua di raffreddamento ( $T_{water\ cell}$ ) segue l'andamento della potenza erogata dallo *stack*.

Il sistema di raffreddamento dello *stack* si comporta adeguatamente fino al raggiungimento della temperatura di circa 50°C, corrispondente al punto di funzionamento ottimale. Superato tale valore, probabilmente a causa del mancato azionamento della ventola di raffreddamento dell'acqua, la temperatura continua ad aumentare superando il valore di allarme (65°C).

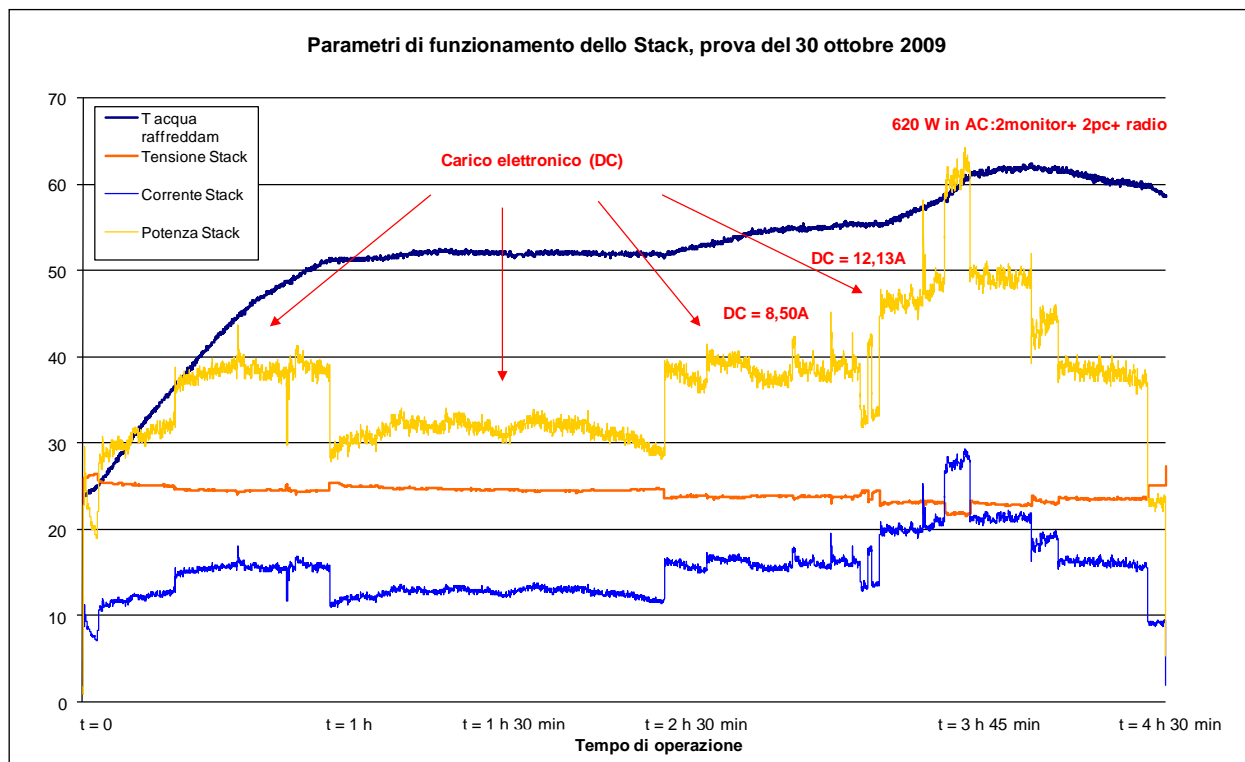


Figura 34 – Andamento temporale dei parametri di funzionamento dello *stack* del 30 ottobre 2009

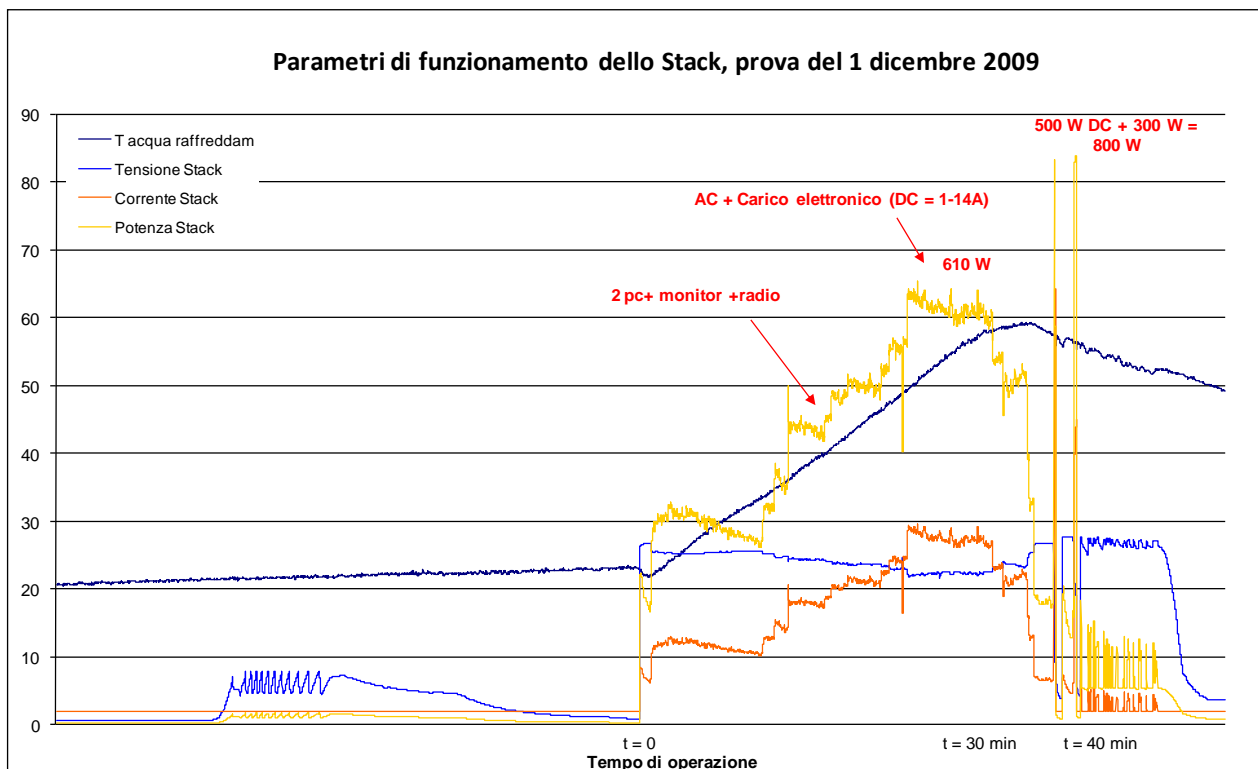


Fig. 35 - Andamento temporale dei parametri di funzionamento dello *stack* del 1 dicembre 2009

## 7 EFFICIENZA DEL SISTEMA INTEGRATO

Nei paragrafi successivi vengono definite e calcolate le efficienze del FP, dello *stack* di FC e dell'intero sistema integrato. I calcoli vengono eseguiti in condizioni di funzionamento stabile e, per quel che riguarda lo *stack* e il sistema integrato, anche in fase di produzione di energia elettrica.

Efficienza del Fuel Processor:

$$\text{Eff FP} = \frac{[m H_2 * \text{PCI } H_2]}{[(m \text{ GPL} * \text{PCI GPL}) + (\text{Pot Aux FP} * \text{Eff rete elettrica})]}$$

- *numeratore (kW)*

$m H_2$  (kg/h) = portata *syngas* in uscita dal FP e in ingresso allo *stack* (Nm<sup>3</sup>/h) x frazione volumetrica H<sub>2</sub> nel *syngas* (%) x densità H<sub>2</sub> (0,0893 kg/Nm<sup>3</sup>)

$\text{PCI } H_2$  = potere calorico inferiore di H<sub>2</sub> (120 MJ/kg) / 3,6 (MJ/kWh) = 33,33 (kWh/kg)

- *denominatore (kW)*

$m \text{ GPL}$  = portata di alimentazione del GPL (kg/h)

$\text{PCI GPL}$  = potere calorico inferiore del GPL (46,194 MJ/kg) / 3,6 (MJ/kWh) = 12,83 (kWh/kg)

$\text{Pot Aux FP}$  = potenza elettrica ausiliari del FP (0,123 kW)

$\text{Eff rete elettr}$  = coefficiente di efficienza della rete elettrica (2,175).

Sperimentalmente è stata riscontrata una variabilità nel consumo di GPL e nella concentrazione di H<sub>2</sub> nel *syngas* prodotto; ipotizzando che la portata di *syngas* all'ingresso dello *stack* non subisca variazioni (come da specifiche progettuali), ne risulta un'efficienza del FP variabile tra il 59,5% ed il 71,1%.

La tab. 4 sintetizza i dati relativi a tre casi significativi per la diversa concentrazione volumetrica di H<sub>2</sub> misurata nel *syngas* e la diversa portata di alimentazione del GPL.

- caso peggiore: percentuale volumetrica di H<sub>2</sub> 72 %, alimentazione GPL 0,288 kg/h
- caso medio: percentuale volumetrica di H<sub>2</sub> 74 %, alimentazione GPL 0,266 kg/h
- caso migliore: percentuale volumetrica di H<sub>2</sub> 76 %, alimentazione GPL 0,252 kg/h

Portata di <i>syngas</i> (Nm <sup>3</sup> /h)	H <sub>2</sub> (%)	Portata di H <sub>2</sub> allo <i>stack</i> (Nm <sup>3</sup> /h)	Portata di GPL (kg/h)	Consumo Aux FP (kW)	Efficienza FP (%)
1,1	72	0,792	0,288	0,123	59.5
1,1	74	0,814	0,266	0,123	65.8
1,1	76	0,836	0,252	0,123	71.1

**Tabella 4** – Efficienza del FP in tre casi significativi

### Efficienza FC:

$$Eff\ FC = \frac{Pot\ Erog}{[(m\ H_2 * PCI\ H_2) + (Pot\ Aux\ FC * Eff\ rete\ elettr)]}$$

- *numeratore (kW)*

*Pot erog* (potenza erogata) = corrente di *stack* (A) x tensione di *stack* (V) / 1000 (W/kW)

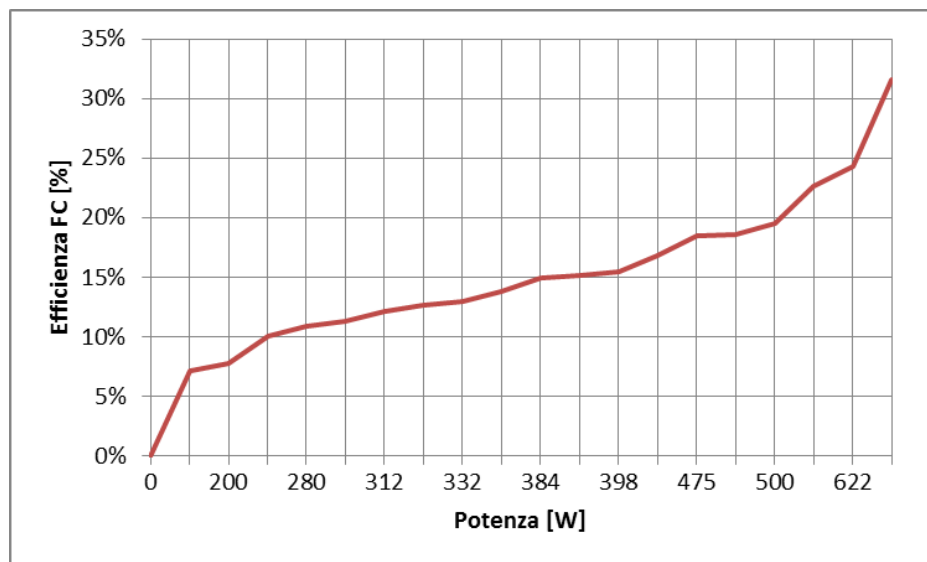
- *denominatore (kW)*

$m\ H_2$  = portata *syngas* (Nm<sup>3</sup>/h) x frazione volumetrica H<sub>2</sub> nel *syngas* (%) x densità H<sub>2</sub> (0,0893 kg/Nm<sup>3</sup>)

$PCI\ H_2$  = 120 (MJ/kg) /3,6 (MJ/kWh) = 33,33 (kWh/kg)

*Pot aux FC* = potenza elettrica ausiliari *stack* (0,064 kW)

*Eff rete elettr* = coefficiente di efficienza della rete elettrica (2,175)



**Figura 36** – Efficienza dello *stack* in funzione della potenza erogata

La fig. 36 riporta l'efficienza dello *stack* in funzione della potenza erogata, in base ai dati raccolti durante la terza campagna sperimentale.

### Efficienza complessiva sistema FP / FC:

$$Eff\ TOT = \frac{Pot\ Erog}{[(m\ GPL * PCI\ GPL) + (Pot\ Aux\ FP * Eff\ rete\ elettr)]}$$

- *numeratore (kW)*

$Pot\ erog$  (potenza erogata) = corrente di *stack* (A) x tensione di *stack* (V) / 1000 (W / kW)

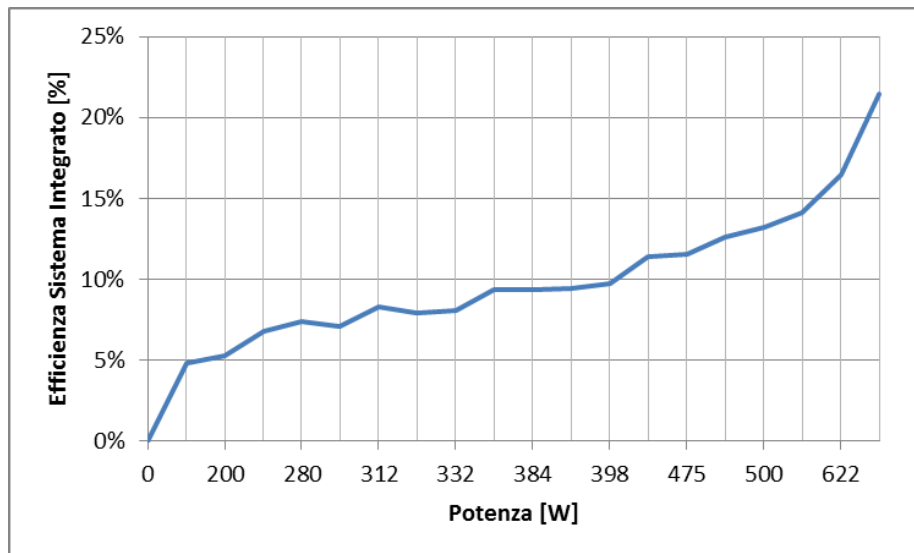
- *denominatore* (kW)

$m\ GPL$  = portata di alimentazione del GPL (kg/h)

$PCI\ GPL = (46,194\ MJ/kg) / 3,6\ (MJ/kWh) = 12,83\ (kWh/kg)$

$Pot\ aux\ FP$  = potenza elettrica ausiliari del FP (0,123 kW)

$Eff\ rete\ elettr$  = coefficiente di efficienza della rete elettrica (2,175).



**Figura 37** – Correlazione tra Efficienza totale e Potenza Erogata di Orion 1 CHP

La fig. 37 riporta l'andamento dell'Efficienza totale di Orion 1 CHP rispetto alla potenza erogata in base ai dati raccolti durante la terza campagna sperimentale.

## 8 PROVA SPERIMENTALE DI FUNZIONAMENTO *STAND-ALONE*

Questa quarta campagna sperimentale (prove effettuate dal 17 febbraio all'8 marzo 2010) è caratterizzata dalla messa in esercizio dell'impianto in isola (funzionamento *STAND-ALONE*).

Le modifiche effettuate sul sistema elettrico sono state:

- Il LEM (sonda ad effetto Hall) è stato eliminato, quindi la misura di corrente di batteria proviene solo dallo shunt (IB2) e dal software Penta.
- Sono state sostituite le 2 batterie che alimentavano gli ausiliari di cella e inserite 4 batterie da 180 Ah per rendere il sistema indipendente dalla rete elettrica (alimentazione del FP, ausiliari di FC e inverter).

Nello specifico, in luogo delle due batterie da 12 V e 70 Ah cadauna, con un contenuto nominale di energia accumulata pari a  $2 \times 70 \text{ Ah} \times 12 \text{ V} = 1680 \text{ Wh}$ , sono state installate n. 4 batterie al Pb da 6 V e 180 Ah cadauna (fig. 38), con un contenuto nominale pari a  $4 \times 180 \text{ Ah} \times 6 \text{ V} = 4320 \text{ Wh}$  ed uno effettivo per il regime di lavoro da sostenere pari a  $4 \times 125 \text{ Ah} \times 6 \text{ V} = 3000 \text{ Wh}$  (legge di Peukert).



**Figura 38** – Pacco Batterie da 180 Ah

Lo *stack* di FC per potersi avviare richiede il collegamento con una sorgente di tensione continua del valore di 24 V, generalmente un pacco batterie (BT), mentre il FP da parte sua richiede il collegamento con la rete elettrica a 200V 50 Hz.

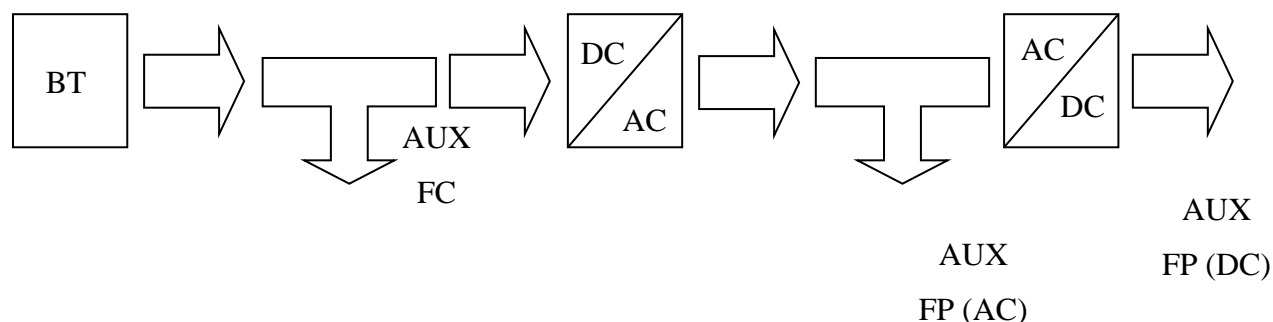
Il sistema integrato può operare in isola adoperando la seguente soluzione: il pacco BT alimenta l'inverter in corrente continua che a sua volta alimenta in corrente alternata il FP. Una volta che il FP è stato avviato, la FC viene alimentata con il pacco BT (in continua) fino a che non è in fase di produzione (ovviamente in questo caso tutta l'energia e potenza necessarie all'esecuzione dello *start-up*, compresi gli ausiliari di FP e di FC, provengono dal pacco BT che quindi va dimensionato appositamente). Una volta in produzione, la FC ricarica il pacco BT.

L'inverter fornisce la corrente alternata per una potenza massima di 2000 Watt, si osservi che esso è alimentato sia dalla FC che dalle batterie, collegate in parallelo ad essa.

### **8.1 Criterio di scelta delle batterie per il funzionamento in isola (*stand-alone*)**

Il sistema integrato è costituito da un FP e uno *stack* di FC progettati in modo indipendente, rispettivamente da Helbio ed Exergy, ed assemblati successivamente per poter operare insieme. Il sistema FC per potersi avviare richiede il collegamento con una sorgente di tensione continua del valore di 24 V, generalmente un pacco batterie, mentre il FP da parte sua richiede il collegamento con la rete elettrica a 220 V 50 Hz. In questa configurazione il sistema non può lavorare in isola, ma è possibile osservare che l'inverter che

fornisce in uscita la corrente alternata è alimentato a 24 V dallo *stack* di FC; a questi 24 V è connesso anche il pacco BT, quindi, alimentando inizialmente l'inverter con il pacco BT è possibile alimentare anche il FP permettendo così al sistema integrato di poter operare in isola.

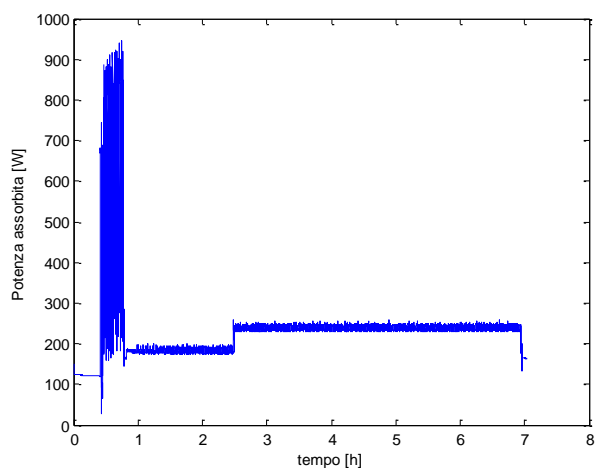


**Figura 39** - Flusso di potenza per il funzionamento in isola

La fig. 39 mostra come si sviluppa il flusso di energia in uscita dalla batteria qualora si pensi di alimentare il FP tramite il convertitore DC/AC: nella fase di *start-up* lo *stack* è spento, per cui tutta la potenza ed energia necessarie all'avviamento sono fornite dal pacco BT.

Si noti che per alimentare i suoi ausiliari il FP utilizza sia una alimentazione alternata monofase di 220 V fornita dalla rete che una 24 V, derivante dalla trasformazione della alternata in continua; lo *stack* invece, al contrario, utilizza direttamente la corrente continua 24 Volt fornita dal pacco BT e mette a disposizione dell'utenza finale la 220 V alternata tipica di una rete elettrica: sarebbe quindi possibile ottimizzare il sistema prelevando la 24 V del FP direttamente dalle batterie evitando passaggi inutili che peggiorerebbero il rendimento globale del sistema. Si potrebbe ottenere quindi il funzionamento in isola con una progettazione integrata che minimizzi le perdite di energia. Volendo però agire sul sistema attuale si è preferito seguire la via più immediata, ma meno efficiente.

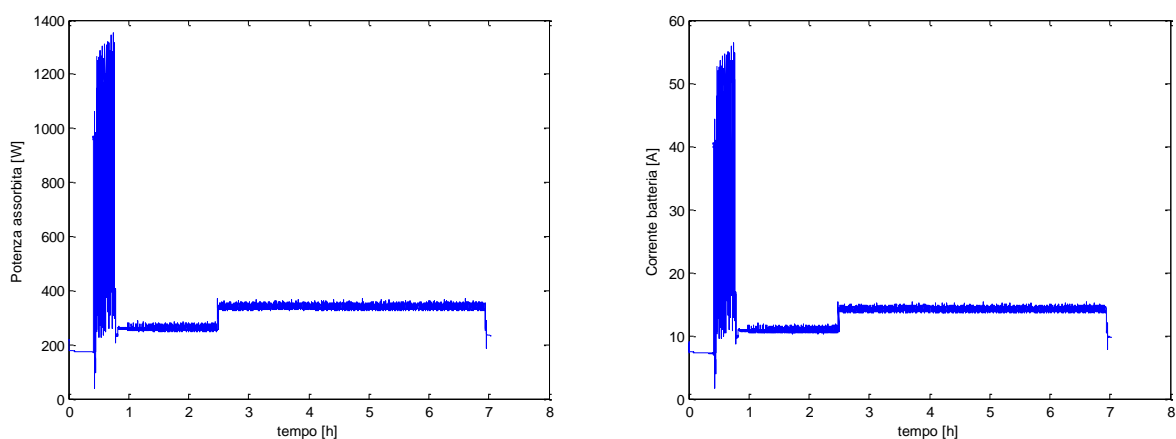
Per dimensionare un pacco BT adatto all'alimentazione *stand-alone* occorre partire dalla potenza assorbita dal sistema, che può essere ottenuta sommando quella assorbita in alternata ed in continua dalla configurazione non in isola. Nello *start-up* la potenza assorbita in continua dal sistema FC è assolutamente trascurabile rispetto a quella assorbita in alternata dal FP, che viene riportata di seguito (fig.40):



**Figura 40** - Potenza assorbita dal FP nello *start-up*

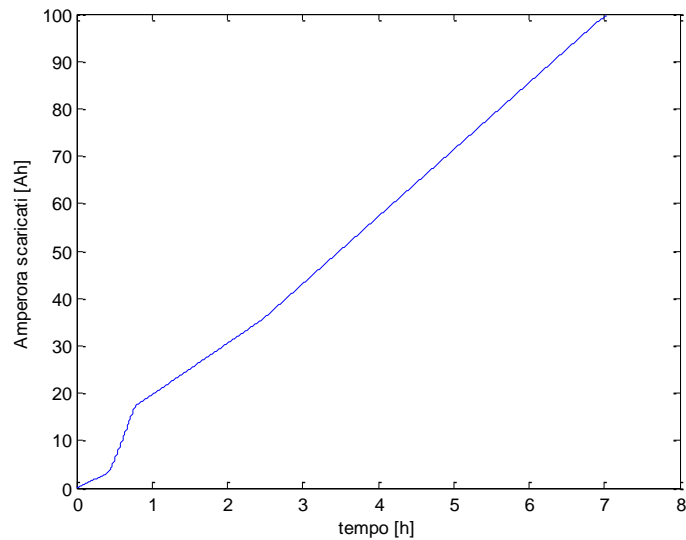
Durante questa fase il FP assorbe un picco di potenza di circa 900 W nella prima ora di funzionamento, successivamente si porta a lavorare sui 200 W per circa due ore e sui 250 W per altre quattro; questa potenza viene utilizzata principalmente per riscaldare il letto catalitico attraverso delle resistenze elettriche alimentate a 220 V.

Dato che questa potenza è molto maggiore di quella che va agli ausiliari dello *stack*, si può ipotizzare che tutta l'energia fornita dalle batterie venga ceduta al FP tramite il convertitore DC/AC; quindi, se si assume, prudenzialmente, che esso abbia un rendimento costante di 0.7 si ricava la potenza richiesta alle batterie. Considerando per semplicità la loro tensione costante e pari a 24 V (nella pratica varierà tra 22.5 e 25.5 V) si tracciano i seguenti andamenti di potenza e corrente di batteria (fig. 41 a, b):



**Figura 41-** a) Potenza richiesta alle batterie b) Corrente di batteria

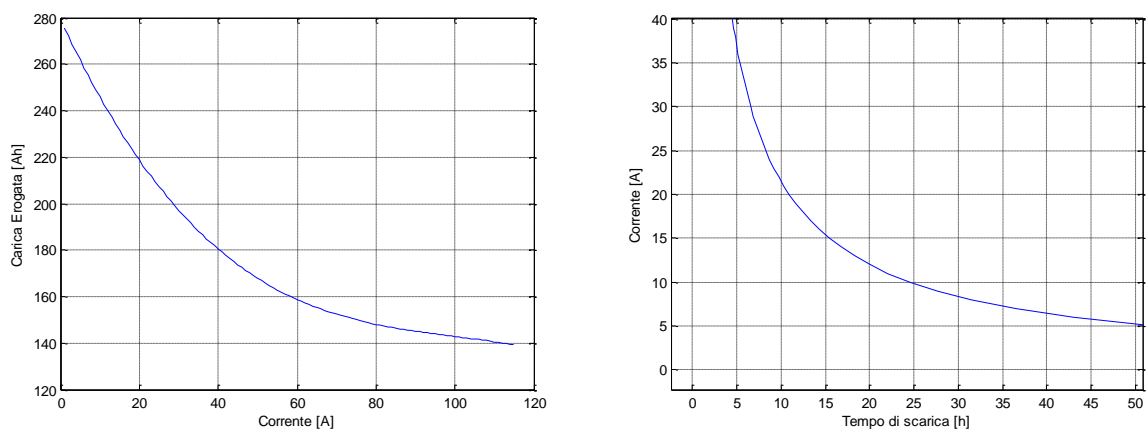
Integrando la corrente nel tempo è possibile ricavare l'andamento della quantità di carica scaricata, che, espressa in Amperora, è il seguente:



**Figura 42** - Amperora richiesti per lo *start-up*

Dal grafico (fig. 42) può sembrare che la capacità della batteria da impiegare sia di 100 Ah, ma occorre considerare che in una batteria al piombo come quella che adotteremo la capacità erogabile dipende dal regime di scarica.

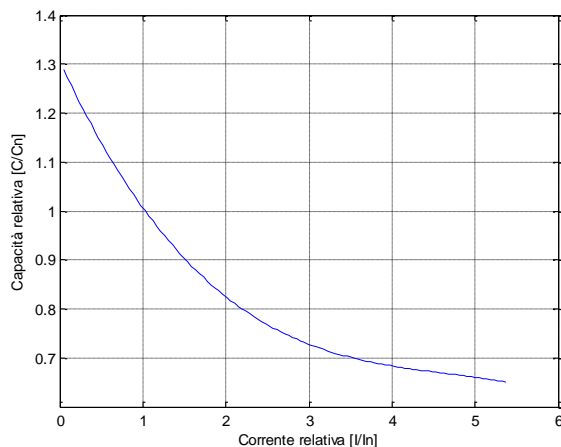
Per chiarire il concetto, si consideri di scaricare completamente una batteria al piombo imponendogli l'erogazione di una corrente costante e di calcolare la capacità così scaricata, successivamente si ripete la prova per vari regimi di corrente di scarica. E' possibile ricavare quindi un grafico che rappresenta la dipendenza della capacità erogabile dalla corrente di scarica; per un caso particolare (200 Ah circa di una generica batteria al piombo) si ottiene l'andamento in fig. 43 che mostra come la capacità sia fortemente influenzata dal valore della corrente di scarica.



**Figura 43** a) Capacità erogabile in funzione della corrente di scarica b) Dettaglio a 10 ore

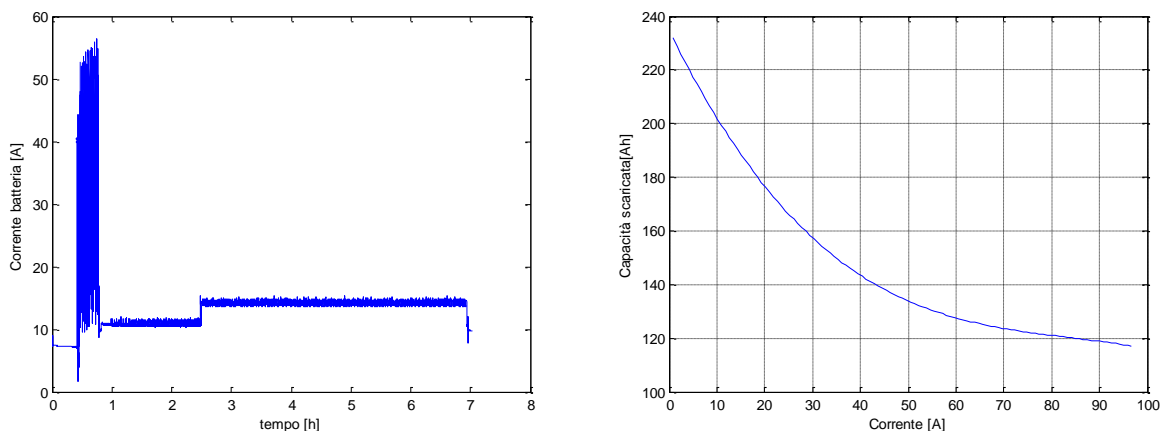
A questo punto, sempre con riferimento alla figura si prenda in considerazione la corrente per la quale la scarica dura 10 ore, che nel nostro esempio è pari a 21 A circa. In quella condizione si definisce la capacità

nominale della batteria a regime di scarica C10, normalizzando rispetto ad essa si ottiene il seguente andamento generico Capacità/Corrente (fig. 44):



**Figura 44** - Diagramma normalizzato Capacità/Corrente

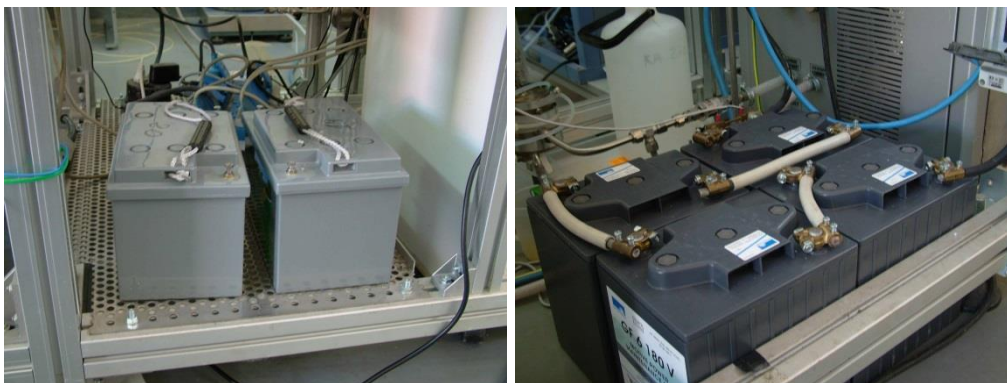
Questo diagramma ha validità all'interno di una certa tecnologia di produzione delle batterie al Piombo: è molto interessante perché permette di relazionare in modo immediato la variazione di capacità erogata in funzione di quella della corrente di scarica. Ad esempio è possibile constatare che per la tecnologia considerata, una batteria dalla capacità nominale di 100 Ah (100 Ah=10 A per 10 ore) eroga circa 73 Ah ad una corrente di scarica 30 A. L'esempio è generico ma serve a far capire come non basta considerare gli Amperora assoluti erogati dalla batteria nello *start-up* per dimensionarla, ma anche il regime medio di scarica. Inoltre occorre tener presente che mancati avviamenti comportano un inutile utilizzo della batteria, e quindi la sua capacità va sovradimensionata anche per questo motivo. Riprendendo l'andamento della corrente di batteria e scalando nuovamente la curva normalizzata per una capacità di 180 Ah (18 A = 10 h di scarica) come in fig. 45 (a, b).



**Figura 45** - a) Corrente di scarica b) Caratteristica batteria 180 Ah

Si osserva come durante la prima ora di funzionamento la corrente media è di circa 45 A per i quali la batteria ‘mostra’ una capacità di 135 Ah, mentre a regime siamo a 15A, a cui corrispondono circa 190 Ah. Considerando come detto precedentemente la possibilità di falsi avviamenti con dispendio di carica aggiuntiva, è opportuno adottare questa taglia di batteria.

La figura seguente (fig. 46 a, b) mostra il pacco batterie scelto per la applicazione standard e quello per l’applicazione in isola.



**Figura 46** - a) Batterie per il funzionamento normale (2 \* 12 V 70 Ah) b) per isola (4 \* 6 V 180 Ah)

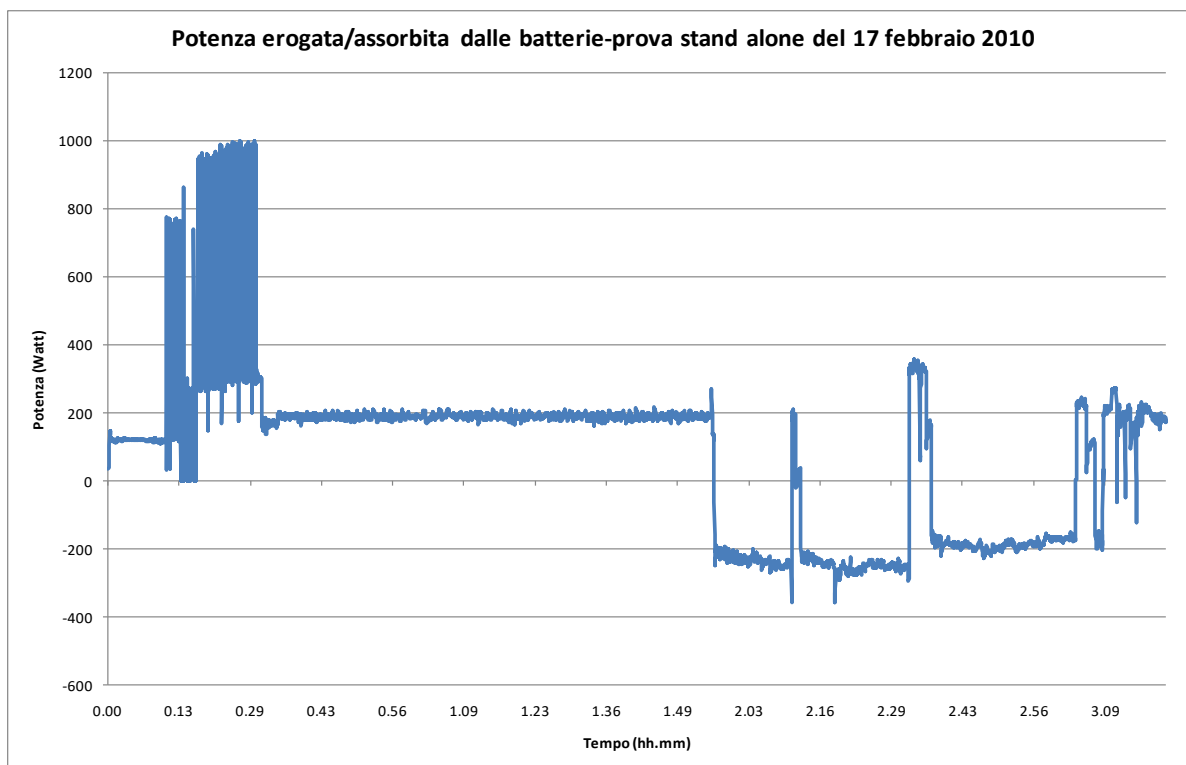
## 8.2 Avviamento del sistema nella prova *stand-alone*

Prendendo come riferimento la prova del 17 febbraio vi è nella tab.5 una caratterizzazione energetica del sistema durante l’esercizio in *stand-alone*. Si può vedere che la **fase di start-up**, comprendente la fase di riscaldamento (*warm-up*) e la fase di *reforming* con invio del *syngas* al *vent*, ha avuto una durata complessiva di 115 minuti durante i quali sono stati consumati 0,410 kg di GPL (equivalenti a 5,27 kWh in termini di energia primaria) e, mediamente, sono stati assorbiti dall’impianto 0,232 kW per un totale di 0,446 kWh, provenienti dalle batterie.

		START-UP				reforming (FC)	TOTALE
		riscaldamento (warm-up)		reforming (solo vent)			
		I parte	II parte				
Durata	min	60	10	50	55	80	195
Consumo GPL	kg/h	0.214			0.214	0.263	
Consumo GPL	kg	0.214			0.196	0.350	0.76
Energia Primaria GPL	kWh	2.75			2.52	4.49	9.75
Potenza Elettrica da BT o inverter	kW	0.332	0.070	0.385	0.124	0.186	
Energia Elettrica da BT o inverter	kWh	0.332	0.012	0.321	0.114	0.248	0.69

**Tabella 5** – Caratterizzazione energetica del sistema Orion 1 CHP nella prova *stand-alone*

In figura 47 si evidenzia la potenza erogata dalle 4 batterie da 6 V e 180 Ah cadauna durante la fase di *start-up* e la potenza assorbita dalle batterie durante l'erogazione da parte dello *stack*; si nota che durante tale erogazione, nei momenti di mancato funzionamento della FC, corrispondenti alle cadute di potenza, si verifica il passaggio delle batterie dall'assorbimento all'erogazione, per garantire la continuità dell'alimentazione del carico elettrico.



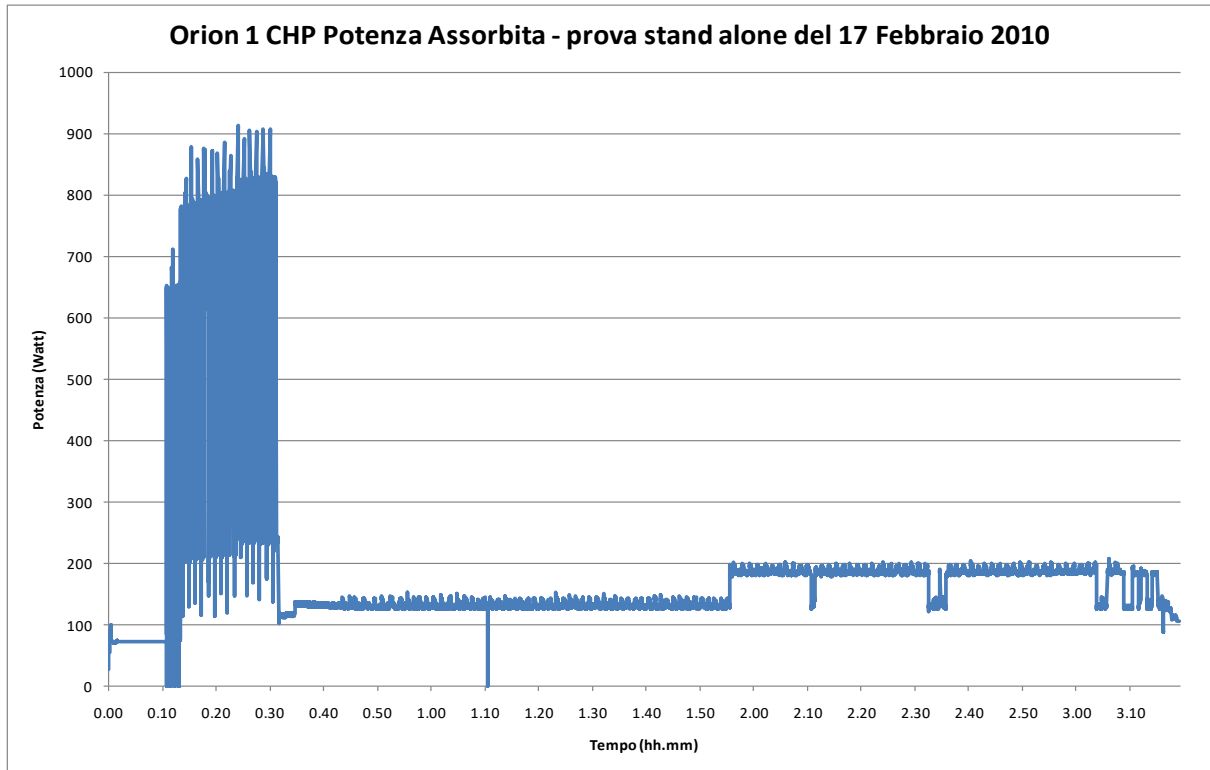
**Figura 47** – Potenza erogata/assorbita dalle batterie – prova *stand-alone* del 17 febbraio 2010

Dal punto di vista dell'energia elettrica assorbita dagli ausiliari alimentati in questa prova dalle batterie e dallo *stack* attraverso l'inverter per le utenze in alternata) si è registrato il seguente andamento (vedi fig. 48):

- 70 W per 10 minuti (*warm-up*)
- 770 W (media con punte sino a 900 W) per 20 minuti (*warm-up*)
- 128 W per 86 minuti (sino alla conclusione dello *start-up*) (30 minuti di *warm-up* e 56 minuti di produzione di *syn-gas* con invio al vent)
- 186 W per 80 minuti (produzione di energia elettrica)

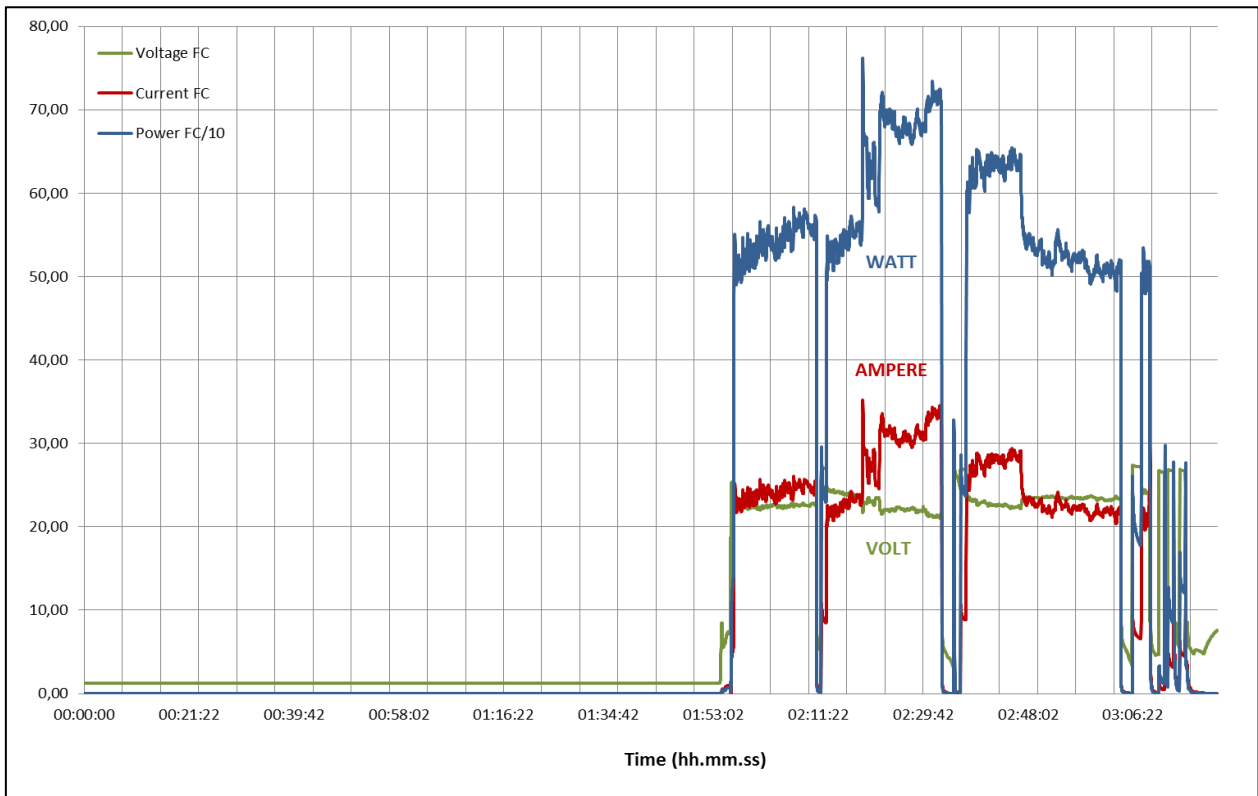
La fase di *reforming* con invio della miscela di reazione alla FC e produzione di energia elettrica ha avuto una durata di 80 minuti durante i quali sono stati consumati 0,35 kg di GPL (equivalenti a 4,49 kWh in termini di energia primaria) e, mediamente, sono stati assorbiti dall'impianto 0,186 kW (tab. 5, fig. 48) per un totale di 0,248 kWh, provenienti dallo *stack* e/o dalle batterie.

Durante questa fase, le batterie non hanno erogato energia elettrica, al contrario, di norma vengono ricaricate dallo *stack* in generazione (in fig. 48 è presente una caratterizzazione energetica della FC); una volta ricaricate completamente (in un tempo stimato di circa 2 ore dopo un singolo *start-up*), le batterie agiscono da buffer ed intervengono solo per supplire l'eventuale sovraccarico delle utenze.



**Figura 48** - Potenza assorbita dal sistema Orion 1 CHP nelle diverse fasi di funzionamento

Durante la fase di produzione elettrica della FC (durata in tutto 80 minuti) la massima potenza erogata dallo *stack* è stata pari a 762 W (21,67 V e 35,17 A). La produzione di energia elettrica ha oscillato tra 509 e 762 W (fig.49).



**Figura 49** – Caratterizzazione energetica dello stack in erogazione

Nel caso di esercizio *stand-alone* il rendimento elettrico del sistema Orion 1 CHP viene calcolato come rapporto tra l'energia elettrica prodotta e l'energia primaria del combustibile.

Il **rendimento elettrico massimo** (in corrispondenza della potenza prodotta di 715 W e tenendo conto della costanza del consumo di GPL (263 g/h), è pari a **21,2%**.

La **potenza media** erogata durante questa fase è stata pari a **472 W** con una produzione totale di 0,629 kWh dei quali 0,255 kWh utilizzati per la ricarica delle batterie.

Pertanto il **rendimento elettrico medio** a regime è:

$$\eta_{el\ medio} = \frac{\left[ \left( \frac{472\ W \cdot 80\ min}{60\ min/h} \right) \cdot 1000 \frac{W}{kW} \right]}{4,49\ kWh} = \mathbf{14\ \%}$$

Tenendo anche conto dei consumi di energia (GPL) nelle fasi di riscaldamento e di produzione della miscela con invio al vent il **rendimento medio** si riduce a:

$$\eta_{el\ medio} = \frac{\left[ \left( \frac{472\ W \cdot 80\ min}{60\ min/h} \right) \cdot 1000 \frac{W}{kW} \right]}{9,75\ kWh} = \mathbf{6,45\ \%}$$

Prendendo in considerazione il consumo degli ausiliari (186 W) che vengono alimentati dallo *stack* in generazione nella fase a regime, possiamo calcolare il rendimento elettrico netto, ad esempio nella condizione di massima erogazione di energia elettrica:

- $(762 - 186) \text{ W} = 576 \text{ W}$  potenza netta utile erogata

diviso 3368 W (equivalenti a 0,263 kg/h di GPL, energia primaria del combustibile), otteniamo:

- $576 / 3368 = 17 \%$ .

Dal confronto con il caso “parallelo di rete” (dati della terza campagna sperimentale, prova del 30 ottobre 2009), si ricava la tabella che segue (tab.6):

Confronto prova in parallelo di rete/prova stand-alone			
Data	Modalità	kW (stack power)	Efficienza elettrica totale
30/10/2009	Parallelo di rete	580	14.1%
17/12/2010	Stand-alone	576	17.0%

**Tabella 6** - Confronto efficienza elettrica tra parallelo di rete e funzionamento *stand-alone*

## 9 CONCLUSIONI

Sulla base delle sperimentazioni svolte nel periodo 19 gennaio 2008 – 17 febbraio 2010, le linee di sviluppo dei piccoli FP a GPL nella taglia destinata alle produzioni di 1-5 kWe sono [9]:

- Riduzione dei tempi di *start-up* a freddo,
- Riduzione della quota di GPL destinata al riscaldamento (a regime, dopo la fase di *start-up*): un modello di simulazione sviluppato allo scopo [10] indica la possibilità di ridurre tale portata del 10% senza pregiudicare l’andamento delle reazioni.

Per ciò che riguarda il sistema FC, le linee di ricerca e sviluppo da seguire sono:

- Condensare il vapor d’acqua nel collegamento tra FP e FC,
- Abbassare la temperatura del condensatore del FP per limitare la condensa nella corrente di *syngas* di alimentazione alla FC,
- Prevedere la possibilità di flussare azoto per poter asciugare la FC.

Per ciò che riguarda il sistema nel suo complesso si ritiene che le difficoltà verificatesi nel suo funzionamento si possono attribuire ad un effetto combinato dell'innalzamento della temperatura della FC e dell'allagamento della FC stessa.

In sintesi le possibili soluzioni di miglioramento da sperimentare possono essere così ricapitolate:

- Aumentare la pressione di alimentazione del GPL, riducendo nel contempo la portata del GPL per riscaldamento a regime (sino a - 10%),
- Diminuire la temperatura di esercizio del condensatore del FP,
- Migliorare il sistema di raffreddamento della FC (anche in vista della produzione di acqua calda in una logica cogenerativa),
- Inserire un separatore di condensa supplementare tra FP e FC,
- Prevedere la possibilità di inviare azoto per asciugare la FC,
- Ricircolare il *syngas* in uscita dalla FC a scopo di riscaldamento del reattore di *steam-reforming*.

## ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

AC	Alternating Current
DC	Direct Current
APU	Auxiliary power System
ATR	AutoThermal Reforming
CHP	Combined Heat and Power
FC	Fuel Cell
FISR	Fondo Integrativo Speciale per la Ricerca
FP	Fuel Processor
GPL	Gas di Petrolio Liquefatto
HTS	High Temperature Shift
LPG	Liquefied petroleum Gas
LTS	Low Temperature Shift
MFC	Mass Flow Controller
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
MFM	Mass Flow Meter
MIUR	Ministero Università e Ricerca
PCI	Potere Calorifico Inferiore
P&ID	Process and Instrumentation Diagram
PEFC	Polymer Electrolyte Fuel Cell
PID	Proportional Integral Derivative
PLC	Programmable Logic Controller
POX	Partial Oxidation
S/C	Steam/Carbon (rapporto vapore/carbonio)
SR	Steam reforming
TC	Termocoppia

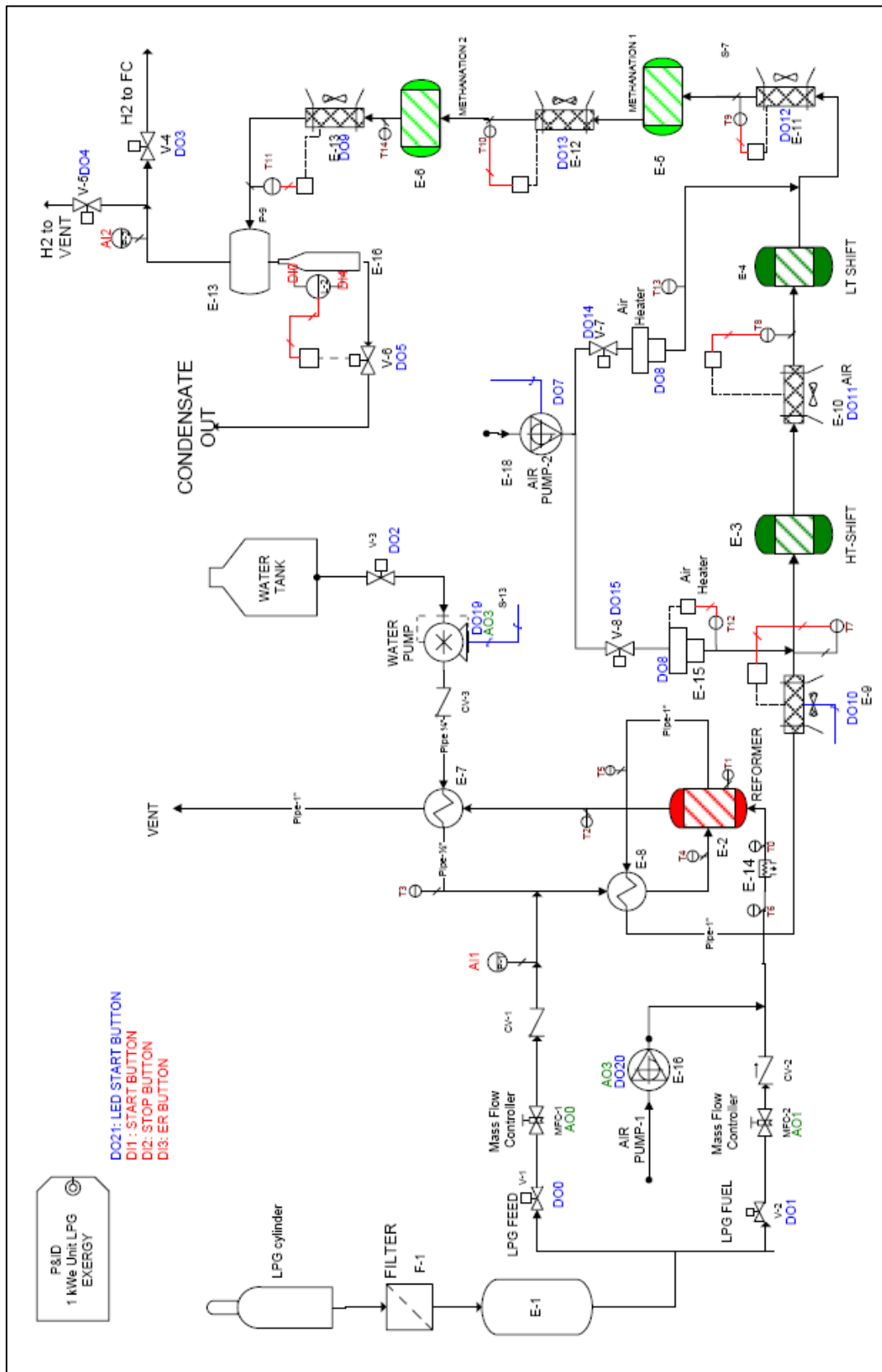
A	Ampere
$\Delta H^\circ$	Entalpia di reazione
h	ora
kW	kilowatt
kWe	kilowatt-elettrico
kWh	kilowatt-ora
mA	Milli-Ampere
mbarg	millibar relativi

min	minuti
mol	mole
MJ	MegaJoule
MW	Megawatt
n	Numero di elettroni partecipanti alla reazione
NI/h	Normal litri/ora
Nm <sup>3</sup>	Normal metri cubi
P	Pressione
ppm	Parti per milione
T	Temperatura
V	Tensione di cella
W	Watt
Wh	Watt-ora

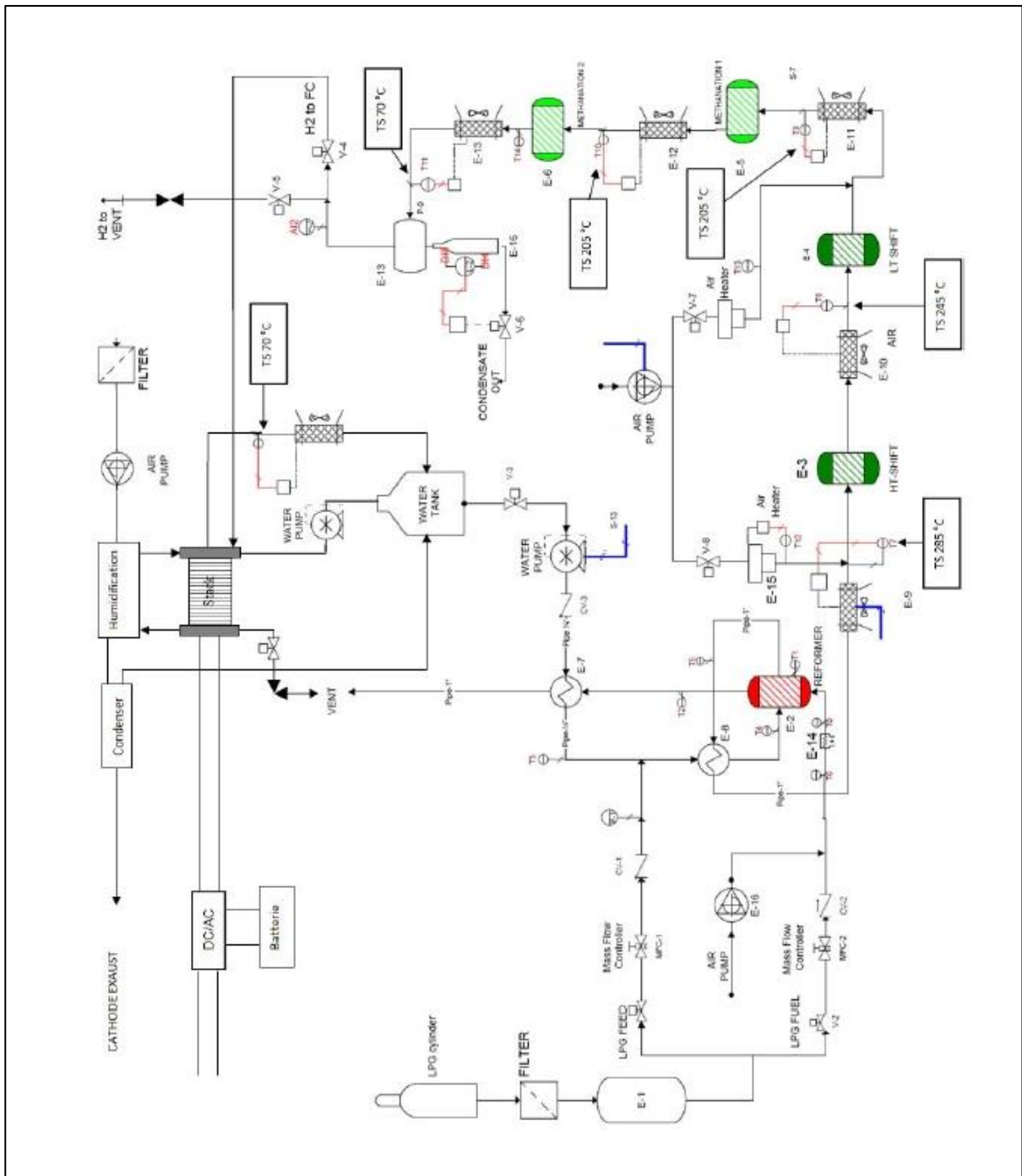
## **Bibliografia**

- [1] <https://www.treehugger.com/renewable-energy/nippon-oil-to-sell-residential-fuel-cells-in-japan.html>
- [2] <http://www.gastechnology.org>
- [3] “PEFC cogeneration systems: Ru catalyst for CO preferential oxidation in reformed gas”, M. Echino, N. Shinke, S.Takami, S. Higashiguchi, K. Hirai and T. Tabata, Osaka Gas, (2003)
- [4] XENERGY, Towards a Renewable Power Supply: the Use of Bio-based Fuels in Stationary Fuel Cell, <http://www.nrbp.org/pdfs/pub31.pdf>, (2002)
- [5] M. Ronchetti, A. Iacobazzi, Celle a combustibile, Stato di sviluppo e prospettive della tecnologia, ENEA, (2002)
- [6] “The Penetration of Micro CHP in Residential Dwellings in Japan”, Hirohisa Aki, IEEE <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4275198/4275199/04275234.pdf>, (2007)
- [7] “La Microcogenerazione con Fuel Cells”, HERA, B. Limuti, La Rivista Italiana Del Gas n° 2, (2009)
- [8] Micro CHP Project, <http://www.microchip-project.org>
- [9]” Small stationary reformers for H<sub>2</sub> production from hydrocarbons”, E. Calo`, A. Giannini, G. Monteleone, International Journal of Hydrogen Energy, 35 (2010) 9828-9835
- [10] ‘Produzione di idrogeno da combustibili fossili: Modellazione di un impianto alimentato a GPL’ Alessio De Marzo, tesi di laurea, Prof. Raffaele Vellone (2009)

ALLEGATO A: P&ID del FP HELBIO 'APS 1000'



ALLEGATO B: P&ID dell'unità ORION 1 CHP Morphic



ENEA  
Servizio Promozione e Comunicazione  
[www.enea.it](http://www.enea.it)

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati  
ottobre 2017