

# Ricerca di Sistema elettrico



## **Modellistica di componenti per la produzione ed il trattamento di idrogeno elettrolitico basato sulla tecnologia alcalina (LA 2.15)**

Maria Beatrice Falasconi, Leone Mazzeo, Alice Bertino,  
Luisa Di Paola, Vincenzo Piemonte



RdS\_PTR 22-24\_PR 1.3\_LA2.15\_124

## MODELLISTICA DI COMPONENTI PER LA PRODUZIONE ED IL TRATTAMENTO DI IDROGENO ELETTROLITICO BASATO SULLA TECNOLOGIA ALCALINA (LA2.15)

Autori: Maria Beatrice Falasconi, Leone Mazzeo, Alice Bertino, Luisa Di Paola, Vincenzo Piemonte  
(Università Campus Bio-medico, Roma)

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA  
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: 1.3 *"Progetto Integrato Tecnologie dell'Idrogeno"*

Linea di attività: 2.15

Responsabile del Progetto: Luca Turchetti, ENEA

Responsabile Linea di Attività: *Università Campus Bio-medico, Roma*

Mese inizio previsto: 1 (gennaio 2022)

Mese inizio effettivo: 1 (gennaio 2022)

Mese fine previsto: 18 (giugno 2023)

Mese fine effettivo: 18 (giugno 2023)

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Studio e modellazione di componenti per la produzione, il trattamento e l'accumulo di idrogeno elettrolitico e per la sua separazione da miscele contenenti metano"

Responsabile scientifico ENEA: Alberto, Giaconia

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Vincenzo Piemonte

## Indice

|    |                                                                          |    |
|----|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | RISULTATI ATTESI .....                                                   | 3  |
| 2  | RISULTATI OTTENUTI.....                                                  | 4  |
| 3  | PRODOTTI ATTESI.....                                                     | 6  |
| 4  | PRODOTTI SVILUPPATI .....                                                | 7  |
| 5  | ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI .....                  | 8  |
| 6  | SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE .....                                      | 9  |
| 7  | DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....                                     | 10 |
| 8  | CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE..... | 21 |
| 9  | PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....                                          | 21 |
| 10 | EVENTI DI DISSEMINAZIONE .....                                           | 21 |

# 1 Risultati attesi

## 1.1 Analisi di letteratura

Individuazione e analisi dei processi utilizzati in diversi ambiti (sperimentali e/o industriali) per la produzione di idrogeno elettrolitico da tecnologia alcalina e dei relativi modelli.

## 1.2 Confronto prestazionale

Individuazione dei principali indicatori di performance (KPI) dei diversi processi analizzati e confronto prestazionale dei vari processi sulla base degli indicatori individuati.

## 1.3 Sviluppo di modellistica

Sviluppo di modellistica dedicata con software di tipo “custom modelling” per la simulazione dei processi elettrolitici alcalini reali.

## 2 Risultati ottenuti

### 2.1 Analisi di letteratura

Individuazione e analisi dei processi utilizzati in diversi ambiti (sperimentali e/o industriali) per la produzione di idrogeno elettrolitico da varie tecnologie (alcalina, a membrana ed alta temperatura). Sono state individuate le diverse tipologie di modellazione già presenti in letteratura.

### 2.2 Confronto prestazionale

Individuazione dei principali indicatori di performance (Key Performance Indicators, KPIs) dei diversi processi analizzati e confronto prestazionale di essi sulla base degli indicatori individuati. Tra i KPIs di natura tecnica considerati troviamo la capacità, requisiti di purezza, l'efficienza ed il consumo energetico, mentre tra quelli relativi all'impatto ambientale ci sono: GWP (Global Warming Potential,  $\text{kgCO}_2\text{eq/kgH}_2$ ) ed AP (Acidification Potential,  $\text{kgSO}_2\text{eq/kgH}_2$ ) e CED (Cumulative Energy Demand,  $\text{MJ/kgH}_2$ ).

### 2.3 Sviluppo di modellistica

Sviluppo di modellistica dedicata con software di tipo "custom modelling" per la simulazione dei processi elettrolitici alcalini reali.

#### 2.3.1 Modellazione di uno stack elettrolitico alcalino reale

È stato modellato uno stack elettrolitico alcalino reale ErreDue da 25 kW presente presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia sulla base di una curva di polarizzazione modellata su dati sperimentali. Lo stack in questione presenta NaOH come elettrolita e non sono presenti in letteratura relativi modelli. Il software utilizzato è Excel così da essere facilmente fruibile anche a livello industriale.

#### 2.3.2 Simulazione stazionaria del Balance of Plant (BoP) reale

Il modello dello stack è stato poi integrato in una simulazione in condizioni stazionarie dell'intero BoP reale presente presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia. Il software utilizzato è stato Aspen Plus integrato con il foglio di calcolo Excel per lo stack così da essere facilmente fruibile. Si è ottenuta una simulazione fedele alla produzione elettrolitica reale, validata in condizioni nominali (elettrolizzatore da 25 kW con produzione di idrogeno di 350 g/h ( $4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) a valle di tutti i trattamenti nel BoP.

#### 2.3.3 Simulazione dinamica dello stack reale accoppiato con un impianto fotovoltaico reale

È stato poi acquisita anche una curva di potenza fornita da un impianto fotovoltaico reale presente in ENEA Casaccia con potenza nominale 25 kW. Sulla base di questa curva è stata costruita una performance dinamica dell'elettrolizzatore come serie di stati stazionari per ciascuno dei quali è stato usato il modello suddetto. Il

software utilizzato è stato Matlab. Grazie a questo modello è stato possibile ottenere l'andamento periodico della portata di idrogeno lungo un intero anno. Tale risultato rappresenta un contributo originale ed innovativo che costituisce un avanzamento dello stato dell'arte.

### 3 Prodotti attesi

#### 3.1 *Rapporto tecnico (Deliverable)*

Rapporto tecnico (R2.15-1) "Analisi e ottimizzazione di processo per la produzione di idrogeno elettrolitico basato sulla tecnologia alcalina".

#### 3.2 *Software con simulazione*

Software in "custom modeling" (S2.15-1): "Simulazione di componenti per la produzione di idrogeno elettrolitico basato sulla tecnologia alcalina".

## 4 Prodotti sviluppati

### 4.1 *Rapporto tecnico (Deliverable)*

Rapporto tecnico (R2.15-1) "Analisi e ottimizzazione di processo per la produzione di idrogeno elettrolitico basato sulla tecnologia alcalina".

### 4.2 *Modellazione di uno stack industriale reale*

La modellazione è stata eseguita su Excel in modo da essere facilmente accessibile. È possibile valutare stack differenti fornendo un'opportuna curva di polarizzazione e variando le condizioni operative in input.

### 4.3 *Simulazione del BoP reale in condizioni stazionarie su Aspen Plus con modello integrato in Excel*

La simulazione è stata eseguita con il software Aspen Plus nel quale è stato integrato il suddetto foglio di calcolo Excel. È possibile cambiare i parametri e le condizioni operative utilizzate sia nel foglio Excel per quanto riguarda lo stack sia nella simulazione Aspen per quanto concerne le unità di trattamento a valle dello stack.

### 4.4 *Simulazione dinamica dello stack elettrolitico accoppiato con l'impianto PV reale*

È stato acquisito un foglio Excel con tutti i dati relativi ad un profilo di potenza da un impianto fotovoltaico reale con dati orari lungo un intero anno.

La simulazione dinamica è stata eseguita con il software Matlab in cui è stato implementato un codice che riceve in input tale profilo di potenza del fotovoltaico e restituisce in output il corrispettivo profilo di idrogeno prodotto dallo stack elettrolitico reale opportunamente modellato come riportato nella Sezione 4.2. Altri output del codice sono due grafici significativi:

- produzione giornaliera di idrogeno lungo l'intero anno;
- confronto tra: una produzione oraria in una giornata media dell'anno, in una giornata media ad agosto ed in una giornata media a gennaio.

È possibile usufruire di questo modello anche fornendo profili di potenza in ingresso diversi ed ovviamente variare i parametri operativi dello stack per effettuare valutazioni prestazionali.



## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

### 5.1 *Ottimizzazioni*

Trattandosi di un elettrolizzatore industriale, operante a condizioni fissate di temperatura e pressione, non è stato possibile effettuare analisi di sensitività ed ottimizzazioni sullo stack elettrolitico e quindi neanche ottenere curve di polarizzazione in condizioni diverse da quelle operative.

### 5.2 *Modellazione dinamica*

La modellazione in condizioni dinamiche dell'elettrolizzatore è stata effettuata considerando le performance dinamiche dell'elettrolizzatore come una serie di stati stazionari in quanto la risposta elettrochimica degli elettrolizzatori è molto rapida rispetto all'intero sistema. Tale approccio trova riscontro anche in recenti lavori di letteratura.

In aggiunta, la modellazione dinamica è stata effettuata considerando l'accoppiamento con input di potenza provenienti da un impianto fotovoltaico reale.

## 6 Sintesi delle attività svolte

Una ricerca bibliografica approfondita ha esaminato e confrontato varie tecnologie elettrolitiche, sia sul mercato che sperimentali. Dopo la valutazione dei modelli esistenti, l'obiettivo principale è stato sviluppare modelli stazionari e dinamici innovativi per descrivere con precisione le prestazioni degli impianti di elettrolisi alcalina in condizioni variabili dovute alle fluttuazioni delle fonti rinnovabili. Sono stati realizzati modelli specifici per l'elettrolisi alcalina, mirando a garantire prestazioni ottimali (resa e purezza) lungo l'intero ciclo di vita dell'impianto, non solo in condizioni stazionarie. Questi modelli, grazie alla loro natura “custom modelling”, sono personalizzabili ed adattabili alle fluttuazioni delle fonti rinnovabili, alle esigenze degli operatori e al mercato e possono essere utilizzati con diverse tecnologie e materiali, inclusi i catalizzatori. Ciò fornisce uno strumento prezioso per confrontare alternative, offrendo un significativo valore aggiunto alle aziende del settore energetico interessate all’ottimizzazione della produzione di idrogeno.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

### 7.1 Studio di letteratura e confronto prestazionale

È stata effettuata una ricerca di letteratura per valutare le diverse tecnologie elettrolitiche attualmente presenti sia in ambito industriale che sperimentale, confrontando le loro diverse performance (**Tabella 1**).

**Tabella 1.** Confronto delle principali specifiche tecniche e KPIs delle diverse tecnologie elettrolitiche.

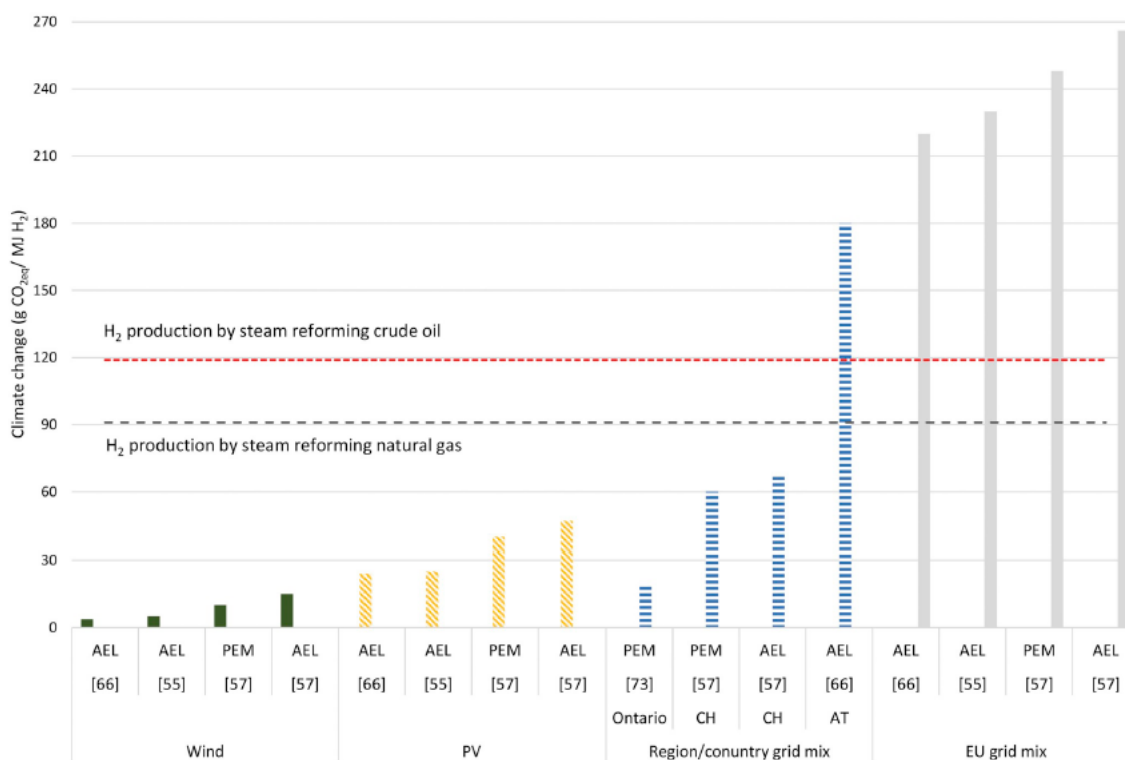
| Specifica [UDM]                                        | AE            | PEME          | SOE     | AEME        |
|--------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------|-------------|
| Technology Readiness Level (TRL)                       | 9             | 6-7           | 2-3     | 2-3         |
| Densità di corrente nominale [A/cm <sup>2</sup> ]      | 0.2-0.8       | 1-2           | 0.3-1   | 0.2-2       |
| Range di voltaggio [V]                                 | 1.4-3         | 1.4-2.5       | 1.0-1.5 | 1.4-2       |
| Temperatura operativa [°C]                             | 70-90         | 50-80         | 700-850 | 40-60       |
| Pressione di cella [bar]                               | <30           | <30           | 1       | <35         |
| Range di carico [%]                                    | 15-100        | 5-120         | 30-125  |             |
| Capacità di produzione [Nm <sup>3</sup> /h]            | 760           | 40            | 40      | 5-100       |
| Purezza H <sub>2</sub> [%]                             | 99.9-99.9998  | 99.9-99.9999  | 99.9    | 99.9-99.999 |
| Voltage Efficiency (LHV) [%]                           | 50-69         | 50-68         | 75-85   | 52-67       |
| Efficienza elettrica (stack) [kWh/kgH <sub>2</sub> ]   | 47-66         | 47-66         | 35-50   | 51.5-66     |
| Efficienza elettrica (sistema) [kWh/kgH <sub>2</sub> ] | 50-78         | 50-83         | 40-50   | 57-69       |
| Lifetime (stack) [hours]                               | 60,000        | 50,000-80,000 | <20,000 | >5,000      |
| Carico nominale stack [kW]                             | 1000          | 1000          | 5       | 2.5         |
| Area elettrodo [cm <sup>2</sup> ]                      | 10,000-30,000 | 1,500         | 200     | <300        |
| Cold start (fino a carico nominale) [min]              | <50           | <20           | >600    | <20         |
| Costi capitali (stack, mininum 1 MW) [USD/kW]          | 270           | 400           | 2,000   | -           |
| Costi capitali (system, mininum 10 MW) [USD/kW]        | 500-1000      | 700-1400      | -       | -           |

Sono stati, inoltre, valutati e confrontati accoppiamenti con diverse fonti rinnovabili (solare, eolico e nucleare). Il confronto è stato realizzato in termini di impatto ambientale e consumo energetico, facendo una media dei valori di GWP, AP e CED trovati in letteratura (**Tabella 2**).

**Tabella 2.** Confronto impatto ambientale elettrolizzatori accoppiati con diverse fonti energetiche (solare fotovoltaico (PV), eolico e nucleare). La tabella riporta i valori medi e, tra parentesi, i range riscontrati in letteratura.

|                                               | Solare (PV) | Eolico      | Nucleare |
|-----------------------------------------------|-------------|-------------|----------|
| GWP [kgCO <sub>2</sub> eq./kgH <sub>2</sub> ] | 4.3(2-6)    | 1.5 (1-3)   | 2        |
| AP [gSO <sub>2</sub> eq./kgH <sub>2</sub> ]   | 24.7 (8-40) | 2.8 (2.5-3) | 8 (5-15) |
| CED [MJ/kgH <sub>2</sub> ]                    | 33.4        | 9.9         | -        |

Inoltre, la **Figura 1** Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. fornisce una valutazione completa e un confronto degli effetti sia delle fonti di elettricità che delle tecnologie di elettrolisi sul GWP rispetto allo Steam Methane Reforming (SMR) convenzionale.



**Figura 1.** Confronto sugli effetti sia della fonte energetica che della tecnologia elettrolitica sui risultati di GWP in confronto con processi di steam reforming convenzionali.

Si è inoltre valutato quali fossero i modelli già presenti in letteratura che descrivessero opportunamente la tecnologia elettrolitica alcalina. È stata osservata innanzitutto la mancanza di un modello che descrivesse opportunamente un impianto industriale come quello presente presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia avente soluzione elettrolitica al 30% di NaOH. Infatti, in letteratura si trovano esclusivamente curve di polarizzazione ottenute con soluzioni elettrolitiche a base di acqua e KOH. Inoltre, è stata osservata la mancanza di modellazioni di stack industriali facilmente fruibili e personalizzabili per le industrie. Infine, si è osservata la mancanza di modelli integrati di BoP con la relativa fonte energetica ed in particolare nel caso di fonti rinnovabili. Tali lacune vengono superate attraverso l'approccio modellistico riportato di seguito.

## 7.2 Modellazione di un elettrolizzatore alcalino reale

È stato utilizzato un elettrolizzatore industriale alcalino ErreDue presente presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia con le seguenti specifiche:

- Potenza elettrica nominale: 25 kW;
- Corrente nominale: 220 A;
- Area attiva elettrodi: 1133,54 cm<sup>2</sup>;
- Soluzione elettrolitica al 30% di NaOH;
- Capacità massima di idrogeno 4.4 Nm<sup>3</sup>/h;
- Capacità massima di ossigeno 2.2 Nm<sup>3</sup>/h;
- Pressione operativa: 12 bar;
- Temperatura operativa: 6°C;
- Purezza idrogeno prodotto: 99.3-99.8%

Per costruire la curva di polarizzazione dell'elettrolizzatore, è stato preso da letteratura il suddetto modello empirico di Ulleberg a sei parametri di fitting (**Equazione 1**) :

$$V_{cell}[V] = V^0 + (r1 + r2T) \cdot i + s \cdot \log \left[ \left( t1 + \frac{t2}{T} + \frac{t3}{T^2} \right) \cdot i + 1 \right] \quad (1)$$

Che a pressione (P) e temperatura (T) costanti, come nel caso reale studiato, diventa un'equazione a tre parametri (**Equazione 2**):

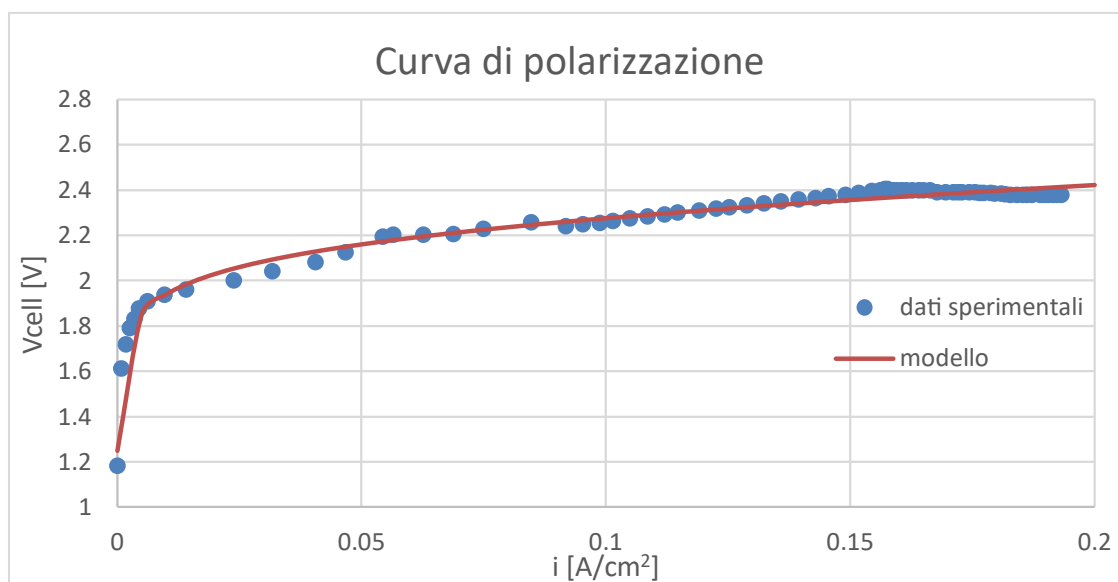
$$V_{cell}[V] = V_{rev} + r \cdot i + s \cdot \log[t \cdot i + 1] \quad (2)$$

Questo modello correla il voltaggio di cella ( $V_{cell}[V]$ ) all'intensità di corrente ( $i$  [A/cm<sup>2</sup>]) e quindi per determinare i tre parametri è stata effettuata una campagna sperimentale per ottenere dati di voltaggio e corrente a partire dall'accensione dell'elettrolizzatore fino al raggiungimento della corrente nominale di 220 A che, data la suddetta area attiva dell'elettrodo, corrisponde ad una densità di corrente di 0.9 A/cm<sup>2</sup>.

Effettuando un fitting di questi dati sperimentali sul modello di Ulleberg a temperatura e pressione costante (**Equazione 2**), secondo il metodo dei minimi quadrati, è stato possibile stimare i tre parametri (Errore. L'autoriferimento non è valido per un segnalibro.) ed ottenere il modello della curva di polarizzazione dell'elettrolizzatore (**Figura 2**). Tutti i suddetti calcoli sono stati effettuati su foglio Excel, così da essere facilmente fruibili.

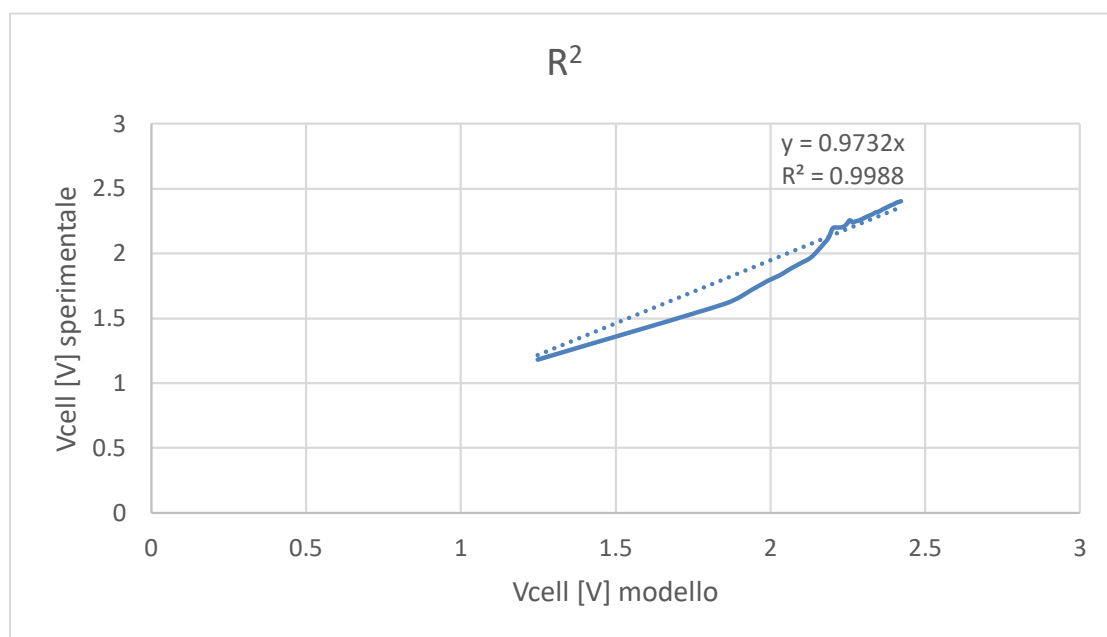
**Tabella 3.** Parametri di fitting stimati con il modello di Ulleberg.

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| $r$ [ $\Omega \text{ cm}^2$ ]  | 0.619     |
| $s$ [V]                        | 0.282     |
| $t$ [ $\text{cm}^2/\text{A}$ ] | 26943.802 |



**Figura 2.** Curva di polarizzazione dell'elettrolizzatore alcalino reale ottenuta tramite fitting di dati sperimentali.

La bontà della stima è stata verificata calcolando il coefficiente di correlazione ( $R^2$ ) il cui valore ottenuto è pari a 0.9988 come riportato di **Figura 3**.



**Figura 3.** Calcolo del coefficiente di correlazione ( $R^2$ ).

La curva di polarizzazione ottenuta è confrontabile ad altre presenti in letteratura relative ad elettrolizzatori con soluzioni elettrolitiche a base di KOH, anziché NaOH come nel caso studio presente.

Il fitting effettuato con Excel è stato integrato con un opportuno modello che ricevendo in input valori definiti di potenza ed portata d'acqua ( $\dot{n}_{H_2O,in}$ ), restituisce in output le portate di idrogeno ( $\dot{n}_{H_2}$ ) sulla base dell'equazione di Faraday (**Equazione 3**) e della curva di polarizzazione, mentre le portate di ossigeno prodotto ( $\dot{n}_{O_2}$ ) e di acqua non convertita ( $\dot{n}_{H_2O,out}$ ) vengono fornite dal set di **Equazioni 4-6**.

$$\dot{n}_{H_2} \left[ \frac{mol}{s} \right] = \eta_{Far} \frac{I[A]}{z_i F \left[ \frac{C}{mol} \right]} \quad (3)$$

$$\dot{n}_{O_2} \left[ \frac{mol}{s} \right] = 2 \dot{n}_{H_2} \left[ \frac{mol}{s} \right] \quad (4)$$

$$\dot{n}_{H_2O,conv} \left[ \frac{mol}{s} \right] = \dot{n}_{H_2} \left[ \frac{mol}{s} \right] \quad (5)$$

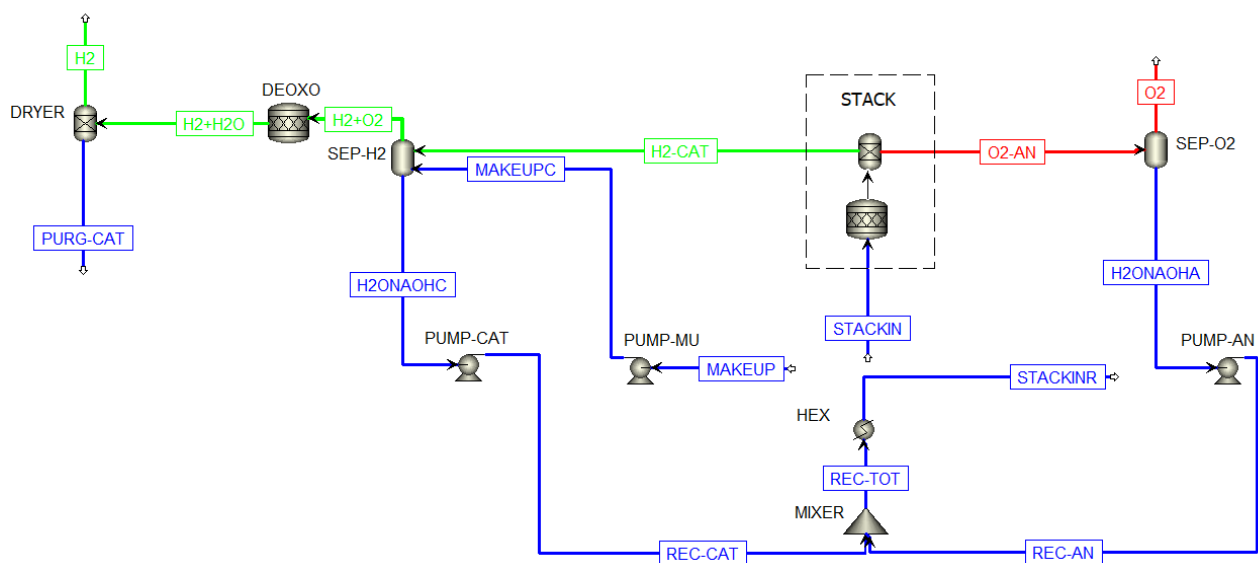
$$\dot{n}_{H_2O,out} \left[ \frac{mol}{s} \right] = \dot{n}_{H_2O,in} \left[ \frac{mol}{s} \right] - \dot{n}_{H_2O,conv} \left[ \frac{mol}{s} \right] \quad (6)$$

Dove:  $\eta_{Far}$  è l'efficienza di Faraday che è stata considerata pari a 0.9 sulla base di valutazioni presenti in letteratura,  $I[A]$  la corrente in Ampere,  $z_i = 2$  è il fattore stechiometrico dell'idrogeno prodotto,  $F = 96487 \frac{C}{mol}$  è la costante di Faraday e  $\dot{n}_{H_2O,conv} \left[ \frac{mol}{s} \right]$  è la portata molare di acqua convertita in idrogeno ed ossigeno.

La validazione del modello è stata effettuata attraverso il confronto tra i valori ottenuti dalla simulazione e quelli reali considerando le prestazioni nominali: 4 Nm<sup>3</sup>/h= 350 g/h di H<sub>2</sub> per una potenza nominale di 25 kW. Trattandosi di un modello parametrizzato, cambiando i dati sperimentali V-i ed altre condizioni operative, è possibile valutare anche le prestazioni di altri elettrolizzatori.

### 7.3 Simulazione in condizioni stazionarie del BoP

Il modello di stack descritto nella **Sezione 7.2** è stato poi integrato in una simulazione stazionaria dell'intero BoP presente presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia utilizzando il software Aspen Plus. Il modello Excel dello stack è stato integrato con un Calculator in Aspen in modo da sovrascrivere i bilanci di materia e di energia dello stack. Lo schema di processo dell'intero BoP è riportato in **Figura 4**.



**Figura 4.** Schema di processo dell'intero BoP industriale.

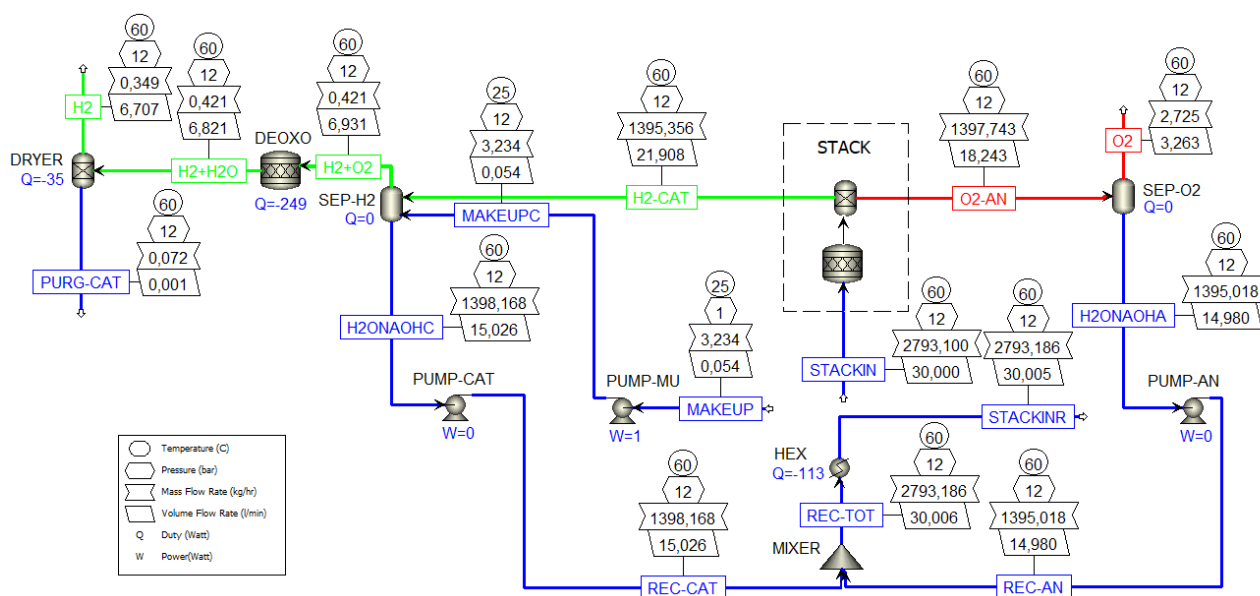
All'uscita dello stack la portata di idrogeno prodotto lato catodo (H2-CAT) e la portata di ossigeno prodotto lato anodo (O2-AN) devono essere separate dalla soluzione elettrolitica in due rispettive colonne di separazione, qui simulate con due flash (rispettivamente 'SEP-H2' e 'SEP-O2') a 60°C e 12 bar. Da questi flash uscirà dal basso la portata di soluzione elettrolitica da ricircolare e dall'alto il prodotto grasso con un determinato grado di purezza. Lato catodo è stato inserito un make-up di acqua (MAKEUP) a 25°C e 1 bar che viene successivamente compresso (MAKEUPC) a 12 bar tramite una pompa (PUMP-MU), la cui portata viene opportunamente controllata (Design-Spec).

Lato anodo, l'ossigeno prodotto (O2) viene liberato in atmosfera.

Lato catodo invece, essendo l'idrogeno il prodotto di principale interesse ed essendo solitamente miscelato ancora con un 1%vol di O<sub>2</sub> (secondo osservazioni sperimentali sull'impianto), la corrente 'H2+O2' in uscita dal separatore deve passare in un De-oxidizer catalitico (con Platino) (DEOXO) che converte l'ossigeno rimasto in acqua consumando una minima quantità dell'idrogeno prodotto. Tale 'DEOXO' è stato simulato con un reattore stechiometrico a 60°C e 12 bar con conversione completa. In uscita dal reattore le correnti di idrogeno ed acqua residua (H2+H2O) vengono separate in due colonne zeolitiche di essiccamento. Dal momento che dalle colonne si ha una separazione completa delle due stream in ingresso, queste unità sono state simulate attraverso un apposito separatore (DRYER).



Effettuando la simulazione dando in input i parametri di lavoro nominali, si ottengono bilanci di materia che rispecchiano quelli dell'impianto reale. Tali bilanci sono riportati in **Figura 5** in termini di portate totali per ogni corrente e in termini di composizioni in **Tabella 4**.



**Tabella 4.** Bilanci di materia sia in termini di portate totali che di portate parziali ottenuti dalla simulazione su Aspen Plus.

| Nome della corrente | Flusso di massa | H2O          | H2        | O2        | NAO H | NA+         | H+           | OH-          |
|---------------------|-----------------|--------------|-----------|-----------|-------|-------------|--------------|--------------|
| UDM                 | kg/h            | kg/h         | kg/h      | kg/h      | kg/h  | kg/h        | kg/h         | kg/h         |
| STACKINR            | 2793.186        | 1254.10<br>1 | 0.00<br>4 | 0.08<br>4 | 0     | 884.57<br>2 | 1.72E-<br>16 | 654.424<br>6 |
| STACKIN             | 2793.098        | 1254.10<br>1 | 0         | 0         | 0     | 884.57<br>2 | 1.72E-<br>16 | 654.424<br>6 |
| H2-CAT              | 1395.356        | 625.439      | 0.36<br>0 | 0.05<br>7 | 0     | 442.28<br>6 | 8.55E-<br>17 | 327.212<br>3 |
| H2+O2               | 0.421           | 0.008        | 0.35<br>6 | 0.05<br>6 | 0     | 0           | 0            | 0            |

|          |          |              |           |           |   |             |              |              |
|----------|----------|--------------|-----------|-----------|---|-------------|--------------|--------------|
| H2+H2O   | 0.421    | 0.071        | 0.34<br>9 | 0         | 0 | 0           | 5.42E-<br>12 | 9.16E-11     |
| H2       | 0.349    | 0            | 0.34<br>9 | 0         | 0 | 0           | 0            | 0            |
| O2-AN    | 1397.742 | 625.439      | 0         | 2.80<br>4 | 0 | 442.28<br>6 | 8.55E-<br>17 | 327.212<br>3 |
| O2       | 2.725    | 0.004        | 0         | 2.72<br>1 | 0 | 0           | 0            | 0            |
| PURG-CAT | 0.0716   | 0.071        | 0         | 0         | 0 | 0           | 2.22E-<br>11 | 3.75E-10     |
| H2ONAOHC | 1398.169 | 628.666      | 0.00<br>4 | 0.00<br>1 | 0 | 442.28<br>6 | 8.74E-<br>17 | 327.212<br>3 |
| H2ONAOHA | 1395.017 | 625.435      | 0         | 0.08<br>3 | 0 | 442.28<br>6 | 8.55E-<br>17 | 327.212<br>3 |
| REC-CAT  | 1398.169 | 628.666      | 0.00<br>4 | 0.00<br>1 | 0 | 442.28<br>6 | 8.74E-<br>17 | 327.212<br>3 |
| REC-AN   | 1395.017 | 625.435      | 0         | 0.08<br>3 | 0 | 442.28<br>6 | 8.55E-<br>17 | 327.212<br>3 |
| REC-TOT  | 2793.186 | 1254.10<br>1 | 0.00<br>4 | 0.08<br>4 | 0 | 884.57<br>2 | 1.73E-<br>16 | 654.424<br>6 |
| MAKEUP   | 3.234    | 3.234        | 0         | 0         | 0 | 0           | 3.27E-<br>10 | 5.51E-09     |
| MAKEUPC  | 3.234    | 3.234        | 0         | 0         | 0 | 0           | 3.28E-<br>10 | 5.54E-09     |

Questi risultati sono coerenti con quelli trovati in letteratura per un elettrolizzatore avente KOH come elettrolita.

#### 7.4 Acquisizione della curva di potenza di un impianto PV reale

È stato possibile ottenere un profilo di potenza orario lungo un intero anno di un impianto fotovoltaico reale presente in ENEA Casaccia. Si tratta di un impianto fotovoltaico con potenza nominale di 25 kW (in rapporto 1:1 con l'elettrolizzatore) costituito da moduli LG NeON R 380Q1C -V5 monocristallini, ciascuno dei quali ha una potenza in condizioni standard di 380 W con area di 1.7272 m<sup>2</sup> ed una efficienza totale del 19%. Tali dati sono riportati in un foglio Excel allegato.

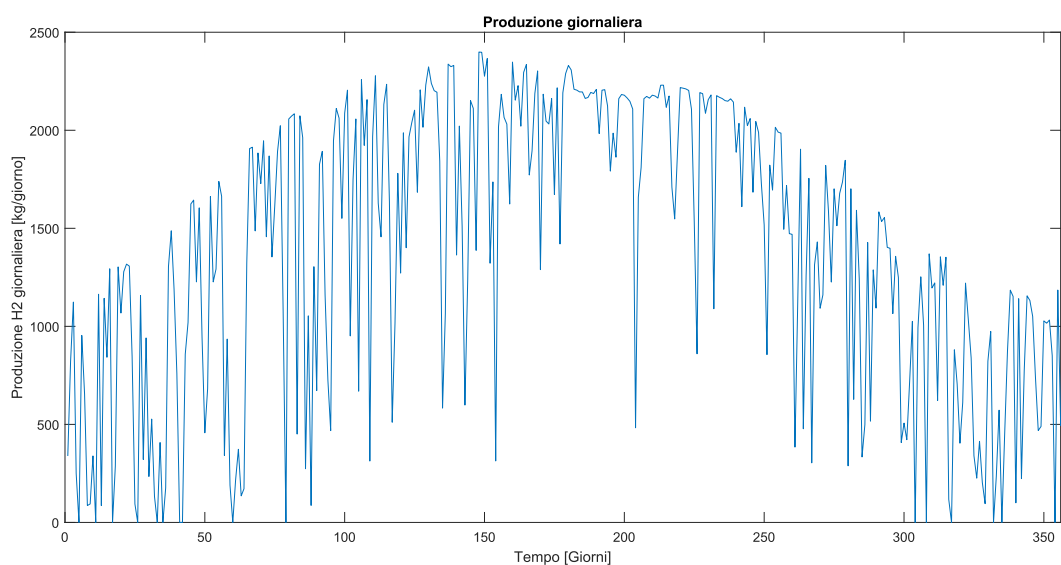
#### 7.5 Simulazione in condizioni dinamiche del BoP integrato con PV

Obiettivo finale è stato quello di accoppiare la simulazione del BoP descritta nella **Sezione 7.3** con il profilo di potenza presentato nella **Sezione 7.4**. A tal fine è stato integrato il profilo di potenza del PV nel Calculator

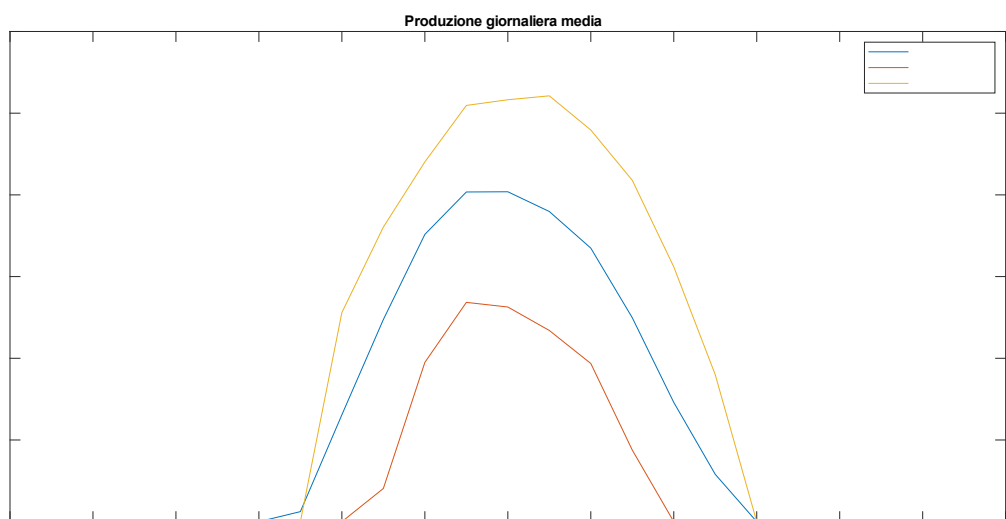
della simulazione stazionaria in Aspen Plus, in modo da poter cambiare manualmente l'input di potenza orario ed ottenere la corrispondente produzione di idrogeno all'uscita dello stack e a valle dei vari processi di trattamento e purificazione presenti nel BoP. Inoltre, per ottenere effettivamente un profilo dinamico non possibile su Aspen se non manualmente, è stato sviluppato un codice Matlab che restituisce un profilo orario della produzione di idrogeno in uscita dallo stack lungo tutto l'anno. In entrambe le simulazioni è stata assunta una efficienza del trasferimento di potenza elettrica dal PV all'elettrolizzatore pari al 95% ed un carico minimo di funzionamento dell'elettrolizzatore pari al 20% del carico nominale (5 kW).

Quella eseguita in ambiente Matlab è, dunque, una simulazione dinamica intesa come serie di successivi stati stazionari. È stato possibile sviluppare la simulazione dinamica in tal modo considerando, in base alla curva di polarizzazione, la rapida risposta dell'elettrolizzatore alla variazione di corrente. Tale impostazione è stata altresì confermata da evidenze riportate in letteratura, dove si evince chiaramente come una cella elettrolitica (e quindi lo stack) risponda elettrochimicamente in maniera veloce rispetto all'intero sistema. Per tale motivo è stato possibile considerare che l'equilibrio elettrico di una cella si raggiunga istantaneamente in ciascun time-step della simulazione. Quindi, anche a livello dinamico, una cella è considerata come un unico elemento resistivo non lineare, descrivibile matematicamente con curve di polarizzazione (analitiche o empiriche) che legano corrente e potenziale.

Inoltre, rielaborando i risultati di produzione oraria di idrogeno nel codice Matlab, è stato possibile ottenere la produzione giornaliera di idrogeno durante l'intero anno (**Figura 6**) e la produzione oraria durante un intero giorno effettuando un confronto tra una media annuale, una media durante il mese di gennaio ed una media durante il mese di agosto (**Figura 7**).



**Figura 6.** Produzione giornaliera di idrogeno durante l'intero anno.



**Figura 7.** Produzione oraria durante un intero giorno effettuando un confronto tra una media annuale, una media durante gennaio ed una media durante agosto

Dalla **Figura 6** si nota la presenza di molti picchi improvvisi con basse produzioni di idrogeno anche in giorni estivi (i.e. il 204esimo giorno, ossia il 23 luglio). Questo è dovuto probabilmente a giorni nuvolosi in cui effettivamente le potenze elettriche prodotte dal PV sono effettivamente basse. Tale risultato evidenzia l'intermittenza nella produzione di idrogeno nel caso di un accoppiamento unicamente con fonte energetica rinnovabile, quale il solare fotovoltaico. Infatti, anche in **Figura 7** si può notare come la produzione di idrogeno nel mese di agosto sia significativamente più grande rispetto a quella del mese di gennaio.

Ovviamente, questi risultati riguardano il caso di un fotovoltaico dimensionato in rapporto 1:1 con l'elettrolizzatore, senza la presenza di batterie di accumulo o integrazione con altre fonti elettriche.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non è stata richiesta alcuna consulenza all'interno dello svolgimento della LA.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Non è stata portata a termine ancora alcuna pubblicazione scientifica sull'attività svolta, ma è in fase di scrittura.

## 10 Eventi di disseminazione

Non è stata svolta alcuna disseminazione inerente all'attività svolta per la presente LA.