

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**  
*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE*  
*CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA*

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE**

In  
IMPIANTI MECCANICI M

**Progettazione di un impianto pilota per la caratterizzazione di  
dispositivi per il Power to Gas.**

CANDIDATO:  
Enrico Basso

RELATORE:  
Chiar.mo Prof. Ing. Cesare Sacconi

CORRELATORI:  
Prof. Ing. Marco Gentilini  
Prof. Ing. Marco Pellegrini  
Dott. Ing. Alessandro Guzzini

Anno Accademico [2019/2020]  
Sessione III

## Indice

Abstract .....	2
Introduzione .....	3
CAPITOLO 1 - L'IDROGENO. SITUAZIONE GLOBALE ATTUALE E INVESTIMENTI FUTURI .....	1
1.1 Il riscaldamento globale a causa dei gas serra ed il trattato di Parigi. ....	1
1.1.1 La presa di coscienza dell'effetto serra. ....	1
1.1.2 Il principio di funzionamento dell'effetto serra .....	3
1.1.3 I trattati per la riduzione dell'effetto serra .....	4
1.2 Criticità di gestione dei sistemi elettrici ad alta penetrazione di rinnovabili: Power to Gas come possibile soluzione.....	5
1.2.1 Le fonti rinnovabili.....	5
1.2.2 La necessità di stoccaggio per la produzione tramite rinnovabili .....	6
1.2.3 L'impiego dell'idrogeno come vettore energetico .....	7
1.3 L'Europa, progetto di sviluppo verso l'idrogeno. ....	7
CAPITOLO 2 - LE PRINCIPALI TECNOLOGIE NEL SETTORE IDROGENO. ....	9
2.1 L'elettrolisi: Generalità e funzionamento.....	9
2.1.1 L'elettrolisi dell'acqua.....	10
2.1.2 Le leggi di Faraday dell'elettrolisi. ....	10
2.1.3 Tensioni di elettrolizzazione e tensione isoterma o termo-neutrale. ....	11
2.2 Le tipologie di elettrolizzatori.....	14
2.2.1 Elettrolizzatore Alcalino (AEL). ....	14
2.2.2 L'elettrolizzatore PEM (PEMEL). ....	15
2.2.3 Elettrolizzatore ad Ossidi Solidi (SOEL). ....	16
2.3 I compressori meccanici. ....	18
2.3.1. Compressori alternativi. ....	19
2.3.2 Compressori a diaframma. ....	20
2.3.3 Compressori lineari.....	21
2.3.4 Compressori liquidi.....	23
2.4 Diverse soluzioni per l'accumulo dell'idrogeno.....	25
2.4.1 Accumulo allo stato gassoso.....	26
2.5 I Key Performance Indicators (KPI). ....	27
2.5.1 Documento 1: "Innovative large-scale energy storage technologies and power-to-gas concepts after optimisation" .....	29
2.5.2 Documento 2: " Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review" .....	30

2.5.3 Documento 3: “Evaluation of hydrogen production cost in different real case studies” .	35
2.5.4 Documento 4: “Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review”	36
2.5.5 Riassunto dei principali KPI.....	37
2.6 Progettazione dell’impianto ad idrogeno in virtù dei KPI.....	38
2.6.1 L’influenza di pressione e temperatura sulle prestazioni di un elettrolizzatore. ....	38
2.7 Le norme ATEX per la prevenzione da esplosioni :	42
CAPITOLO 3 - L'IMPIANTO OGGETTO DI TESI	44
3.1 La strumentazione adottata nell’impianto	44
3.1.1 Strumenti di misura	44
3.1.2 Il sensore di rilevazione di idrogeno	47
3.2 L’impianto nel dettaglio.....	51
3.2.1 Process Flow Diagram (PFD)	51
3.2.2 Piping and Instrumentation Diagram (P&ID).....	52
3.2.3 Input & Output List	59
3.2.4 Analisi del circuito elettrico e del quadro elettrico del compressore. ....	60
3.2.5 Scelta dei connettori.....	83
Conclusioni	89
Bibliografia:.....	92
Figure	96

## Abstract

L'elaborato analizza il lavoro svolto nella progettazione di un impianto di generazione e stoccaggio di idrogeno, finalizzato allo studio del processo e dei dispositivi che lo compongono.

Per spiegare le ragioni che hanno portato allo sviluppo di questa tesi, nel primo capitolo si fornisce una panoramica sull'evoluzione della tematica del riscaldamento globale e sugli enti internazionali che si stanno impegnando a risolverla. L'abbandono delle fonti fossili è, infatti, un obiettivo comune di molti paesi nel mondo, che vede investimenti sempre crescenti in settori mirati alla ricerca di soluzioni che contribuiscano ad una produzione energetica a zero emissioni. In quest'ottica l'idrogeno, come affermato dal sito ufficiale dell'unione europea, sembra poter essere "la chiave per raggiungere gli ambiziosi traguardi prefissati per la salvaguardia del clima", con un conseguente forte aumento di investimenti nel settore.

Nel secondo capitolo si fornisce una panoramica delle principali tecnologie e conoscenze inerenti all'argomento. Il capitolo inizia fornendo una descrizione del processo di elettrolisi, punto di partenza per la produzione dell'idrogeno, e prosegue in una descrizione delle tecnologie capaci di generare il fenomeno, gli elettrolizzatori. L'elaborato si concentra poi sulla criticità, di questo gas, di dover essere compresso, a causa della bassa densità gravimetrica che lo caratterizza, e degli strumenti finalizzati allo scopo, quanto ad i metodi per il suo stoccaggio in pressione.

Al fine di caratterizzare adeguatamente l'impianto, oggetto di studio, si è affrontata una ricerca per analizzare lo stato dell'arte di altre tecnologie nel settore, secondo le linee guida fornite dall'EERA (European Energy Research Alliance). Da questa ricerca sono stati raccolti e sintetizzati i valori dei KPI (Key Performace Indicators) punto di partenza per future considerazioni sull'efficienza dell'impianto. Si è analizzata poi la natura del gas idrogeno, da tenere in considerazione nelle scelte progettuali, che impone una conoscenza precisa dei suoi parametri per una determinazione puntuale e standardizzata dei KPI, indagando come, la loro variazione, influenzi l'efficienza dell'impianto. Si è infine svolta un'analisi delle norme ATEX che regolano l'impiego dell'idrogeno.

Nel terzo capitolo si entra nel dettaglio del progetto. Il capitolo inizia fornendo una panoramica della strumentazione di misura utilizzata nell'impianto quanto una descrizione del principio di funzionamento e di trasmissione del segnale al quadro elettrico. Viene poi fatta un'analisi del sensore di rilevazione di idrogeno, elemento chiave della sicurezza della struttura. Il capitolo prosegue nella descrizione del Process Flow Diagram (PFD), finalizzato a fornire una visione di insieme del funzionamento dell'impianto, e del Piping and Instrumentation Diagram (P&ID) dove vengono analizzate nel dettaglio le disposizioni della strumentazione, giustificandone l'impiego secondo i KPI da ricercare ed analizzare, precedentemente introdotti nel secondo capitolo. Viene poi svolta l'analisi dei circuiti elettrici per l'acquisizione dati e la gestione dei protocolli di sicurezza. Viene quindi analizzata la struttura dell'I/O list dell'impianto per passare poi ad uno studio approfondito del quadro elettrico del modulo di compressione e del suo funzionamento. Il capitolo termina con le analisi svolte per fornire al sistema la proprietà di essere trasportabile all'occorrenza, che si traduce nell'impiego di cavi multi polari per la trasmissione di segnale e potenza che forniscono all'impianto la proprietà di poter essere velocemente sconnesso e riconnesso in sicurezza, all'occorrenza.

## **Introduzione**

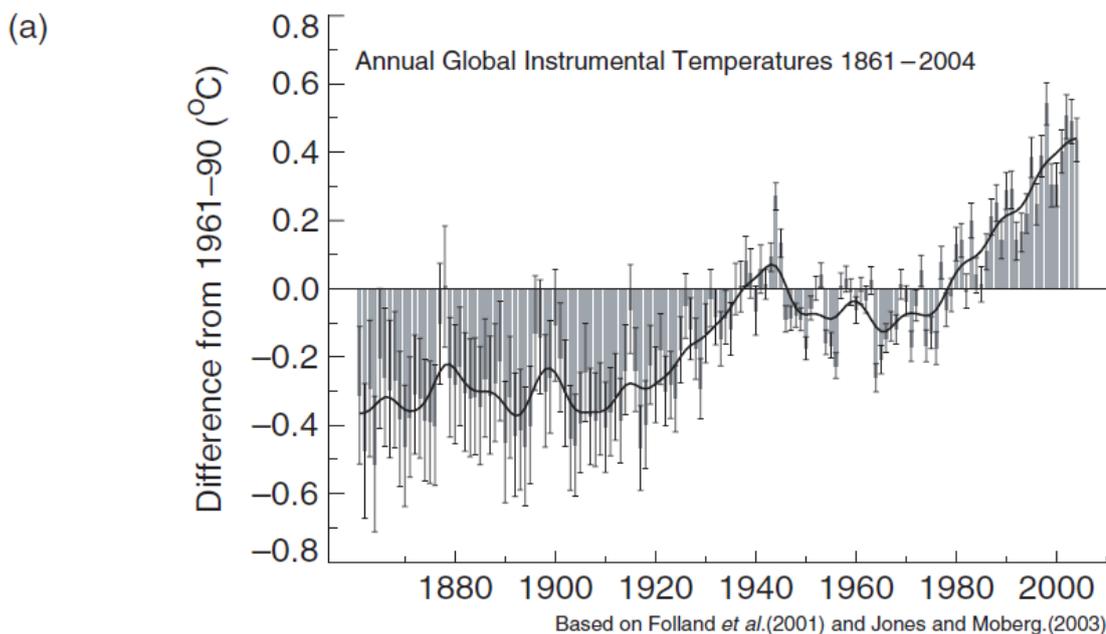
L'Europa, e molti stati del mondo, hanno compreso che una politica energetica basata su i combustibili fossili non può essere una soluzione sostenibile sul lungo termine. La progressiva riduzione dei bacini petroliferi e l'aumento degli inquinanti presenti in atmosfera prospettano scenari che non sembrano essere conciliabili con la vita come oggi la conosciamo. La transizione energetica verso sistemi più compatibili con l'equilibrio terrestre richiede però una profonda ricerca multisetoriale che trovi soluzioni sempre più efficienti che possano sostituire l'attuale sistema di approvvigionamento energetico. La mole di sforzi richiesti per poter attuare un cambiamento così radicale, in così poco tempo, richiede una collaborazione su larga scala di moltissime realtà che perseguano una profonda ricerca tecnologica finalizzata a questo scopo. Lo studio sarà quindi il punto di partenza fondamentale ed imprescindibile per il raggiungimento dell'ambizioso progetto. Lo scopo di questa tesi è quello di analizzare ed affiancare la messa in servizio di un impianto per la ricerca nella produzione, stoccaggio e trasporto dell'idrogeno, una risorsa che si prospetta essere la colonna portante del passaggio energetico nei settori industriali pesanti, punto critico della transizione

## CAPITOLO 1 - L'IDROGENO. SITUAZIONE GLOBALE ATTUALE E INVESTIMENTI FUTURI

### 1.1 Il riscaldamento globale a causa dei gas serra ed il trattato di Parigi.

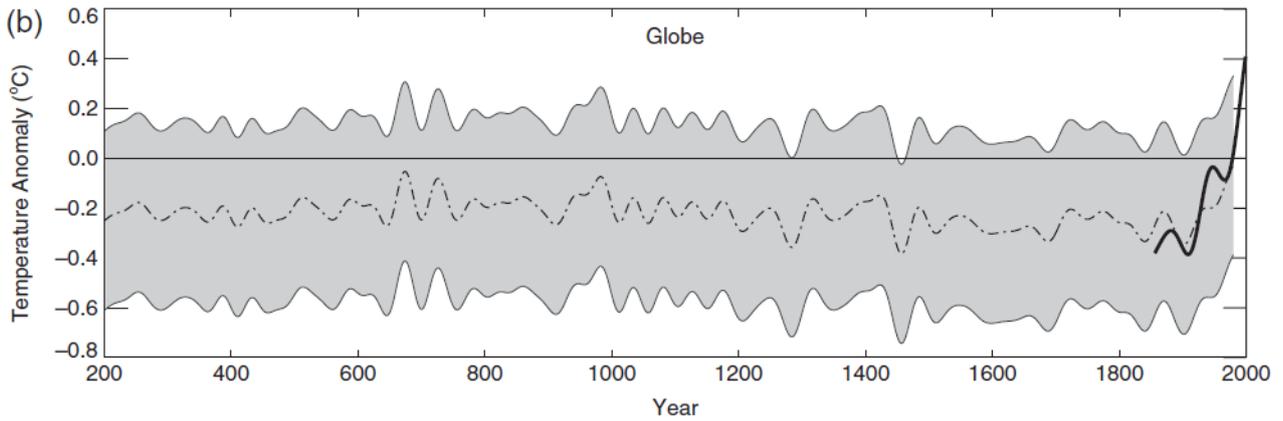
#### 1.1.1 La presa di coscienza dell'effetto serra.

Le prime ipotesi sul fatto che l'atmosfera potesse ricoprire un ruolo fondamentale sulla termoregolazione terrestre furono avanzate da Jean Baptiste Joseph Fourier nel 1824. Lo studioso francese iniziò ad indagare sul perché la temperatura della superficie terrestre non subisse una forte escursione tra il periodo diurno, di forte esposizione alle irradiazioni solari, e quello notturno di emissione della radiazione verso lo spazio. Tra le tre ipotesi che Fourier indagò c'era anche quella di un effetto schermante dell'atmosfera, anche se definita in modo diverso da come noi la intendiamo oggi. Parlando dell'atmosfera Fourier infatti scrisse: "La temperatura della terra può essere aumentata dall'interposizione dell'atmosfera, poiché il calore nello stato di luce trova meno resistenza nel penetrare l'aria, che nel riattraversarla quando è stato riconvertito in calore non luminoso" [1]. Vari studiosi si susseguirono negli anni successivi nello studio del fenomeno; fu però solo nel 1896 che il chimico svedese Svante Arrhenius misurò l'aumento di concentrazione dei gas serra, stimando che un raddoppio della concentrazione del diossido di carbonio presente nell'aria a quei tempi, avrebbe portato ad un aumento della temperatura globale media di 5-6°C [2]. L'effetto trovò un riscontro politico, oltre che scientifico, solo nel 1988 dove fu riconosciuto che, dal 1980, la temperatura media globale era aumentata più velocemente di quanto avesse mai fatto precedentemente. Per la prima volta fu citata la teoria dell'effetto serra e fu fondato un comitato intergovernativo sui cambiamenti climatici l'IPCC (Intergovernment Panel on Climate Change) [3].



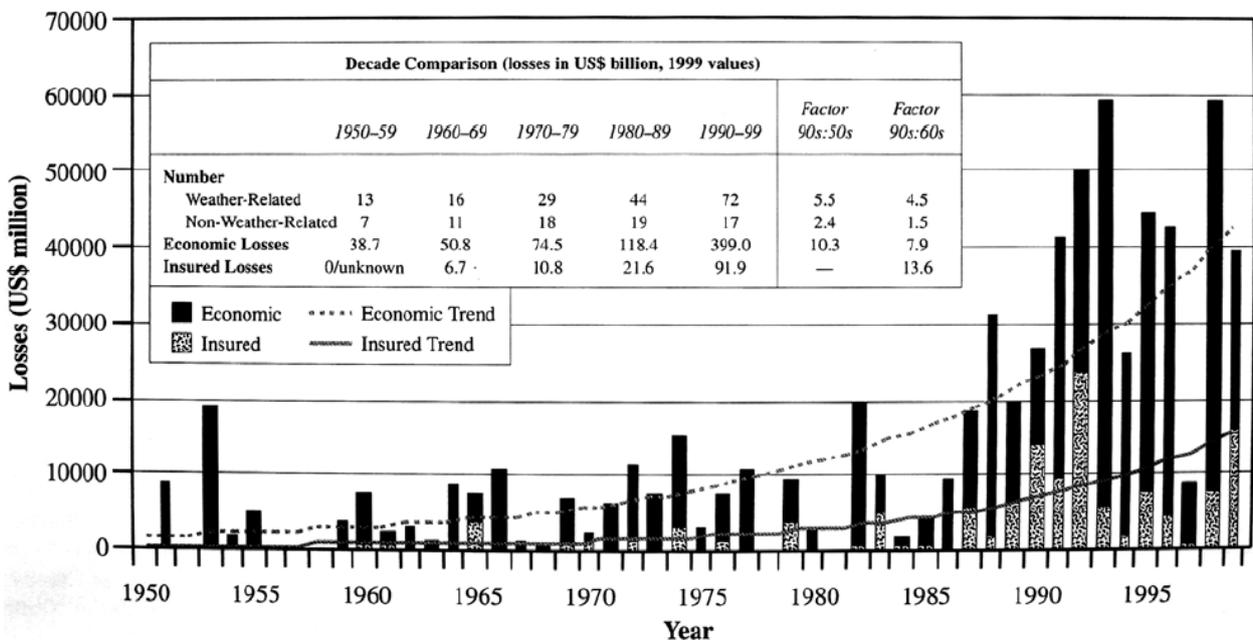
**Figura [1] a)** - Variazione della temperatura media della superficie terrestre negli ultimi 140 anni [4]. I segmenti in grigio rappresentano l'escursione termica di quell'anno, la linea nera rappresenta, di decade in decade, l'andamento della temperatura media nei vari anni.

Nota - L'IPCC: Creato nel 1988 dall'organizzazione mondiale meteorologica (WMO) ed il programma ambientale delle Nazioni Unite (UNEP), ha l'obiettivo di fornire ai governi informazioni che possano essere usate per lo sviluppo di politiche incentrate sul clima.



**Figura [1] b)** - Ricostruzione della temperatura media dal 200 al 2000 DC basata su dati proxy [5]. Sono riportate le anomalie riferite agli anni 1961-1990. L'andamento registrato negli ultimi 140 anni è riportato in nero. La parte ombreggiata indica l'area di confidenza entro il 95% della ricostruzione dei dati.

L'IPCC ha il ruolo di studiare e stimare i danni generabili dall'innalzamento medio globale delle temperature, quanto quello di studiare possibili soluzioni al problema. Le conseguenze causate dall'innalzamento medio delle temperature sono molteplici e si sono intensificate negli ultimi 50 anni, causando ingenti costi in molti paesi [2].

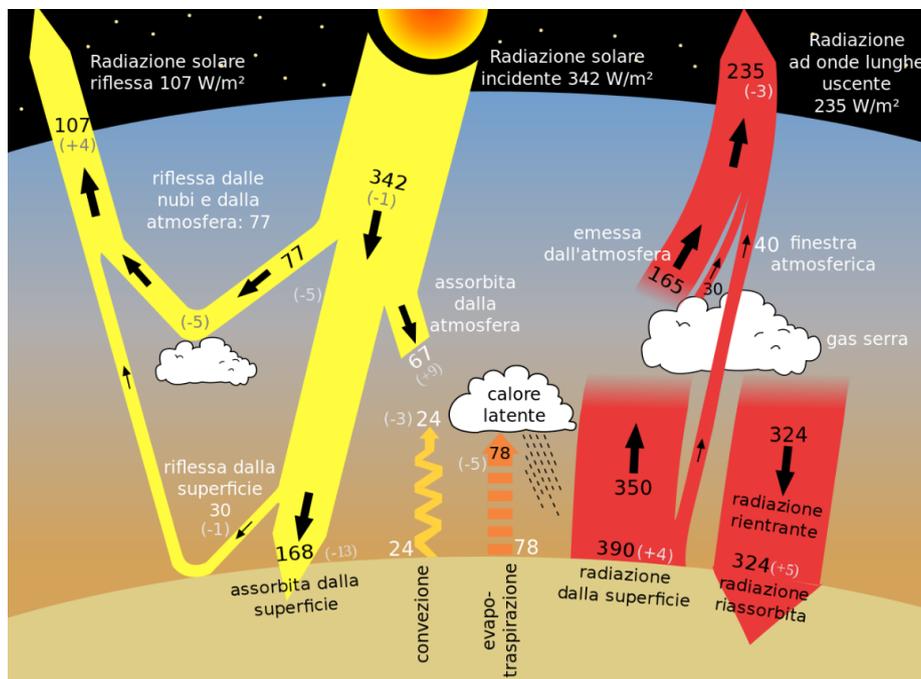


**Figura [2]-** Costi economici totali ed assicurativi causati da eventi climatici nella seconda metà del ventesimo secolo come riportato dall'agenzia di assicurazioni Munich Re. Entrambi i costi presentano una rapida impennata negli ultimi anni. Il numero di incidenti non imputabili al clima è riportata come paragone.

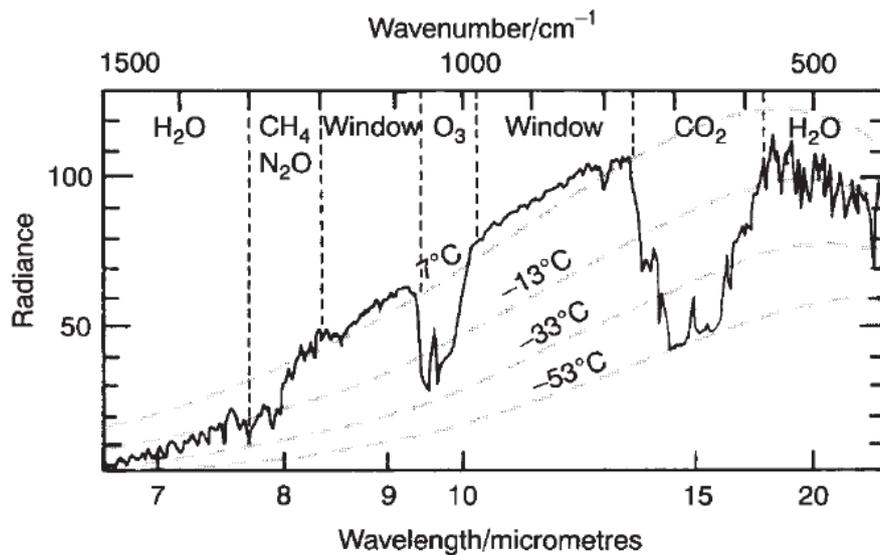
### 1.1.2 Il principio di funzionamento dell'effetto serra

Per spiegare il fenomeno del surriscaldamento globale ci si riferisce spesso al cosiddetto effetto serra. Tale effetto infatti ha un funzionamento analogo a quello che l'atmosfera genera sul pianeta. Come una serra, l'atmosfera permette il passaggio di una buona parte della luce visibile, altrimenti riflessa, che impatta quotidianamente la terra. (La radiazione media solare equivale a circa  $342 \text{ W/m}^2$ , mentre quella puntuale, di un terreno direttamente esposto al sole è di circa  $1370 \text{ W/m}^2$ .) Il pianeta assorbe parte della radiazione sotto forma di calore e la riemette, secondo le leggi fondamentali dell'irradiazione elettromagnetica, nella forma di onde infrarosse, non visibili ad occhio nudo [6]. Tali radiazioni sono parzialmente assorbite da alcuni gas causando dunque una riduzione della radiazione emessa dal pianeta nello spazio ed un conseguente aumento medio della temperatura.

Questi gas sono detti gas serra e costituiscono una piccola parte di tutti i gas presenti in atmosfera. I principali costituenti dell'aria, azoto ed ossigeno, infatti, non assorbono né emettono radiazioni termiche. Se questi fossero gli unici costituenti dell'atmosfera, questa non presenterebbe nuvole e non si avrebbe alcun effetto serra. In questo caso è stimabile che la temperatura media della terra sarebbe di  $-6^\circ\text{C}$ . I gas serra dunque, quali vapore acqueo, diossido di carbonio, ozono, metano ed ossido di azoto sono necessari per mantenere una temperatura media globale adeguata all'uomo, purché non eccedano certi valori di soglia. Tra i vari gas serra quello più importante risulta essere il diossido di carbonio. È stimato che l'industria moderna riversi in atmosfera circa 7 miliardi di tonnellate di  $\text{CO}_2$  all'anno [2].



**Figura [3]** – Schematizzazione della radiazione assorbita ed emessa dalla terra. A sinistra, in giallo, si può osservare l'irradiazione media giornaliera che il sole produce sulla terra. Parte di questa viene riflessa e parte assorbita rispettivamente dall'atmosfera e dal pianeta. A destra si può osservare l'emissione infrarossa emessa dalla terra e l'effetto schermante che i gas serra hanno sull'emissione.



**Figura [4]** – Radiazione termica infrarossa (la parte visibile dello spettro sta tra 0.4 e 0.7  $\mu\text{m}$ ) emessa dalla superficie terrestre e dall’atmosfera, osservata sopra il mar mediterraneo dalla strumentazione satellitare orbitante sopra l’atmosfera, che mostra il contributo dei diversi gas alla radiazione. Tra le lunghezze d’onda di 8 e 14  $\mu\text{m}$ , a parte per la banda dell’ozono, l’atmosfera, in assenza di nuvole, è sostanzialmente trasparente; questa parte dello spettro è detta “window region”. Le linee tratteggiate rappresentano la radiazione emessa da un corpo nero alla temperatura di 7°C, -13°C, -33°C e -53°C. L’unità di misura della radianza è  $\text{Wm}^{-2}$  per steradiante per numero d’onda.

### 1.1.3 I trattati per la riduzione dell’effetto serra

Il protocollo di Kyoto, adottato in Giappone l’11 dicembre 1997, ed entrato in vigore il 16 febbraio 2005, fu il primo accordo internazionale volto a combattere i cambiamenti climatici. Tale accordo stabilisce obiettivi vincolanti e quantificati di limitazione e riduzione dei gas ad effetto serra per i paesi aderenti (le parti) ovvero 37 paesi industrializzati e la Comunità Europea.

I gas ad effetto serra indicati nel protocollo furono: biossido di carbonio( $\text{CO}_2$ ), metano( $\text{CH}_4$ ), protossido di azoto( $\text{N}_2\text{O}$ ), idrofluorocarburi(HFC), perfluorocarburi(PFC) ed esafluoro di zolfo( $\text{SF}_6$ ). I paesi industrializzati (presenti nell’allegato I della UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change), riconosciuti come principali responsabili dei livelli di gas ad effetto serra presenti in atmosfera, si impegnavano a ridurre le loro emissioni di gas ad effetto serra, nel periodo 2008-2012, di almeno il 5% rispetto ai livelli del 1990.

Il protocollo prevedeva che i paesi dovessero raggiungere i propri obiettivi di riduzione principalmente attraverso misure nazionali. Tuttavia, il protocollo consentiva di ridurre le emissioni di gas a effetto serra attraverso meccanismi basati sul mercato, i cosiddetti “Meccanismi Flessibili”. Quest’ultima soluzione aveva il principale interesse di favorire i paesi in via di sviluppo, ancora troppo poco avanzati tecnologicamente per adottare politiche industriali green, che potevano comprare i crediti emissione, maturati dagli stati che si mantenevano sotto i livelli di inquinamento in pacchetti discreti, e risultare così comunque in regola per gli obiettivi del protocollo [7].

Al di là dei risultati raggiunti, il protocollo di Kyoto fu fondamentale perché creò un precedente nell’organizzazione collettiva sulle tematiche del riscaldamento globale. Diverse furono le proposte che

negli anni successivi si susseguirono per organizzare una risposta collettiva al problema, proposte che si concretizzarono nel dicembre del 2015 con l'accordo di Parigi.

Durante la conferenza sul clima (COP21), avvenuta nell'omonima città, 195 paesi adottano il primo accordo universale e giuridicamente vincolante sul clima al mondo. Tale accordo definisce un piano d'azione globale volto a mantenere l'aumento medio della temperatura mondiale ben al di sotto di 2°C rispetto ai livelli pre-industriali. Il 5 ottobre l'UE ha formalmente ratificato l'accordo di Parigi, consentendo la sua entrata in vigore il 4 novembre 2016 ed impegnandosi a ridurre le emissioni di gas ad effetto serra di almeno il 40% entro il 2030 (anno base 1990) [8].

I punti fondamentali che i governi hanno accettato di perseguire sono i seguenti:

- L'obiettivo a lungo termine di mantenere l'incremento medio della temperatura ben al di sotto dei 2°C rispetto a i livelli pre-industriali;
- Di puntare a limitare l'aumento della temperatura a 1.5°C; questo significherebbe ridurre drasticamente i rischi e l'impatto del cambiamento climatico;
- Di imporre il tetto massimo di emissione il prima possibile, riconoscendo che questo comporterà uno sviluppo più lento degli stati;
- Di impiegare politiche energetiche che portino a rapide riduzioni di emissioni in accordo con le migliori tecnologie energetiche attuabili disponibili, così da ottenere un bilancio tra emissioni e assorbimento nella seconda metà del secolo [9].

## **1.2 Criticità di gestione dei sistemi elettrici ad alta penetrazione di rinnovabili: Power to Gas come possibile soluzione**

Con il trattato di Parigi, 191 stati nel mondo hanno dunque preso a carico l'arduo compito di diminuire il riscaldamento globale, ricercando, di fatto, politiche industriali che riducano l'emissione di gas serra in atmosfera, prima tra tutti la CO<sub>2</sub>.

La soluzione dunque è quella di trovare altre fonti energetiche per sopperire la richiesta. Tra le possibili soluzioni, due sono per ora le più promettenti: l'affidamento al nucleare o alle fonti rinnovabili. Mentre il primo però risulta essere una soluzione controversa per diversi motivi che vanno dall'alta permanenza degli scarti come rifiuti tossici di difficile gestione, all'alta resistenza pubblica alla costruzione di centrali [10], la seconda strada promette alti margini di sviluppo e non presenta rilevanti resistenze sociali.

### **1.2.1 Le fonti rinnovabili**

Le fonti energetiche rinnovabili sono risorse energetiche che hanno la capacità di rinnovarsi in un tempo minore o uguale a quello in cui vengono consumate; al contrario le fonti non rinnovabili, dette anche esauribili, sono quelle il cui utilizzo ed impiego è limitato nel tempo a causa della loro irriproducibilità, o comunque al loro lentissimo rinnovamento (ad esempio, combustibili di origine fossile).

Si considerano fonti energetiche rinnovabili:

- L'irraggiamento solare;

- Il vento;
- Le biomasse;
- La geotermia;
- Le maree e le correnti marine in genere;
- Le precipitazioni utilizzabili tramite il dislivello di acque

È utile sottolineare come le più importanti forme di energia rinnovabile presenti sul nostro pianeta (ad eccezione di energia geotermica e delle maree) abbiano in realtà origine dall'irraggiamento solare.

Mentre le biomasse immagazzinano l'energia proveniente dal sole, per mezzo della fotosintesi clorofilliana sotto forma di energia chimica, che può essere rilasciata in un secondo momento, la conversione di energia proveniente direttamente dal sole (fotovoltaico, solare termico) o dal vento (eolico) presenta le caratteristiche sfavorevoli di imprevedibilità e discontinuità [11].

Per varie ragioni di natura ambientale ed economica il solo impiego di biomasse molto difficilmente può sopperire all'intera richiesta energetica di una nazione. E' opportuno quindi integrare altre forme di energia rinnovabile, in base alle condizioni geografiche in cui una nazione si colloca; in particolare le risorse rinnovabili che hanno maggior applicabilità sono quella eolica e soprattutto quella solare. Tuttavia, l'elevata aleatorietà della produzione tramite le fonti rinnovabili aumenta il rischio di portare ad uno sbilanciamento nella rete energetica, con possibili conseguenti blackouts o sovraccarichi, capaci di produrre ingenti danni al sistema [12].

### **1.2.2 La necessità di stoccaggio per la produzione tramite rinnovabili**

Per sopperire alla fluttuazione energetica giornaliera, la soluzione migliore è quella di stoccare l'energia prodotta in una forma ri-convertibile all'occorrenza. Diverse sono le possibilità per lo stoccaggio energetico che possono essere riassunte in quattro gruppi principali:

- Sistemi meccanici: stoccaggio tramite aria compressa(CAES), stoccaggio tramite pompe idroelettriche (PHS) e stoccaggio energetico tramite volano.
- Sistemi elettrici: Stoccaggio di energia magnetica tramite supercapacitori e superconduttori
- Sistemi elettrochimici: Batterie agli ioni di litio e batterie a flusso.
- Sistemi a produzione di idrogeno: basati sulla conversione della corrente elettrica in idrogeno, ri-convertibile all'occorrenza.

Le prime due tipologie di stoccaggio risultano essere limitate per una gestione energetica su larga scala perché richiederebbero serbatoi di accumulo di capacità eccessive oppure sono caratterizzati dall'avere possibilità di accumulo per tempi troppo brevi [13].

I sistemi di accumulo elettrochimici presentano ottimi rendimenti e risultano una tecnologia già ampiamente utilizzata in ambito industriale [14]. Preoccupa però l'impiego su larga scala che richiederebbe un utilizzo di materie prime ingente, che porterebbe, di contro, ad un loro aumento di costo ed irreperibilità. Un altro problema è l'elevato carico inquinante che queste comportano. Una possibile soluzione è quella del riciclo delle batterie, per il recupero dei materiali fondamentali per la loro produzione. Ad ora le tecnologie per il riciclaggio non sembrano, tuttavia, soddisfare la richiesta prevista del mercato e richiedono processi energeticamente molto costosi [15], [16].

### **1.2.3 L'impiego dell'idrogeno come vettore energetico**

Una soluzione promettente risulta essere l'utilizzo di idrogeno come fonte di accumulo energetico. L'idrogeno infatti, come sarà mostrato nel capitolo 2.3, risulta essere il miglior combustibile non nucleare presente in natura, con un potere calorifico inferiore di 120 MJ/kg. La combustione del solo idrogeno non comporta alcuna emissione di CO<sub>2</sub>, o altri inquinanti, e può anche essere convertito direttamente in energia elettrica grazie all'impiego di organi di conversione detti Fuel Cells. L'impiego di idrogeno è un'ottima soluzione anche in ambito automotive. Una politica energetica che abbandoni i combustibili fossili vedrà una forte crescita di veicoli elettrici, ad ora aventi bisogno di tempi di ricarica proibitivi per un rifornimento su larga scala. L'idrogeno vanta dei tempi di ricarica del veicolo paragonabili a quelli del rifornimento di combustibili fossili, compatibili con una piena penetrazione dei veicoli elettrici nel mercato [17].

Infine, l'idrogeno risulta essere una soluzione chiave per la riduzione di gas serra nei settori ad alta produzione di CO<sub>2</sub> dove l'ingente richiesta energetica rende l'elettrificazione difficile o impossibile. E' questo il caso di settori industriali quali la produzione di acciaio o i trasporti pesanti. Come vettore energetico a zero carbonio, l'idrogeno permetterebbe inoltre il trasporto di energia rinnovabile su grandi distanze e la possibilità di stoccaggio di alti volumi di energia [18].

Allo stato attuale, a parità di energia fornita, il rendimento di conversione in idrogeno è tuttavia inferiore rispetto a quello ottenuto con le batterie, con inoltre forti criticità di gestione che vanno dalla necessità di essere compresso per aumentare la propria densità energetica, insufficiente in condizioni STP, al costante monitoraggio per garantire che non si verifichino fughe che porterebbero a gravi effetti [14]. Una possibile soluzione, sul breve termine, è quella di impiegare l'idrogeno nella formazione di gas naturali ibridi, come il metano, che risultano più stabili in condizioni STP, ma che portano al rilascio di CO<sub>2</sub> alla combustione.

L'idea, nel perseguire questa possibilità, è quella di utilizzare la CO<sub>2</sub> di scarto delle industrie nei processi di metanazione, così da rendere l'impiego del metano una soluzione a bilancio zero nella produzione di diossido di carbonio.

### **1.3 L'Europa, progetto di sviluppo verso l'idrogeno.**

L'Europa ha previsto una strategia incentrata sull'idrogeno per la riduzione delle emissioni di carbonio che sarà perseguita attraverso tre step principali:

- Essendo molti dei processi per la produzione di idrogeno, ad ora in atto, inquinanti, per esempio nella produzione di idrogeno da combustibili fossili, nella prima fase (2020-24) l'obiettivo è quello di ridurre tutti i processi di produzione di idrogeno con un rilascio di CO<sub>2</sub> e di sostituirli gradualmente con una produzione a zero emissioni che possa sostenere la richiesta industriale già in atto. Questa fase prevede l'installazione di 6 Gigawatt di elettrolizzatori per la produzione di "idrogeno green" (idrogeno prodotto da rinnovabili) entro il 2024, e punta a produrre fino ad un milione di tonnellate di idrogeno "green". La soluzione attuale vede 1 Gigawatt di elettrolizzatori approssimativamente installati in Europa.
- Nella seconda fase (2024-2030) l'idrogeno necessita di diventare una parte fondamentale di un sistema energetico integrato con l'obiettivo strategico di installare almeno 40 Gigawatt di elettrolizzatori per la produzione di "idrogeno green" entro il 2030 e la produzione fino a 10 milioni di tonnellate di idrogeno nella sola Europa. L'impiego di idrogeno sarà gradualmente allargato a nuovi settori quali la produzione di acciaio, i trasporti merceologici su gomma, le ferrovie ed alcuni

trasporti marittimi. Rimarrà maggiormente prodotto in prossimità dell'utilizzatore o vicino a centri di produzione di energie rinnovabili, in un paradigma di ecosistema locale.

- La terza fase, dal 2030 in poi ed almeno fino al 2050, le tecnologie per la produzione e gestione dell'idrogeno green dovrebbero aver raggiunto la maturità e potranno essere impiegate su larga scala per raggiungere tutti i settori ad alta produzione di carbonio dove altre alternative non sono possibili o troppo costose.

Secondo il sito ufficiale dell'Unione Europea "l'impiego di idrogeno su larga scala risulterà essere la chiave per raggiungere gli ambiziosi traguardi prefissati per la salvaguardia del clima. E' il pezzo mancante nel puzzle per un'economia a zero emissioni di carbonio".

L'Europa stima il totale degli investimenti futuri per la produzione di idrogeno green, nella sola comunità Europea, tra i 180 e i 470 miliardi di dollari entro il 2050, e nell'auspicabile prospettiva di porsi come leader mondiale nella produzione di idrogeno e rinnovabili, unito all'impellente necessità di ridurre le emissioni, prevede che l'idrogeno potrebbe fornire il 24% di tutta la richiesta energetica mondiale nel 2050, con una vendita annua di 630 miliardi di euro [18].

## CAPITOLO 2 - LE PRINCIPALI TECNOLOGIE NEL SETTORE IDROGENO.

### 2.1 L'elettrolisi: Generalità e funzionamento.

L'elettrolisi può essere definita come la decomposizione di un composto, fuso o in soluzione, causata dal passaggio di corrente elettrica.

La corrente, misurata in Ampere, determina la quantità di carica elettrica, misurata in Coulomb, che nell'unità di tempo transita attraverso una superficie di controllo.

$$I[A] = \frac{Q[C]}{t[sec]}$$

La carica elettrica può essere trasportata attraverso la materia o sotto forma di elettroni o ioni in movimento. Nel primo caso la conduzione è detta metallica, mentre nel secondo è detta elettrolitica. E' proprio la migrazione degli ioni, soggetti ad un campo elettrico generato da una differenza di potenziale, che, nell'elettrolisi, permette il passaggio di una corrente elettrica. La differenza di potenziale è causata da un generatore collegato a due elettrodi, uno positivo detto Anodo ed uno negativo detto Catodo. Gli ioni migrano verso l'elettrodo di carica opposta dove, attraverso una reazione di ossido-riduzione acquistano o cedono elettroni in base alla propria valenza. Uno ione di valenza 1, come nel caso dell'idrogeno  $H^+$ , potrà acquistare o cedere un solo elettrone prima di equilibrarsi, uno ione di valenza 2, come nel caso del piombo  $Pb^{++}$ , potrà acquistare o cedere 2 elettroni prima di equilibrarsi, e così via [19].

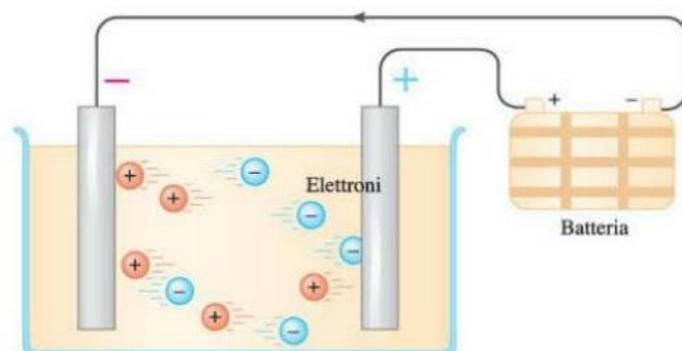


Figura [5] – Schematizzazione di una cella elettrolitica.

Quando si parla di reazioni chimiche è poco utile riferirle a singoli atomi. Risulta più utile considerare moli di reagenti e prodotti. Una mole è una quantità di atomi dello stesso elemento o della stessa molecola che possiede un peso in grammi pari al peso atomico dell'oggetto in considerazione. Essendo il peso una caratteristica propria di ogni elemento, una mole di qualsiasi entità contiene lo stesso numero di elementi, atomi o molecole. Tale numero è pari al Numero di Avogadro ( $=6,022 * 10^{23}$ ).

Per esempio:

I pesi atomici di rame ed ossigeno sono i seguenti:

O=16u

Cu=64u

u=unità di massa atomica.

il peso del rame è quindi 4 volte quello dell'ossigeno e tale proporzione è costante. Il peso di una mole di

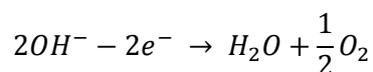
Cu, contenente  $6,022 \cdot 10^{23}$  atomi, è di 64 grammi. Una mole di O peserà sempre un quarto della mole di Cu e conterrà lo stesso numero di atomi poiché la proporzione è costante.[20]

$$\frac{1 \text{ atomo di O}}{1 \text{ atomo di Cu}} = \frac{2 \text{ atomi di O}}{2 \text{ atomi di Cu}} = \dots = \frac{1 \text{ mole di O}}{1 \text{ mole di Cu}} = \frac{1}{4}$$

### 2.1.1 L'elettrolisi dell'acqua.

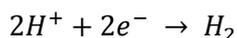
Nel caso dell'elettrolisi dell'acqua, questa, dalla sua forma neutra  $H_2O$ , si ripartisce in due ioni  $H^+$  e  $OH^-$ , entrambi di valenza 1. I costituenti ionici poi migrano verso i due elettrodi, in base alla propria carica, dove avverrà il processo di ossido riduzione.

La reazione all'anodo sarà:



Dove due moli di ioni  $OH^-$ , perderanno ciascuno una mole di elettroni  $e^-$  ed andranno a riformare una molecola di acqua e mezza molecola di  $O_2$ .

Mentre all'anodo sarà:



Dove due moli di ioni positivi  $H^+$  acquisteranno ciascuno una mole di elettroni e si ricombineranno in una molecola di  $H_2$  [21].

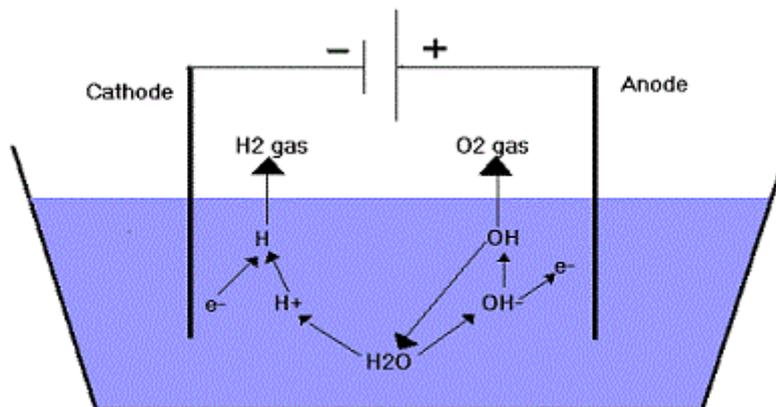


Figura [6] – Schema dell'elettrolisi dell'acqua.

### 2.1.2 Le leggi di Faraday dell'elettrolisi.

Le leggi di Faraday regolano quantitativamente l'elettrolisi e sono le seguenti:

1) Gli effetti chimici di un'elettrolisi (per effetti chimici si intende la quantità di materia scaricata agli elettrodi) sono direttamente proporzionali alla quantità di corrente passata attraverso la soluzione.

2) Le masse di differenti elementi liberati dalla stessa quantità di elettricità sono direttamente proporzionali ai loro equivalenti chimici.

L'equivalente chimico di una specie ossidante o riducente è la quantità di sostanza che rispettivamente acquista o cede una mole di elettroni [22].

Da tali leggi è possibile ricavare la quantità di massa di un elemento che viene liberata nell'elettrolisi dove questo è implicato.

Ogni elemento infatti possiede una massa molare ed una valenza.

Noto che, per scaricare una mole di elettroni è necessaria una quantità elettrica di circa 96500 Coulomb, pari ad 1 Faraday e che la quantità di moli di elettroni che una mole di elemento può liberare è definita dalla sua valenza, sapendo l'intensità di corrente, a cui una soluzione elettrolitica è sottoposta, ed il tempo, è possibile calcolare la massa equivalente liberata dalla reazione secondo l'equazione:

$$w = \frac{M}{n} \frac{I \times t}{F}$$

Dove:

w = peso in grammi dell'elemento ottenuto

M = Peso in grammi dello ione

n = valenza dello ione, rappresenta il numero di cariche che lo ione può scambiare

I = Intensità di corrente

t = definisce per quanto tempo è applicata l'intensità di corrente

F = Faraday, misurato in Coulomb

Esempio:

Ipotesi di avere un'intensità di corrente  $I = 96500[A] = 96500 \left[\frac{C}{sec}\right]$ .

Dopo 3 secondi la carica elettrica sarà sufficiente a liberare 3 moli di elettroni. La quantità di moli di Idrogeno(valenza 1) liberate sarà, dunque, uguale a 3moli, mentre nello stesso lasso di tempo la quantità di moli di argento (valenza 3) liberate sarà una. Per la stessa quantità di tempo quindi saranno liberate tre moli di Idrogeno ed una sola di argento [23].

### 2.1.3 Tensioni di elettrolizzazione e tensione isoterma o termo-neutrale.

La generazione di acqua a partire da i suoi costituenti fondamentali, idrogeno ed ossigeno, avviene con una produzione (o rilascio) di energia sotto forma di variazione di entalpia  $\Delta H$ .

Tale entalpia a sua volta è costituita da due forme energetiche ben distinte:

$$\Delta H = \Delta Q + \Delta G$$

Dove:

$\Delta Q$ =variazione energetica sotto forma termica

$\Delta G$ =variazione energetica sotto forma di energia libera (anche detta energia libera di Gibbs) [24].

La variazione di energia termica produce un aumento (o rilascio) di temperatura nella reazione, mentre la variazione di energia libera equivale ad un lavoro spendibile dal sistema.

L'energia libera infatti è la porzione dell'energia, generata dalla reazione, che può trasformarsi in lavoro.

Gibbs, lo studioso statunitense che dimostrò inequivocabilmente l'esistenza dell'energia libera, dimostrò anche che una reazione avviene spontaneamente se e solo se nella sua elaborazione questa produce energia sotto forma di lavoro spendibile, cioè se l'energia libera prima della reazione è maggiore dell'energia libera dopo la reazione. La reazione di generazione dell'acqua è quindi una reazione spontanea[25].

Se si volesse invertire la reazione, cioè si volessero ottenere i costituenti idrogeno ed ossigeno a partire dall'acqua, si dovrebbe fornire energia alla reazione, in particolare una porzione di tale energia, pari ad almeno l'energia libera di Gibbs, deve necessariamente essere fornita sotto forma di lavoro.

Perché la reazione avvenga, quindi, non basta fornire un calore  $\Delta H = \Delta Q$ , in questo caso l'elettrolisi non avverrebbe. (effettivamente, un innalzamento della temperatura, non produrrebbe una separazione degli ioni elettro-carichi che è il principio di funzionamento dell'elettrolisi, ma solo un aumento dell'energia cinetica degli elettroni attorno al loro nucleo).

Perché l'elettrolisi avvenga devo quindi spendere del lavoro che separi le cariche, tale lavoro è speso sotto forma di differenza di potenziale o tensione. (Ho 1Volt tra due punti A e B nel momento in cui, per far transitare una carica di 1 Coulomb da A a B devo spendere 1 Joule di energia).

$$1 [V] = \frac{1 [J]}{1 [C]}$$

La minima tensione teorica, necessaria a far avvenire l'elettrolisi sarà quindi:

$$U_{rev}[V] = \frac{\Delta G [J]}{2 * F [C]}$$

Ciò è vero solo nel caso in cui la restante parte energetica  $\Delta Q$  sia fornita sotto forma termica (l'energia da fornire perché la reazione avvenga è infatti  $\Delta H = \Delta Q + \Delta G$ ).

Il denominatore ( $2 * F$ ) è la quantità di cariche che transitano nella reazione. Tale reazione infatti fa riferimento ad 1 mole di  $H_2O$  (18 grammi di acqua circa). In tale reazione i due costituenti ionici dell'acqua  $H^+$  e  $OH^-$  acquistano e cedono rispettivamente 1 mole di elettroni cioè una carica di:

$$n_{el} \cdot q_{el} \approx 96500 C$$

$n_{el}$  = Numero di elettroni in una mole =  $6,022 \cdot 10^{23}$  elettroni

$q_{el}$  = carica di un singolo elettrone in modulo =  $1,66 \cdot 10^{-19} C$

La carica di 96500 C equivale ad 1Faraday (1F).

La carica transitante nella reazione sarà quindi di 2F cioè 1F per ciascuna mole di elettroni transitante.

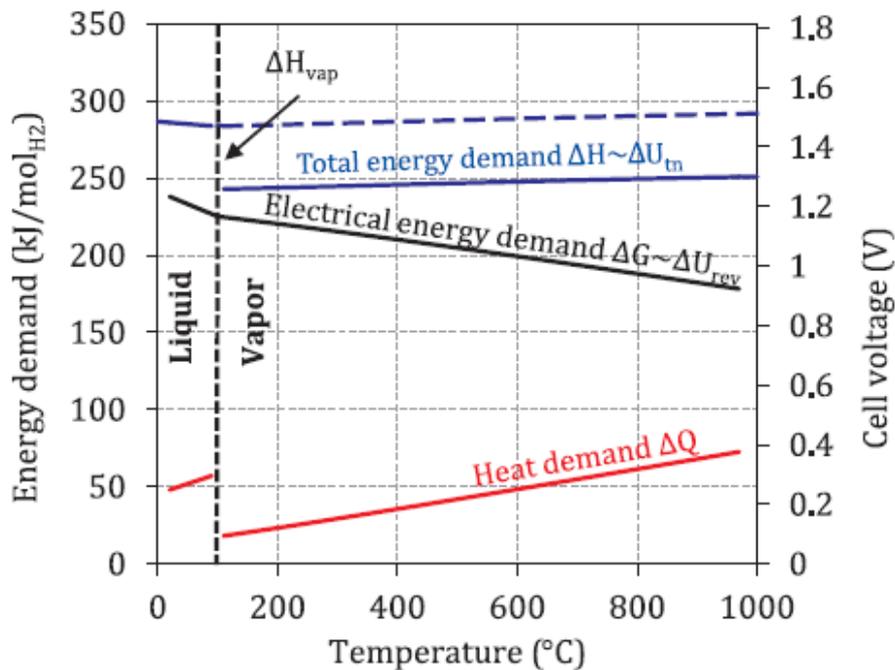
Viene definita "Tensione Termo-neutrale", o tensione isoterma, la tensione necessaria a far avvenire l'elettrolisi, in una cella ideale, senza impiegare calore nella reazione. Ciò vuol dire che l'entalpia è totalmente fornita dall'energia libera ( $\Delta H = \Delta G$ ), e anche, che la reazione avviene in condizioni isoterme, senza quindi transizione di calore. Tale tensione viene utilizzata principalmente nel caso di elettrolizzatori a caldo o SOEL dove la cella opera a temperature costanti poiché la produzione interna di calore causata dalle reazioni irreversibili è controbilanciata dall'assorbimento di calore della reazione elettrolitica[6]

La tensione sarà quindi:

$$U_{tn} = \frac{\Delta H}{2 * F}$$

Una reazione di elettrolisi dell'acqua, che avviene in condizioni termo-neutrali, avviene dunque con tutta l'energia necessaria fornita sotto forma di energia elettrica. [24]

In un elettrolizzatore ideale la tensione nella cella ideale "termoneutra" è di ca. 1,47–1,48 V ( $284\text{--}2866 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}_{H_2}}$ ) fornendo acqua inferiore a 100 °, C mentre si riduce a 1,26–1,29 V ( $243\text{--}2496 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}_{H_2}}$ ) nell'intervallo di temperatura 100–1000 ° C cioè se viene fornito vapore. Ciò significa che il consumo di energia elettrica minimo dell'elettrolisi del vapore rispetto all'elettrolisi dell'acqua liquida può essere ridotta dal calore di evaporazione di  $6 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}_{H_2}}$  a pressione ambiente. Il consumo energetico totale inclusa l'evaporazione dell'acqua è quasi costante da 0 a 1000 ° C. Tuttavia, l'elettrolisi a vapore offre la possibilità di sostituire la più utile energia elettrica di 0,5 kWh / Nm<sup>3</sup> (41 kJ / mol) di idrogeno con calore termico, di più basso pregio, per l'evaporazione dell'acqua.



**Figura [7]** – Richiesta energetica totale ( $\Delta H$ ), termica ( $Q$ ) ed elettrica ( $\Delta G$ ) in un processo ideale di elettrolizzazione in funzione della temperatura.

La tensione termoneutra rappresenta la modalità operativa standard di un elettrolizzatore ad alta temperatura. Gli Elettrolizzatori a bassa temperatura (AEL, PEMEL) vengono fatti funzionare al di sopra della tensione termica neutra a causa di elevate perdite interne o sovratensioni. Ciò si traduce in un riscaldamento delle celle di elettrolisi che richiedono il raffreddamento esterno del modulo.

La tensione nella cella può essere espressa come la somma della tensione della cella reversibile  $U_{rev}$

e le sovratensioni causate dalla resistenza ohmica  $U_{ohm}$ , da limitazioni cinetiche degli elettrodi (sovratensioni di attivazione  $U_{act}$ ) e trasporto di massa (sovratensioni di concentrazione  $U_{con}$ ) [24]

$$U = U_{rev} + U_{ohm} + U_{act} + U_{con}$$

## 2.2 Le tipologie di elettrolizzatori.

### 2.2.1 Elettrolizzatore Alcalino (AEL).

L'elettrolizzatore alcalino risulta essere una tecnologia per la produzione di idrogeno ormai consolidata, impiegata per impianti di produzione di idrogeno su larga scala, dell'ordine dei MW, già agli inizi del ventesimo secolo.

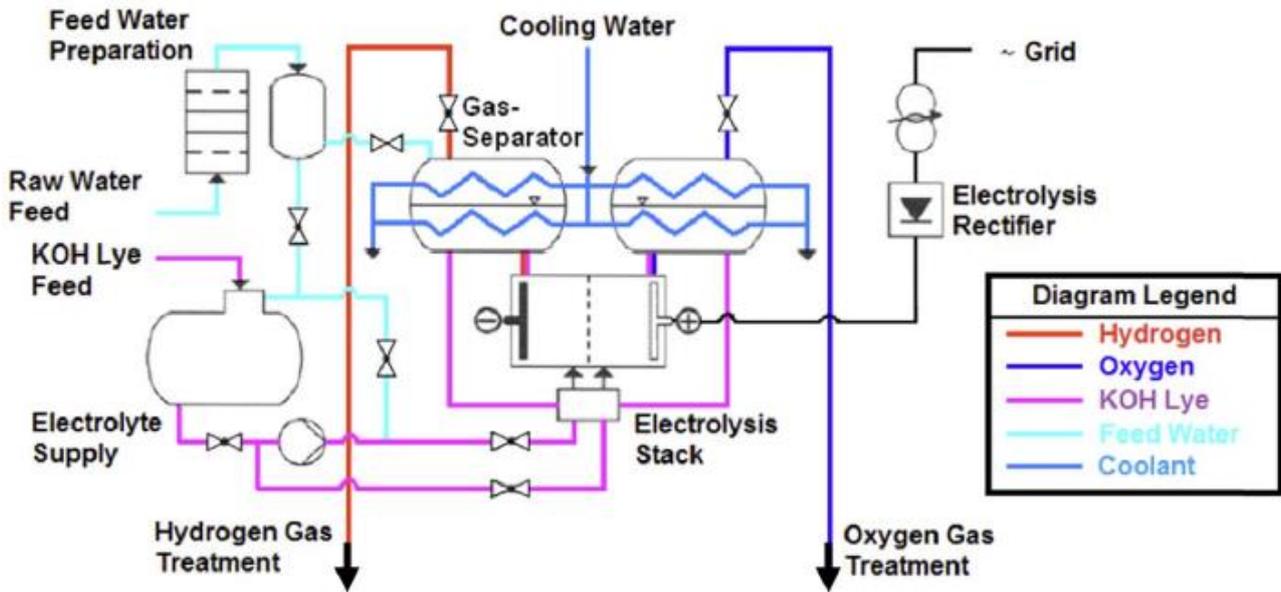
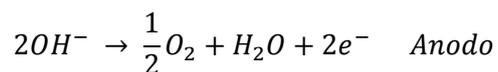
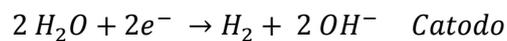


Figura [8] – Process Flow Diagram di un elettrolizzatore alcalino.

Il luogo dove avviene la separazione dell'acqua in idrogeno ed ossigeno è la cella elettrolitica dove gli elettrodi, anodo e catodo, sono immersi in un elettrolita liquido separato da un diaframma. L'elettrolita è tipicamente composto da una soluzione liquida al 25-30% di Idrossido di Potassio KOH. La soluzione viene mantenuta in movimento per favorire la rimozione delle bolle di gas prodotto ed il calore. Tale movimento è ottenuto tramite pompe oppure naturalmente, per mezzo dei moti generati nel fluido a causa del gradiente termico e del rimescolamento prodotto dalle bolle di gas in emersione. Le bolle in emersione vengono raccolte in due diversi contenitori, uno per ognuno dei gas ( $H_2$  e  $O_2$ ). Tali contenitori servono anche per la separazione tra gas e liquido. La qualità del gas prodotto dopo essere stato asciugato è tipicamente del 99.5-99.9% per l'idrogeno e 99-99.8% per l'ossigeno, percentuali che possono essere migliorate fino al 99.999% da i purificatori catalitici (Filtro deoxo). La reazione parziale agli elettrolizzatori è la seguente:



La componente liquida in uscita dai contenitori di separazione liquido-gas, destinata ad essere riutilizzata nell'elettrolizzatore, deve essere miscelata adeguatamente per non immettere soluzioni troppo diluite o concentrate. La percentuale di impurità nei gas è dovuta ad un effetto di trascinamento del fluido elettrolitico dalle bolle di gas, i separatori infatti possono agire solo sul gas e non sul fluido.

E' da evitare, ai carichi parziali, che si realizzi una miscela esplosiva dei gas, monitorando attentamente il fluido elettrolitico [24].

### 2.2.2 L'elettrolizzatore PEM (PEMEL).

L'elettrolisi tramite membrana polimerica o tramite membrana di scambio di protoni (PEM) è stata introdotta da General Electrics nel 1960.

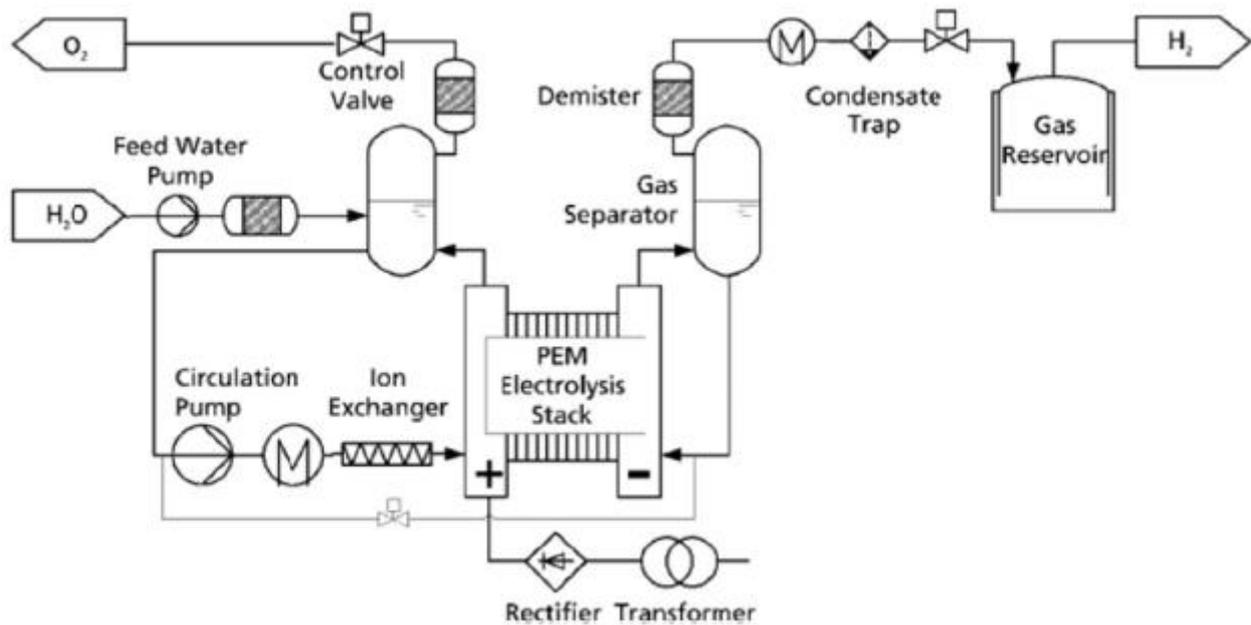
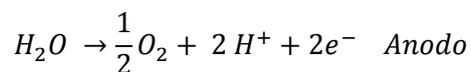
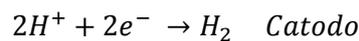


Figura [9] - Process Flow Diagram di un elettrolizzatore PEM.

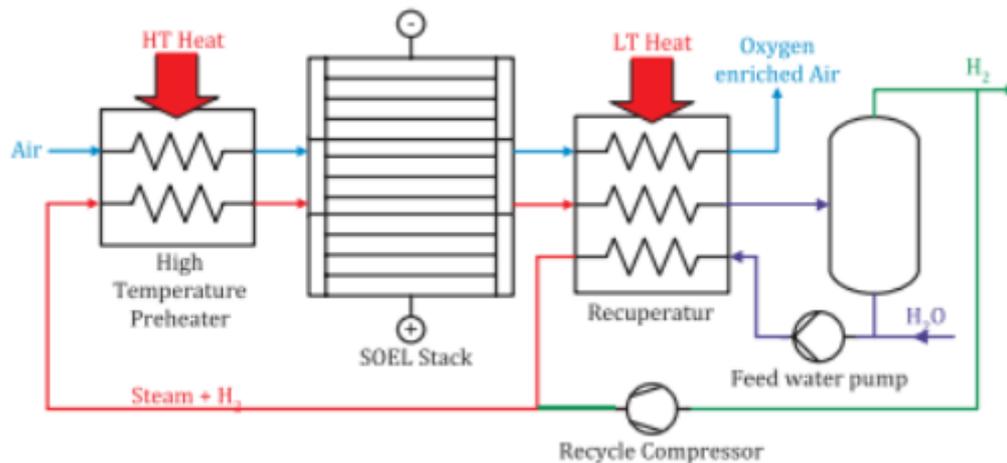
Una membrana PEM (una membrana Nafion per la maggior parte dei casi) separa le due porzioni della cella, e gli elettrodi sono tipicamente montati direttamente sulla membrana a formare il cosiddetto MEA (membrane electrode assembly). L'ambiente corrosivo causato dalla membrana di scambio di protoni richiede l'impiego di metalli nobili per i catalizzatori come l'iridio per l'anodo e il platino per il catodo. L'acqua viene immessa nel sistema dal lato anodo, di cui una parte viene trasportata al lato catodo per effetto elettrosmotico, ed avvengono le seguenti reazioni parziali:



La membrana a polimero elettrolitico garantisce una permeazione estremamente bassa, permettendo la formazione di idrogeno con una purezza media più alta di quella garantita dall'elettrolizzatore AEL e tipicamente maggiore al 99,99% dopo che l'idrogeno è stato asciugato. L'elettrolizzazione PEM garantisce moduli di elettrolizzazione compatti dovuti all'impiego di un elettrolita solido e densità di corrente più alte rispetto agli elettrolizzatori AEL. Questo favorisce le alte pressioni di esercizio dell'elettrolizzatore PEM. Le proprietà strutturali dell'elettrolita solido permettono in oltre un'alta differenza di pressione tra l'idrogeno e l'ossigeno [24].

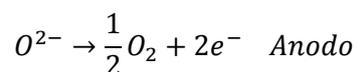
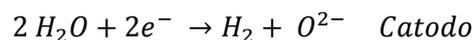
### 2.2.3 Elettrolizzatore ad Ossidi Solidi (SOEL).

Lo sviluppo di elettrolizzatori solid oxide, o ad ossidi solidi, è iniziato negli Stati Uniti negli anni settanta dai laboratori di General Electric e Brookhaven Nation, seguiti da Dornier in Germania. Negli ultimi anni la tecnologia ha attratto sempre più interesse giustificato dallo sviluppo delle fuel cells ad ossido solido e all'incentivazione di scenari energetici a zero emissioni di carbonio. Gli elettrolizzatori SOEL operano a temperature tra i 700 e i 900 °C. L'alta temperatura operativa comporta maggiori efficienze rispetto agli elettrolizzatori AEL e PEM ma implica una sfida non indifferente per i materiali impiegati. L'aumento dell'efficienza è dovuto ad un' aumento della mobilità delle particelle, ad un miglior utilizzo del calore interno favorito dalla termodinamica ad alte temperature e la conversione del vapore. Un layout semplificato di processo è mostrato in figura x.



**Figura [10]** Layout di un elettrolizzatore SOEL con inclusi i circuiti di riscaldamento e raffreddamento necessari al processo (il calore fornito è spesso ottenuto da riscaldatori elettrici).

La reazione agli elettrodi è la seguente:



L'acqua o il vapore di processo è preriscaldata in un recuperatore di calore mantenuto caldo dal flusso di acqua in uscita dalla camera di elettrolizzazione. Da tenere in considerazione una quantità di calore supplementare assorbita dalla transizione di fase da liquido a vapore da fornire a temperature non troppo elevate. La camera di elettrolizzazione è tipicamente formata da celle planari elettricamente connesse in serie. Il vapore, ed una frazione di idrogeno prelevato per mantenere le condizioni di riduzione, sono forniti al catodo e parzialmente convertiti in idrogeno. La miscela di vapore ed idrogeno che si viene a formare è separata raffreddando il composto fino ad ottenere la condensazione dell'acqua [24].

**Tabella 1** - Riassunto dello stato dell'arte dei principali parametri dei modelli di elettrolizzatori in commercio [24].

	AEL	PEMEL	SOEL
<b>Parametri di processo</b>			
Temperatura della cella (°C)	60-90	50-80	700-900
Pressione tipica (bar)	10-30		1-15
Densità di corrente (A/cm <sup>2</sup> )	0.25-0.45		0.3-1.0
Flessibilità		0-100	
Flessibilità di carico (%carico nominale)	20-100	5-10 min	-100/+100
Tempo di start-up a freddo	1-2 h	<10 s	Hours
Tempo di start-up a caldo	1-5 min		15 min
<b>Efficienza</b>			
Efficienza nominale modulo di elettrolizzazione	63-71%	60-68%	100% <sup>a</sup>
Consumo specifico di energia (kWh/Nm <sup>3</sup> )	4.2-4.8	4.4-5.0	3
Efficienza nominale di impianto <sup>b</sup> (LHV)	51-60%	46-60%	76-81%
Consumo specifico di energia (kWh/Nm <sup>3</sup> )	5.0-5.9	5.0-6.5	3.7-3.9
<b>Capacità produttive disponibili</b>			
Potenza nominale massima per impianto (MW)	6	2	<0.01
Produzione di H <sub>2</sub> per impianto (Nm <sup>3</sup> /h)	1400	400	<10
Area della cella (m <sup>2</sup> )	<3.6	<0.13	<0.06
<b>Durabilità</b>			
Tempo di vita	55-120	60-100	(8-20) <sup>c</sup>
Percentuale di degradazione annua (%/a)	0.25-1.5	0.5-2.5	3-50
<b>Parametri economici</b>			
Costi di investimento (€/kW)	800-1500	1400-2100	(>2000) <sup>c</sup>
Costi di mantenimento(% di costo di investimento all'anno)	2-3	3-5	n.a.

<sup>a</sup> Operante a voltaggio termoneutrale.

<sup>b</sup> Includendo gli ausiliari e il calore fornito (SOEL)

<sup>c</sup> Alta incertezza della stima dovuta ad una situazione pre-commerciale del SOEL

### 2.3 I compressori meccanici.

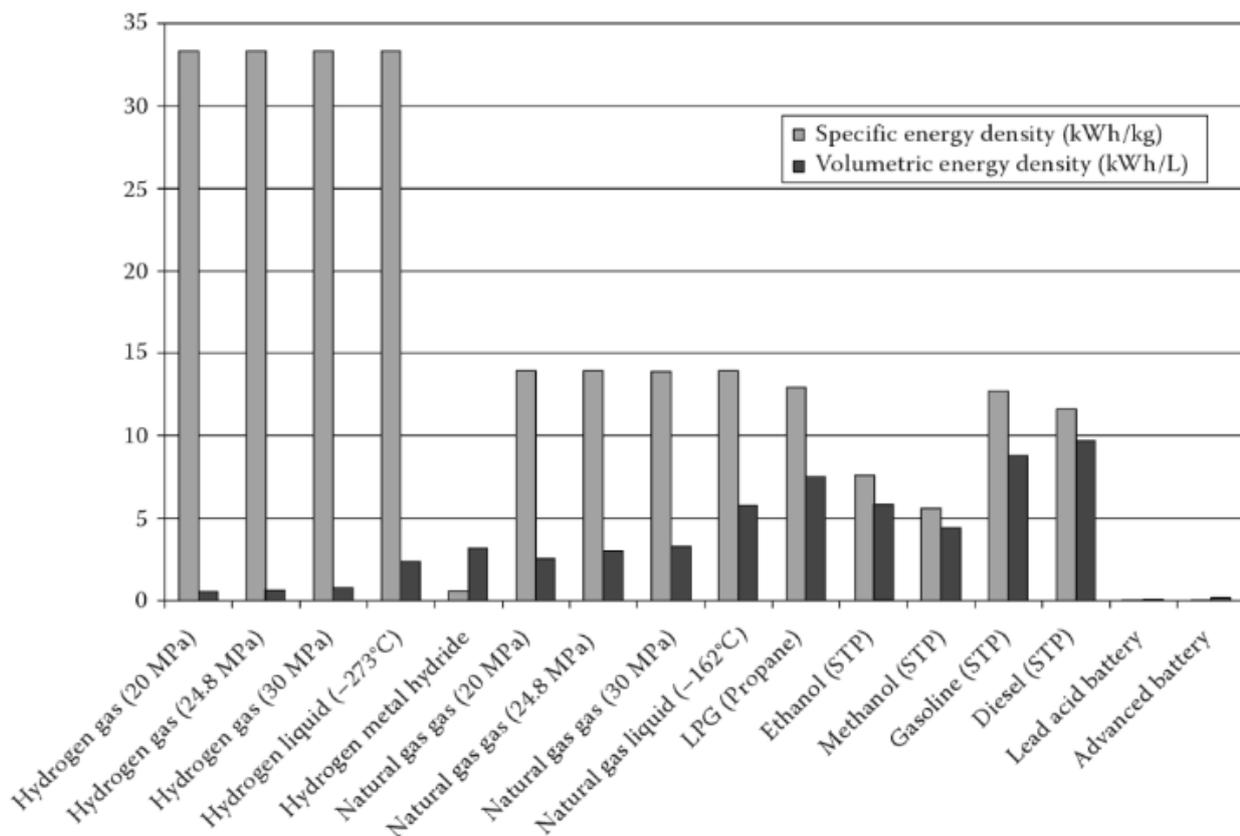
Tra tutti i combustibili non nucleari l'idrogeno risulta essere quello con la densità di energia gravimetrica, cioè la quantità di energia contenuta rapportata al peso, più alta.

Combustibile	Energia(Kcal/g)
Idrogeno	34.0
Petrolio	8.4-10.3
Parafina	9.8-10.3
Carbone	7.8
Olio di ricino	9.4
Legno	4.2

**Tabella 2** - Comparazione tra i principali combustibili non nucleari [26]

Combinato al fatto che tale energia può essere facilmente convertita in termica, meccanica o elettrica [26] e che l'idrogeno risulta essere l'elemento più abbondante nell'universo, lo rendono un promettente candidato per la produzione energetica a zero emissioni di carbonio.

L'utilizzo dell'idrogeno come vettore energetico comporta però due criticità. La prima è la sua produzione stessa, risolvibile sfruttando fonti rinnovabili in eccesso per la sua produzione, la seconda è dovuta al fatto che l'idrogeno risulta avere la più bassa densità energetica rapportata al volume tra i principali combustibili comunemente utilizzati, pari a 0.01079MJ/L (quella del petrolio è di 34MJ/L) [26].



**Tabella 3** –Comparazione di alcune tipologie di combustibile. L'idrogeno risulta avere la più alta densità energetica rapportata al peso e la più bassa rapportata al volume. [27]

I metodi per aumentare la densità energetica rispetto al volume che si sono ricercati sono molteplici, ma tra questi quello che risulta essere maggiormente utilizzato, seppur non il più economico, è quello della compressione.

La compressione dell'idrogeno risulta comunque il metodo migliore per gestire l'idrogeno nel caso di impianti di piccole dimensioni in cui i tempi medi di stoccaggio non sono troppo elevati, caratteristiche proprie di un impianto sperimentale [28].

Tra le diverse tipologie di compressori, una fortemente diffusa è quella dei compressori meccanici. Questi compressori sono basati sulla conversione diretta di energia meccanica in energia di pressione. Ciò avviene per mezzo di un pistone per costringere l'idrogeno in volumi minori con conseguente aumento della pressione.

### 2.3.1. Compressori alternativi.

Sono utilizzati per livelli di pressione superiori ai 3MPa, ideali per portate moderate ed operazioni ad alte pressioni. La potenza media richiesta può arrivare fino a 11.2MW per conseguenti portate fino a 890kg/h a pressione in uscita di 25Mpa.

il funzionamento tipico di un compressore alternativo monostadio è formato da un sistema pistone-cilindro e due valvole automatiche.[29]

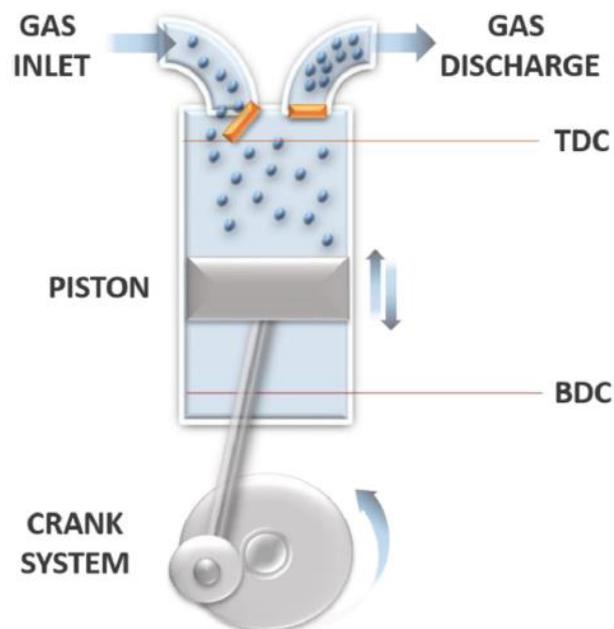


Figura [11] - Schema di funzionamento di un compressore alternativo.

Sia il pistone che le valvole sono collegate ad un albero motore in rotazione che, in base all'alzata del pistone regola l'apertura e la chiusura delle valvole rispettivamente di ingresso e di mandata. L'utilizzo di compressori alternativi può però comportare alcune criticità. Innanzitutto l'aumento di costo dovuto a parti meccaniche in moto relativo. Queste infatti aumentano la complessità della macchina e anche la sua velocità di usura. Inoltre le parti in movimento riscaldano ulteriormente l'idrogeno pressurizzato, rendendo meno efficace il trasferimento termico per il suo raffreddamento.[30] Un'altra

criticità, legata al movimento lineare del pistone, è la fluttuazione di pressione nella camera di compressione con possibile generazione di vibrazioni, rumore e, nei casi più critici, esplosioni.[31]

In ogni caso mediamente i compressori alternativi hanno delle buone performance, quelle di alcuni modelli sono riportate nella tabella seguente:

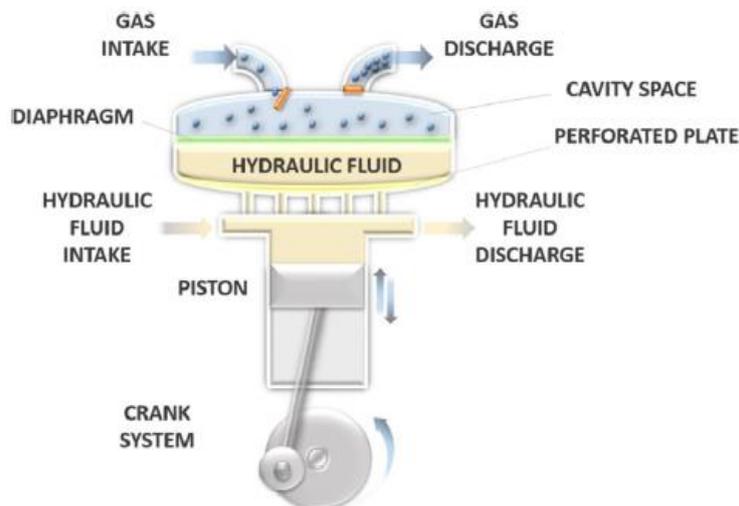
	$P_{in}[MPa]$	$P_{out}[MPa]$	Portata [Nm <sup>3</sup> /h]	Applicazioni	Efficienze [%]
Leonard S.M	0.4	22.5	No data	-Reforming catalitico	No data
				-Impianti idrogeno	
Amos W.A.	No data	25	~10,000	-Stoccaggio di gas compresso	No data
Kurita et al.	0.6	70 (5 stages)	No data	-Stazioni di rifornimento idrogeno	No data
Hydropac	35	85.9	4820	-Riempimento serbatoi di veicoli	No data
				-movimentazione di gas tra serbatoi	
Hitachi Infrastructure System	0.6	100	300	-Stazioni di idrogeno	No data
Vantaggi	-Tecnologia matura				
	-Adattabile ad un ampio range di portate				
	-Alte pressioni in uscita				
Svantaggi	-Contaminazione con gli oli di lubrificazione(se utilizzato)				
	-Fenomeni di infragilimento				
	-Parti in moto relativo				
	-Complessità di realizzazione				
	-complesse azioni di manutenzione				
	-Difficoltà di gestire la trasmissione termica				
	-Presenza di vibrazioni e rumore				

**Tabella 4** - I compressori alternativi [32]

### 2.3.2 Compressori a diaframma.

Grazie all'elevata portata, basso consumo di potenza e la bassa richiesta di raffreddamento termico, i compressori a diaframma risultano essere una soluzione veramente efficace in ambito idrogeno [33].

La gestione del gas risulta, in oltre, ottima anche perché questo non viene mai a contatto diretto con il pistone, non rischiando quindi di contaminarsi o riscaldarsi eccessivamente.



**Figura [11]** - Schema di un compressore a diaframma.

Il moto del pistone è infatti trasmesso ad un fluido di processo che a sua volta trasmette il moto al diaframma. Mantenere il fluido di processo, generalmente olio, alla giusta pressione è fondamentale per avere una buona efficienza della macchina, per questo il compressore è fornito con sistemi di gestione dell'olio di processo. Questo infatti, si rende necessario nel momento in cui si apre la valvola di mandata del gas. Quando il gas fuoriesce, la differenza di pressione da una parte all'altra del diaframma si aggrava, in particolare per l'alzata del pistone ancora in atto, rendendo necessaria l'apertura del limitatore di pressione per scaricare parte dell'olio e riequilibrare la pressione nelle due camere. Il circuito separato che regola la pressione dell'olio, oltre ad aumentare il periodo medio di vita, ha anche il duplice vantaggio di assorbire parte del calore di processo, abbassando quindi la temperatura dell'idrogeno.

Come anticipato, un forte vantaggio dei compressori a diaframma è quello di processare l'idrogeno senza che questo possa essere contaminato. L'idrogeno infatti circola in un loop chiuso senza possibilità di trafilazione. Questa caratteristica è fondamentale per la sicurezza, visto che la trafilazione dell'idrogeno è uno dei maggiori rischi nell'impiego di compressori meccanici.

Paragonato agli altri compressori meccanici, al grande vantaggio di avere alti livelli di efficienza volumetrica, si contrappone quello di avere delle durate di vita minori. Questo è dovuto allo stress meccanico in atto ad ogni ciclo, prevenuto da una progettazione che permetta uno scorrimento funzionale dei fluidi nelle camere.[32]

	$P_{in}[MPa]$	$P_{out}[MPa]$	Portata [N m <sup>3</sup> /h]	Applicazioni	Efficienze [%]
<b>Hofer</b>	0.5	15.1	5.5	No data	No data
	0.9	9.7	390	No data	No data
	1.1	25.1	112	No data	No data
	1.8	28.1	581	No data	No data
	2.6	18	450	No data	No data
	2.8	9.7	No data	No data	No data
	3-3.5	4.77-4.84	556	No data	No data
<b>PDC Machines</b>	No data	51.7	50-280	-Fuel cell per veicoli ad H2	65
<b>Weinert et al.</b>	1.3	43	No data	-Stazioni di rifornimento	80-85
<b>Tzimas et al.</b>	No data	100	200-700	No data	
<b>vantaggi</b>	-Alte portate				
	-bassi consumi				
	-bassa complessità per il raffreddamento				
	-Ideale per gestire gas puri o esplosivi				
<b>Svantaggi</b>	-Possibile rottura del diaframma				
	- Design complesso				

**Tabella 5** - Compressore a diaframma per compressione idrogeno[32]

### 2.3.3 Compressori lineari.

Una tipologia di compressori particolarmente utilizzata in applicazioni criogeniche e che potrebbe avere un interessante potenziale applicativo in ambito idrogeno è il compressore lineare. Tale compressore sfrutta le repulsioni magnetiche tra un magnete ed un campo magnetico, generato dal passaggio di corrente attraverso una bobina, per far muovere il pistone. Nel momento in cui la corrente che circola nella bobina viene invertita, si inverte anche il campo magnetico facendo scorrere il magnete collegato al pistone nella direzione opposta. Il pistone è vincolato ad una molla che, assieme all'effetto elastico del gas nella camera di compressione aiuta il pistone nelle fasi di ritorno. La mancanza di articolazioni meccaniche rende pressoché nulla l'usura e riduce drasticamente vibrazione e rumori. Inoltre il compressore viene fatto funzionare in risonanza alla macchina, riducendo al minimo gli effetti di inerzia del pistone e favorendo

ulteriormente il rendimento. Uno strumento di controllo supplementare però deve essere utilizzato per verificare che il pistone si muova effettivamente in risonanza, o correggere il moto in caso questo non si verifichi.

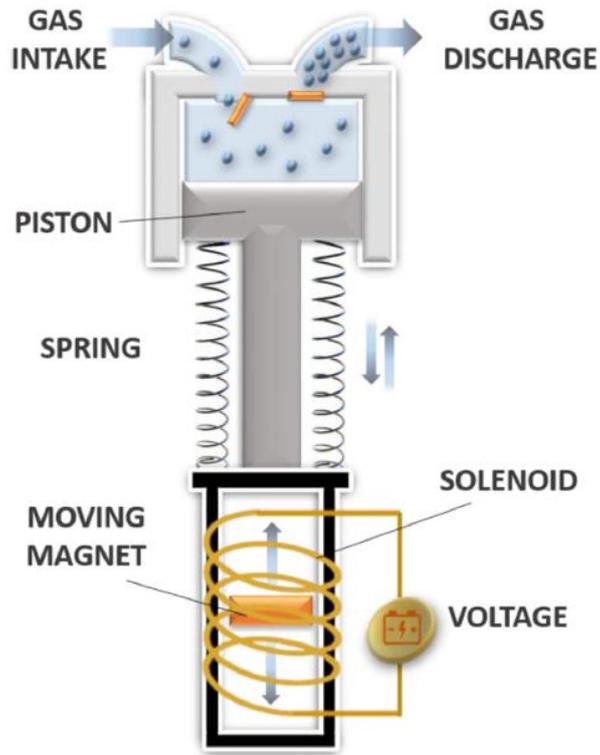


Figura [11] - Schema di un compressore lineare.

Infine, non essendo il pistone mosso da sistema biella manovella, questo permette operazioni estremamente silenziose, ma rende il moto del pistone soggetto a parametri di sistema variabili come temperatura, voltaggio elettrico oppure portata [32]

	$P_{in}[MPa]$	$P_{out}[MPa]$	Portata [ $N\ m^3/h$ ]	Applicazioni	Efficienze [%]
<b>Broerman et al.</b>	2	86-95 (3 stadi)	>112	-studi e ricerche	>73 <sup>a</sup>
<b>Vantaggi</b>	-compattezza		-Bassa vibrazione e rumore		
	-alta affidabilità		-Lunga durata di vita operativa		
	-Alta efficienza		-Basso numero di parti in movimento		
<b>Svantaggi</b>	-Necessità di monitorare la corsa del pistone				
	-Necessità di operare in condizioni di risonanza				
	-oscillazione della pressione				

<sup>a</sup> Isoentropico

Tabella 6 - Compressore lineare per compressione idrogeno [32]

### 2.3.4 Compressori liquidi.

Consistono in una tipologia di compressori che si accomunano dall'utilizzo di un liquido per la compressione del gas. Il vantaggio di questo approccio sta nel non avere parti meccaniche in moto relativo l'una con l'altra e di avere un gas in uscita pressurizzato in maniera quasi isoterma. Il fluido infatti ha una densità ed una capacità di assorbire calore svariate volte maggiore di quella del gas. Durante la fase di compressione tutto ciò che è contenuto nella camera, gas e liquido vengono messi in pressione, ma sono il liquido e le pareti della camera ad assorbire la quasi totalità del calore prodotto dalla compressione rendendo di fatto i tipici scambiatori di calore che si associano ai tradizionali compressori meccanici, superflui. Tale tipologia di compressori vanta alte efficienze, nell'intorno dell'83% [32].

#### 2.3.4.1 Compressore liquido a pistone.

Una pompa è azionata per far salire e scendere il livello del liquido in due camere. Il liquido immesso nelle camere pressurizza il gas che viene poi raccolto in bombole. Tali tipologie di compressori sono utilizzate principalmente per la compressione dell'aria che riescono a pressurizzare a 20-30Mpa

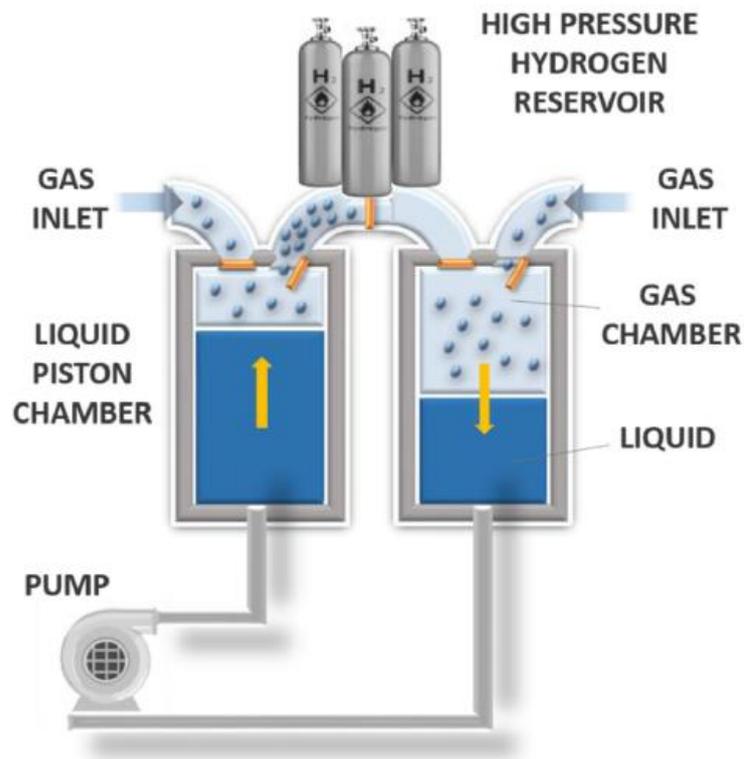


Figura [11] - Schema di un compressore liquido a pistone.

#### 2.3.4.2 Compressore liquido a rotazione.

E' una tipologia di compressore molto utilizzata su gas con alto contenuto di liquido. Consiste in uno statore eccentrico ed un rotore formato da lamelle mobili spinte radialmente. Il volume che si viene a generare tra le lamelle mobili del rotore e lo statore va via a via diminuendo a causa della forma eccentrica dello statore e della mobilità delle lamelle, portando alla pressurizzazione del fluido contenuto. Tali compressori tuttavia vantano rendimenti nell'intorno del 50% rendendoli di fatto poco utilizzati [32].

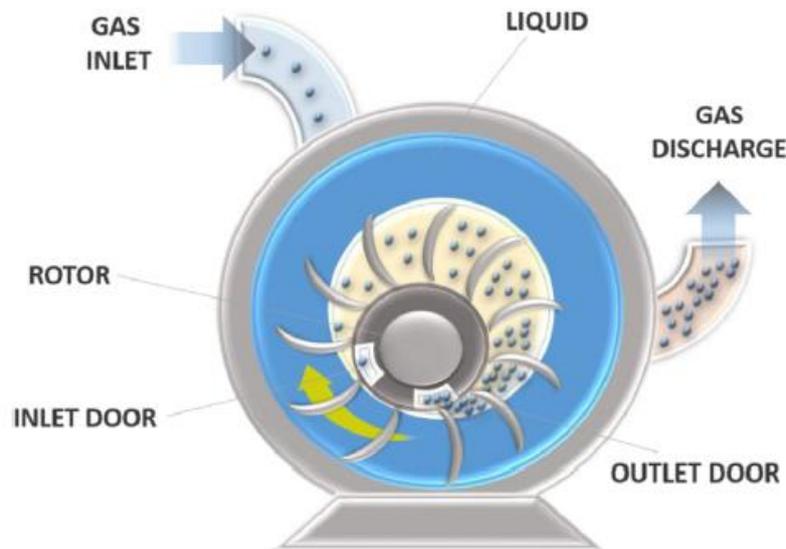


Figura [11] - Schema di un compressore liquido a rotazione.

#### 2.3.4.3 Compressore a liquido ionico.

Questa tipologia di compressori è stata sviluppata per aumentare l'efficienza di compressione nel caso di idrogeno. I liquidi ionici sono sali a basso punto di fusione, allo stato fuso a temperatura ambiente. Posseggono buona stabilità termica e chimica, alta conducibilità ionica, ritardanti di fiamma, moderata viscosità, alta polarità, trascurabile volatilità e non hanno effetti negativi sull'uomo, in aggiunta offrono bassa compressibilità ed una lubrificazione superiore, specialmente in operazioni ad alte pressioni. L'impiego di tale sale in alternativa ai sistemi a pistone o in compressori rotativi, in particolare nella gestione di gas ionizzati permette di raggiungere ottime performance. L'idrogeno in particolare vanta una solubilità pressoché nulla in liquidi ionici come questo, permettendo il raggiungimento di altissime efficienze volumetriche e alti ratei di compressione e garantendo un bassissimo se non nullo inquinamento del gas. Se comparati ad un compressore alternativo utilizzato senza l'impiego di lubrificante, la performance è migliorata da 5-11 kg/h per il compressore alternativo a 8-30 kg/h per il compressore con l'impiego di liquido ionico con un aumento della pressione di mandata da un range di 35-70MPa a 45-90MPa. L'impiego di liquidi ionici nei compressori garantisce inoltre minori consumi energetici, aumento della vita della macchina, minor costo dei materiali e riduzione del rumore. L'impiego di liquido ionico tuttavia non varia il rischio di corrosione causato dall'idrogeno che rimane alto [32].

	$P_{in}$ [MPa]	$P_{out}$ [MPa]	Portata [N m <sup>3</sup> /h]	Applicazioni	Efficienze [%]
<b>Van de Ven</b>	No data	No data	No data	No data	83
<b>The Linde Group</b>	No data	45-90	~90-340	-Stazioni di rifornimento idrogeno	> 65%*
	0.5-20	100	376-753	-Stazioni di rifornimento idrogeno	No data
<b>Vantaggi</b>	-Alta efficienza		-Bassa emissione di rumore		
	-Alto fattore di compressione		-Compressione molto vicina all'isoterma		
	-Basso consumo energetico		-Basso numero di parti in movimento		
	-Riduzione dell'usura		- nessuna contaminazione del gas		
	-Basso costo dei materiali				
<b>Svantaggi</b>	-Il liquido potrebbe fuoriuscire				
	-Fenomeni di cavitazione				
	-Corrosione				

**Tabella 7** – Compressore a liquido ionico[32]

## 2.4 Diverse soluzioni per l'accumulo dell'idrogeno.

Le principali soluzioni per lo stoccaggio dell'idrogeno sono sotto forma di accumulo allo stato gassoso, liquido o combinato come idruro metallico. Esiste anche la possibilità di stoccarlo sottoterra, ma risulta essere semplicemente un caso speciale dell'accumulo allo stato gassoso. Ognuna di queste configurazioni ha diversi vantaggi e svantaggi [34].

L'accumulo sotto forma liquida ha la più alta densità di stoccaggio tra tutti i metodi. Tale risultato tuttavia richiede un aumento della complessità del sistema estremamente elevata. Innanzitutto, necessita di portare l'idrogeno a temperatura di ebollizione (20° kelvin o -253,15° C) ottenibili grazie all'impiego di cicli frigoriferi come il ciclo di espansione di Joule Thompson. In secondo luogo richiede che l'idrogeno stoccato si trovi in una particolare configurazione. Le molecole di idrogeno infatti si possono trovare in due diverse strutture, para-idrogeno e orto-idrogeno, a seconda della configurazione elettronica dei due atomi che la compongono. A temperatura ambiente, solitamente, l'idrogeno è composto da 75% di orto-idrogeno e 25% di para-idrogeno. Quando l'idrogeno viene liquefatto, vi è una lenta spontanea trasformazione dell'orto-idrogeno in para-idrogeno, raggiungendo un nuovo equilibrio termodinamico [35]. Essendo però il processo di liquefazione più veloce di quello di transizione da orto a para, il rischio è quello di stoccare idrogeno liquido con alta quantità di orto-idrogeno. Tale struttura continuerà poi a trasformarsi in para-idrogeno, configurazione a minor energia, spontaneamente in fase liquida. La transizione dalla configurazione orto a quella para è esoterma, in particolare avviene con un rilascio di calore di 527kJ/kg. Tale calore è sufficiente a riportare parte dell'idrogeno liquido alla sua forma gassosa, rendendo inefficace il processo. Se si vuole quindi stoccare in forma liquida, servono maggiori energie e maggiori tempi di processo per lo stoccaggio [36].

La combinazione come idruro metallico consiste nell'utilizzo di metalli, elementi metalloidi e leghe con cui legare l'idrogeno. Alcuni di questi Idruri metallici possono assorbire l'idrogeno anche a pressione atmosferica e rilasciarlo a pressioni superiori quando scaldati, maggiore è la temperatura a cui sono sottoposti, maggiore sarà la pressione a cui l'idrogeno verrà rilasciato. Durante il processo di assorbimento

dell'idrogeno e formazione dell'idruro viene rilasciato calore che deve essere costantemente asportato per non favorire il rilascio dell'idrogeno dovuto all'aumento della temperatura. Quando la reazione di rilascio di idrogeno viene innescata dal calore l'energia rilasciata varia da 9300 fino ad oltre 23250kJ/kg e le pressioni in gioco possono raggiungere i 10 MPa. Alcuni idruri possono anche raggiungere temperature sopra i 500°C. Il raggiungimento di questi livelli di pressione, energia e temperatura rendono molto complessa la costruzione delle unità di accumulo. Il contenitore per gli idrocarburi dovrà resistere ad alte pressioni e possedere abbastanza superficie di scambio termico per permettere una rapida asportazione di calore. Infine il materiale dovrà essere strutturalmente e termicamente stabile anche se sottoposto a numerosi cicli di accumulo e rilascio di idrogeno e quindi di temperatura e pressione, e non rilasciare sostanze nocive quali diossido di carbonio o polveri solfuree.[37]

#### **2.4.1 Accumulo allo stato gassoso.**

L'accumulo dell'idrogeno sotto forma gassosa risulta essere la soluzione di stoccaggio più semplice. A dispetto degli altri metodi richiede una strumentazione contenuta, consistente in un serbatoio di accumulo ed un compressore. Di contro la densità di stoccaggio, è direttamente proporzionale alle pressioni utilizzate, più alte sono le pressioni in gioco, più alti sono i costi capitali ed operativi. [38]

Il serbatoio di accumulo può consistere in vere e proprie bombole, o in strutture anche molto diverse. Un possibile serbatoio di accumulo di idrogeno, situato sottoterra, consiste nell'utilizzo di cave di sale, vecchi bacini di estrazione di petrolio o gas naturali oppure in falde acquifere. Malgrado tale soluzione comporti costi esecutivi più alti, è ancora indagata per l'alta capacità di stoccaggio che questi comportano. [39]

Un'ultima possibilità per l'accumulo di idrogeno allo stato gassoso consiste nell'utilizzare le pipelines utilizzate per il trasporto di gas naturali. Entro specifici volumi infatti l'idrogeno sembra poter essere miscelato ai gas naturali senza presentare effetti negativi sulla struttura. Tale possibilità tuttavia necessita di essere supportata da normative e studi scientifici mirati a confermare i dati sperimentali fino ad ora acquisiti.[39]

## 2.5 I Key Performance Indicators (KPI).

*«Diceva Bernardo di Chartres che noi siamo come nani sulle spalle di giganti, così che possiamo vedere più cose di loro e più lontane, non certo per l'acume della vista o l'altezza del nostro corpo, ma perché siamo sollevati e portati in alto dalla statura dei giganti.»*

Lo sviluppo tecnologico sta progredendo a velocità sorprendenti rispetto solamente a pochi anni fa. Le nuove tecnologie e l'interdisciplinarietà degli studi stanno portando a soluzioni innovative e sempre più efficaci, ma la caratteristica probabilmente più determinante dell'impennata tecnologica risulta essere il collettivo lavoro di analisi e condivisione dati dei lavori di vari ricercatori che formano un solido confronto e punto di partenza per le ricerche future.

L'utilizzo dell'idrogeno come vettore energetico lascia spazio all'applicazione di diverse tecnologie. Numerose infatti sono le configurazioni che caratterizzano gli impianti che sfruttano l'idrogeno, dalle risorse energetiche con cui esso è generato, fino alle modalità di erogazione, da puro a miscele a base idrogeno. Il programma collettivo EERA (European Energy Research Alliance) sulle Fuel Cells e l'Idrogeno (JP FCH), in collaborazione con la Hydrogen Europe Reserch (HER) ha voluto quindi definire dei parametri fondamentali, detti KPI (key performance indicators) che fornissero una linea guida a ricercatori e imprenditori sullo stato dell'arte (SoA) attuale e su quali siano i target di sviluppo tecnologico verso cui puntare nel prossimo decennio (2020-2030) per un ingresso competitivo nel mercato Europeo [40].

Gli articoli in letteratura contenenti i KPI sono dunque un fondamentale punto di partenza e di confronto per lo sviluppo progettuale di qualsiasi impianto, per la verifica del suo corretto funzionamento ed eventualmente per valutare la sua efficienza rispetto alla situazione attuale.

La ricerca dei KPI si è concentrata sugli indicatori inerenti all'elettrolizzatore, primo elemento dell'impianto oggetto di studio. Per avere una visione completa si è ritenuto opportuno indagare non solo gli indicatori inerenti all'elettrolizzatore alcalino (AEL), proprio dell'impianto, ma anche gli altri maggiori elettrolizzatori in commercio (PEM, SOEL).

I KPI ricercati per le tre tipologie di elettrolizzatore sono i seguenti:

**Tabella 8** - Stato dell'arte e targets futuri per la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili per lo stoccaggio e il bilanciamento energetico **per un elettrolizzatore alcalino**. [40]

No	Parameter	Unit	Stato dell'arte		Target FCH-JU		
			2012	2017	2020	2024	2030
Sistema generico*							
1	Consumo elettrico @capacità nominale	kWh/kg	57	51	50	49	48
2	Degradazione	%/1000hrs	-	0,13	0,12	0,11	0,10
3	Densità di corrente	A/cm <sup>2</sup>	0,3	0,5	0,7	0,7	0,8

\*Condizioni al contorno standard che si applicano a tutti i sistemi KPI: Input potenza di 6kV AC (corrente alternata) e acqua di rubinetto; output idrogeno secondo ISO 14687-2 alla pressione di 30 bar

2)degradazione cumulata definita come la percentuale di efficienza persa se funzionante a capacità nominale. Per esempio 0,125%/1000h risulta in un aumento di energia consumata del 10% in un periodo di vita di 10 anni considerando 8000h di impiego annue.

**Tabella 9** - Stato dell'arte e targets futuri per la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili per lo stoccaggio e il bilanciamento energetico **per un elettrolizzatore PEM.** [40]

No	Parameter	Unit	Stato dell'arte		Target FCH-JU		
			2012	2017	2020	2024	2030
Sistema generico*							
1	Consumo elettrico @capacità nominale	kWh/kg	60	58	55	52	50
2	Tempo operativo da partenza a caldo	Sec	60	10	2	1	1
3	Tempo operativo da partenza a freddo	Sec	300	120	30	10	10
4	Footprint	m <sup>2</sup> /MW	-	120	100	80	45
5	Degradazione	%/1000hrs	0,375	0,250	0,190	0,125	0,12
6	Densità di corrente	A/cm <sup>2</sup>	1,7	2,0	2,2	2,4	2,5

2) Il tempo che intercorre da sistema in stand-by a produzione nominale, misurato a 15°C temperatura esterna

3) Il tempo che intercorre da sistema completamente spento a produzione nominale, misurato a -20°C temperatura esterna.

**Tabella 10** - Stato dell'arte e targets futuri per la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili per lo stoccaggio e il bilanciamento energetico **per un elettrolizzatore ad alta temperatura SOE.** [40]

No	Parameter	Unit	Stato dell'arte		Target FCH-JU		
			2012	2017	2020	2024	2030
Sistema generico*							
1	Consumo elettrico @capacità nominale	kWh/kg	n.a	41	40	39	37
2	Disponibilità	%	n.a	n.a.	95%	98%	99%
3	Tasso di perdita di produzione	%/1000hrs	n.a	2,8	1,9	1,2	0,5

3) Degradazioni in condizioni di elettrolisi isoterma, o "termo-neutrale", in perdita percentuale del tasso di produzione (output di potenza dell'idrogeno) ad un'efficienza costante. Si noti che questa è una definizione diversa rispetto agli elettrolizzatori a "bassa temperatura" (AEL, PEM) che riflette la differenza tra le tecnologie.

**Tabella 11** - Stato dell'arte e targets futuri **per lo stoccaggio dell' idrogeno in piccola e larga scala.** [40]

No	Parameter	Unit	Stato dell'arte		Target FCH-JU		
			2012	2017	2020	2024	2030
<b>Rimorchi per camion in pressione</b>							
1	Capacità	kg	400	850	1000	1000	1000
<b>Stoccaggio di H2 in larga scala*</b>							
2	Disponibilità	kWh/kg	n.a	13,3	11	10	9,3

Note:

\*Stoccaggio di almeno 10 tonnellate di idrogeno per almeno 48 ore, includendo tutti gli step necessari dal filtraggio dell'H2 in ingresso, al suo filtraggio in uscita a 30 bar. Fattori correttivi potrebbero essere applicati se variano le condizioni al contorno.

### 2.5.1 Documento 1: “Innovative large-scale energy storage technologies and power-to-gas concepts after optimisation” [41]

Il paper riporta l’analisi di 3 impianti Power to Gas promossi dal progetto STORE&GO, data pubblicazione paper 29 Febbraio 2020 situati a Falkenhagen (Germania), Solothurn (Svizzera) e Troia (Italia).

Sebbene il progetto si concentrasse principalmente sul processo di metanazione, sono comunque stati forniti alcuni dati utili sugli elettrolizzatori.

Per garantire una standardizzazione nei parametri misurati nei tre siti, le portate volumetriche sono fornite a temperatura e pressione normali (STP,  $T_{STP} = 0^{\circ}C$ ,  $P_{STP} = 1.01325 \text{ bar}$ ).

Il rendimento degli elettrolizzatori è stato calcolato dai dati di funzionamento dell’impianto, forniti da i partner di progetto(UST), quando questi dati non erano presenti, si è riportato lo stato dell’arte (SoA) della tecnologia.

**Tabella 12** - Riassunto dei parametri principali riportati nell’articolo [41]

Parametri	Falkenhagen	Solothutn	Troia
<b>Tipologia elettrolizzatore</b>	Elettrolizzatori alcalini	Elettrolizzatori PEM	Elettrolizzatore alcalino
<b>n. elettrol. Per impianto</b>	6 elettrolizzatori	2 elettrolizzatori PEM-C30	1 elettrolizzatore customizzato per il progetto
<b>Portata volumetrica max.</b>	210 $Nm^3/h$	60 $Nm^3/h$ (30 $Nm^3/h$ per ogni elettrolizzatore)	32 $Nm^3/h$
<b>Potenza elettrica Nominale</b>	1MW complessivo	175kW per ognuno dei due elettrolizzatori	200kW
<b>Portata volumetrica</b>	200 $m^3/h$		32 $m^3/h$
<b>Percentuale di carico <sup>1</sup></b>	95%	75%	
<b>Pressione</b>	STP	STP	STP
<b>Temperatura</b>	STP	STP	STP
<b>Input di <math>H_2</math> nell’impianto</b>	708kW	315kW	113kW
<b>Rendimento</b>	63.7%	60% <sup>2</sup>	65.6%
<b><math>\eta</math> per elettr. Ottimizzato (secondo lo SoA)</b>	76%	76%	-

<sup>1</sup> la percentuale di carico si riferisce alla percentuale di utilizzo dell’unità di metanazione rispetto al funzionamento massimo.

<sup>2</sup> Il potenziale termico per l’elettrolizzatore non è stato considerato.

Il sito di Falkenhagen è un impianto di produzione di SNG (Synthetic natural gas). E’ alimentato da un impianto di elettrolizzazione formato da 6 elettrolizzatori alcalini che può arrivare ad una produzione massima di 210  $m^3/h$  di idrogeno. Nelle 1322 ore di operatività l’unità di elettrolizzazione ha fornito 122 666  $Nm^3$  di idrogeno e per l’80% circa del suo tempo di funzionamento ha operato a carichi di impianto compresi tra il 40 e il 65%.

Il rendimento dell’ impianto è stato calcolato per una produzione di idrogeno di 200 $m^3/h$  pari al 95% del carico massimo dell’impianto di metanazione.

Si è anche ipotizzato un rendimento dell’elettrolizzatore, nel caso in cui questo lavori in condizioni ottimali, pari al 76%

Il sito di Solothurn è anch’esso un impianto di produzione di SNG. L’unità di produzione di idrogeno è formata da due elettrolizzatori PEM-C30 con una potenza nominale di 175kW ognuno. Ognuno dei due

elettrolizzatori può produrre fino a  $30m^3/h$ (STP) ad una pressione di 30 bar. Per la produzione di idrogeno si sono utilizzati 27 l/h di acqua ultrapura (classificata di tipo 1 dalla American Society for Testing and Materials (ASTM)), preparata per un processo di osmosi inversa. Gli elettrolizzatori sono collegati ad un pannello di distribuzione a basso voltaggio(3x400V, 50Hz).

Il rendimento dell' impianto è stato calcolato per una produzione del 75% rispetto al carico massimo dell' impianto. Si è calcolato in oltre un rendimento ottimale dell' elettrolizzatore pari al 76%.

Il sito di Troia consiste in un impianto di sperimentazione per la produzione di LNG (Liquid Natural Gas). La produzione di idrogeno per l'impianto è a carico di un unico elettrolizzatore alcalino sviluppato all'interno del progetto INGRID e customizzato per il progetto STORE&GO con potenza elettrica nominale di 200kW. Nelle 2300 ore totali di funzionamento dell' impianto sono stati prodotti  $17195 m^3$  di idrogeno e per circa il 30% del tempo di funzionamento, l'impianto ha lavorato a circa l'80% del carico massimo.

Il rendimento dell' elettrolizzatore è stato calcolato per una produzione di  $32 m^3/h$  di idrogeno. Nell' ipotesi di ottimizzazione dell' impianto non è stato presentato un rendimento ottimale per l'elettrolizzatore.

### 2.5.2 Documento 2: “ Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review” [24]

Il seguente paper vuole riassumere tutte le informazioni utili sulle tecnologie commerciali e le ricerche correlate alle operazioni di elettrolisi flessibile (a carico variabile) e riassumere i parametri rilevanti per applicazioni in campo PtG e PtL.

Fornisce una visione d'insieme della situazione attuale sull'elettrolisi dell'acqua rivolta a impianti di grandi dimensioni per la produzione e lo stoccaggio di idrogeno.

Nel documento vengono confrontate le maggiori tecnologie di elettrolizzazione (AEL, PEM e SOEL) su i seguenti parametri: capacità produttiva, performance nominale e a carico parziale, flessibilità dell' impianto ( range di carico, gradiente di carico, tempo di start-up, perdite per sistema in stand-by) vita utile e costi di investimento.

Il paper si è avvalso nella sua formazione di articoli scientifici, discussioni dirette con i produttori, reports di progetti ed un'estesa analisi del mercato dei fornitori di elettrolizzatori.

**Tabella 13** - Stato dell'arte (SoA) e targets futuri per i KPI forniti dalla FCH JU per la produzione d'idrogeno da fonti rinnovabili per lo stoccaggio e il bilanciamento energetico. ( I KPI 1,2 e 3 sono stati integrati con unità di misura supplementari, fornite in corsivo, basate sul consumo energetico fornito al KPI1) [24].

		SoA in 2012	2017	2020	2023
KPI 1	Consumo energetico @Potenza nominale	57-60 kWh/kg @100kg/d <i>5.1-5.4kWh/Nm<sup>3</sup></i>	55kWh/kg @500kg/d <i>4.9 kWh/Nm<sup>3</sup></i>	52kWh/kg @1000+ kg/d <i>4.7 kWh/Nm<sup>3</sup></i>	50kWh/kg @1000+ kg/d <i>4.5 kWh/Nm<sup>3</sup></i>
KPI 2	CAPEX @Potenza nominale includendo attrezzatura ausiliaria e messa in produzione	8 M€/(t/d) <i>3400€/ kW<sub>el</sub></i>	3.7 M€/(t/d) <i>1600€/ kW<sub>el</sub></i>	2.0 M€/(t/d) <i>900€/ kW<sub>el</sub></i>	1.5 M€/(t/d) <i>700€/ kW<sub>el</sub></i>
KPI 3	Degradazione @a potenza nominale e 8000h/anno di operatività	2-4%/year <i>5.4-10.7μV/h</i>	2 %/year <i>5.2μV/h</i>	1.5 %/year <i>3.7μV/h</i>	<1 %/year <i>&lt;2.3 μV/h</i>
KPI 4	Flessibilità di carico con degradazione inferiore <2% annua (riferita a KPI 3)	5-100% della potenza nominale	5-150% della potenza nominale	0-200% della potenza nominale	0-300% della potenza nominale
KPI 5	Partenza a caldo da potenza minima a massima Partenza a freddo	1 min 5 min	10 s 2 min	2 s 30 s	<1 s 10 s

*KPI 4 e KPI 5 dovrebbero essere considerati come target opzionali rispetto ai vantaggi portati alla griglia energetica dati dalla flessibilità e/o reattività. La potenza nominale è stata corretta per equivalere ad idrogeno in uscita a 30 bar.*

**Tabella 14** - Panoramica dei sistemi di elettrolizzazione commerciali (sono stati tenuti in considerazione solo gli elettrolizzatori di capacità maggiori per ogni fornitore) [24].

Produttore	Modello	Produzione di $H_2$ $Nm^3/h^a$	Potenza nominale e MW <sup>a</sup>	Pressione e massima Bar	Consumo specifico di energia kWh/ $Nm^3^{a,b}$	$\eta_{LHV}^{a,b,c}\%$	Flessibilità di carico (%)
<b>Elettrolizzatori Alcalini (AEL)</b>							
ELD (DE)	LURGI SE <sup>d</sup>	1400	6.0	30	4.3-4.65	65-70	25-100
Suzhou Jingli (CN)	DQ 1000	1000	4.7	16	4.7	64	10-110
Verde (US)	Verde-1000	1000	4.5	30	4.2	79	n.a.
IHT (CH)	S-556 <sup>d</sup>	760	3.5	32	4.3-4.65	65-70	25-100
PERIC <sup>e</sup> (CN)	ZDQ-600	600	2.8	15	4.6	65	n.a.
NEL Hydrogen <sup>f</sup> (NO)	NEL A485	485	2.1	Atm. <sup>g</sup>	3.8-4.4	68	20-100
ELD (DE)	ELB ND4	480	2.0	Atm. <sup>g</sup>	4.3-4.6	71	25-100
Teledyne <sup>h</sup> (US)	NH-450	450	2.7	10	(5.9 <sup>i</sup> )	(51)	17-100
McPhy <sup>j</sup> (FR)	McLyzer	400	2.0	Atm. <sup>g</sup>	n.a.	n.a.	n.a.
Tianjin Mainland (CN)	FDQ-400/3.0	400	1.76	30	<4.4	68	n.a.
Ener Blue (CH)	L-size	375	1.6	60	4.3	70	n.a.
ELB (DE)	BAMAG S300E	330	1.5	Atm. <sup>g</sup>	4.7	64	25-100
Uralhimmasch (RU)	BEU-250	250	n.a.	10	n.a.	n.a.	n.a.
HT-Hydratechnik (DE)	EV 150	220	1.1	Atm. <sup>g</sup>	(5.3)	(57)	20-100
Uralhimmasch (RU)	FV-200	200	n.a.	Atm. <sup>g</sup>	n.a.	n.a.	n.a.
McPhy <sup>j</sup> (FR)	McLyzer	100	0.5	45	n.a.	n.a.	n.a.
Idroenergy (IT)	Model 120	80	0.4	6	(5.6)	(54)	n.a.
ETOGAS (DE)		62.5 <sup>k</sup>	0.3	15	4.8	63	10-110
Green Hydrogen (DK)	HyProvide A60	60	0.25	30	4.2	72	15-100
ErreDue <sup>l</sup> (IT)	G256 <sup>m</sup>	21	0.11	30	(5.4)	(56)	20-100
Hydrogenics <sup>n</sup> (CA)	HySTAT-100-10 <sup>o</sup>	15	0.08	10(25)	(5.2)	(58)	40-100
Sagim (FR)	M 5000	5	0.03	7	(5)	(60)	n.a.
Linde AG (DE)	HYDROSS	n.a. <sup>p</sup>	n.a.	25	n.a.	n.a.	25-100
<b>PEM electrolysis</b>			<b>MW</b>				
Giner Inc. (US)	Allagash <sup>q</sup>	400	2	40	5	60	n.a.
Hydrogenics <sup>n</sup> (CA)	HyLYZER-3000 <sup>r</sup>	300	1.5	30	(5-5.4)	(56-60)	1-100
Siemens (DE)	SILYZER 200	225	1.25	35	(5.1-5.4)	(56-69)	0-160
ITM Power (GB)		127 <sup>s</sup>	0.7	20-80	(5.5)	(54)	n.a.
Proton OnSite (US)	M400 <sup>t</sup>	50	0.25	30	5	60	0-100
AREVA H2Gen <sup>u</sup> (FR)	E120 <sup>v</sup>	30	0.13	35	4.4	68	10-150
H-TEC (DE)	ELS450	13.1	0.06	30/50	4.5	67	n.a.
Treadwell Corp. (US)		10.2	n.a.	76	n.a.	n.a.	n.a.
Angstrom Advanced (US)	HGH170000	10	0.06	4	(5.8)	(52)	n.a.
Kobelco Eco Solution (JP)	SH/SL60D <sup>w</sup>	10	0.06	4-8	(5.5-6.5)	(46-55)	0-100
Sylatech (DE)	HE32	2	0.01	30	4.9	61	n.a.
GreenHydrogen <sup>x</sup> (DK)	HyProvide P1	1	0.01	50	(5.5)	(55)	n.a.
<b>SOEL</b>			<b>kW</b>				
Sunfire (DE)	RSOC	~0.6	2.2 <sup>y</sup>	10	(3.7)	(96)	-100 to 100 <sup>z</sup>

<sup>a</sup> I dati nelle colonne 3,4 e 7 sono parzialmente dati calcolati personalmente, basati su altre colonne rilevanti

<sup>b</sup> Il consumo di energia specifica cumulativo, valutato per tutto il sistema forniti dal produttore sono indicati fra

parentesi

<sup>c</sup> Efficienza calcolata in base al potere calorifico inferiore LHV (3 kWh/Nm<sup>3</sup>)

<sup>d</sup> ELB e IHT sono basati sulla stessa tecnologia

<sup>e</sup> la tecnologia di elettrolisi di PERIC è distribuita da Wasserelek Hydrotechnik in Germania

<sup>f</sup> NEL Hydrogen ha acquisito GHW (DE) H2Logic (DK), Proton OnSite (US) and Rotolyzer (NO).

<sup>g</sup> "atm". Si intende: prossimo alla pressione atmosferica 20-40 mbar

<sup>h</sup> I moduli sono forniti da Next Hydrogen Corporation (CA)

<sup>i</sup> 5.9 kWh/Nm<sup>3</sup> ad una produzione nominale di 450 Nm<sup>3</sup>/h, 5.1 kWh/Nm<sup>3</sup> per di 225 Nm<sup>3</sup>/h

<sup>j</sup> McPhy ha comprato Piel (IT) e Hytec Enertrag (DE) nel 2013

<sup>k</sup> ETOGAS offre sistemi con una capacità di 250 Nm<sup>3</sup>/h, 1.2 MW, formati da 4 moduli

<sup>l</sup> I moduli di ErreDue sono venduti anche da Pure Energy Centre (GB)

<sup>m</sup> ErreDue offre sistemi (G256) con una capacità di produzione di H<sub>2</sub> fino a 171 Nm<sup>3</sup>/h, 0.9MW formati da 4 moduli

<sup>n</sup> Hydrogenics ha acquisito Stuart Energy (CA) che a sua volta ha acquisito Vandenborre Hydrogen System (BE) e Elwatec (DE)

<sup>o</sup> Hydrogenics offre la configurazione skid-mounted HySTAT-100-10 con capacità 100 Nm<sup>3</sup>/h, 0.5MW, formata da 6 unità elettrolitiche

<sup>p</sup> HYDROSS viene presentata con una capacità di 250Nm<sup>3</sup>/h, numero di unità elettrolitiche non noto.

<sup>q</sup> Giner sta sviluppando un impianto con capacità nominale di 1100 Nm<sup>3</sup>/h a 15.5 bar

<sup>r</sup> Hydrogencis propone HyLYZER-3000-30 come installabile in luogo chiuso con una capacità di 3000 Nm<sup>3</sup>/h, 15MW, formato da 10 unità elettrolitiche

<sup>s</sup> ITM Power propone una piattaforma con capacità di produzione di 1365kg/giorno (630Nm<sup>3</sup>/h),3.5MW, formata da 5 unità elettrolitiche

<sup>t</sup> Proton Onsite offre una soluzione modulare skid-based con capacità fino a 400Nm<sup>3</sup>/h (M400),3.5MW formata da 8 unità elettrolitiche

<sup>u</sup> AREVA H2Gen nasce dalla fusione tra AREVA Helion (FR) e CETH2 (FR) nel 2014

<sup>v</sup> AREVA H2Gen propone sistemi skid-mounted fino a 120Nm<sup>3</sup>/h (E120), 0.6MW, formata da 4 unità elettrolitiche

<sup>w</sup> Kobelco Eco-Solutions propone sistemi skid-mounted fino a 60Nm<sup>3</sup>/h (SH/SL60D), 0.3MW, formata da 6 unità elettrolitiche

<sup>x</sup> Green "Hydrogen ApS" e "EWII Fuell Cells A/S" sono entrati in una partnership a lungo termine per la commercializzazione degli elettrolizzatori PEM ELZE1050 di produzione "EWII Fuell Cells"

<sup>y</sup> Unità modulari con potenza elettrica nominale di 150kW (40 Nm<sup>3</sup>) sono prodotte da Sunfire

<sup>z</sup> Possibilità di funzionamento reversibile del SOC in modalità elettrolisi e cella a combustibile, modalità inattiva vicina alla temperatura operativa possibile.

Come si può osservare dalla tabella, l'efficienza nominale e il consumo specifico energetico degli elettrolizzatori commerciali stanno nel range del 63-71%<sub>LHV</sub> e 4.2-4.8kWh/Nm<sup>3</sup> per gli AEL, mentre 60-68%<sub>LHV</sub> e 4.4-5.0kWh/Nm<sup>3</sup> per gli elettrolizzatori PEM.[40]

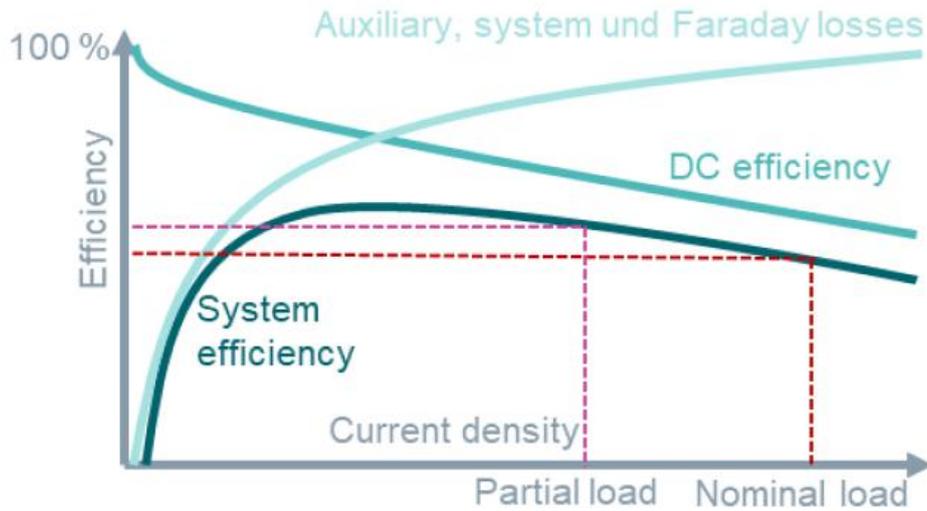
Se l'elettrolizzatore però è fatto lavorare a carichi più bassi di quelli nominali, si nota un progressivo aumento della sua efficienza. Questo è dovuto al fatto che l'aumento del carico parziale comporta un aumento della densità di corrente [A/cm<sup>2</sup>] agli elettrodi [24]. L'eccessiva transizioni di moli di elettroni per unità di tempo comporta un ostacolo reciproco alle transizioni delle cariche. In aggiunta, il fenomeno, si traduce in un aumento locale della temperatura con conseguente creazione di bolle che schermano ulteriormente la transizione. L'efficienza, espressa come il rapporto tra energia guadagnata nella creazione di idrogeno su energia spesa per produrlo, vede quindi un forte aumento della potenza impiegata correlata ad un aumento non lineare dell'efficienza.

In un elettrolizzatore AEL, fatto lavorare ad una densità di corrente di 0.1 A/cm<sup>2</sup> (pari a circa il 25% della densità di corrente nominale di 0.4 A/cm<sup>2</sup>) si osserva un aumento dell'efficienza fino ad un 73-86%.

L'elettrolizzatore PEM opera tipicamente a densità di corrente più alte rispetto all' AEL, circa  $1-2 \text{ A/cm}^2$ . Ad una densità di corrente di  $2 \text{ A/cm}^2$  corrisponde una produzione di  $8.4 \text{ Nm}^3$  per ogni  $\text{m}^2$  di cella, che è quattro volte più alto rispetto al elettrolizzatore AEL. Il voltaggio della cella ad una tale densità di corrente risulta essere  $1.65-2.5 \text{ V}$  ( $4.0-6.08 \text{ kWh/Nm}^3$ ,  $\eta_{\text{LHV}} = 50-76\%$ ) che è paragonabile a quella del AEL, ma ad una densità di corrente maggiore.

Ad una densità di corrente di  $0.1 \text{ A/cm}^2$ , pari al 5% della densità di corrente nominale di  $2 \text{ A/cm}^2$ , l'efficienza della cella PEM cresce fino al 76-84%.

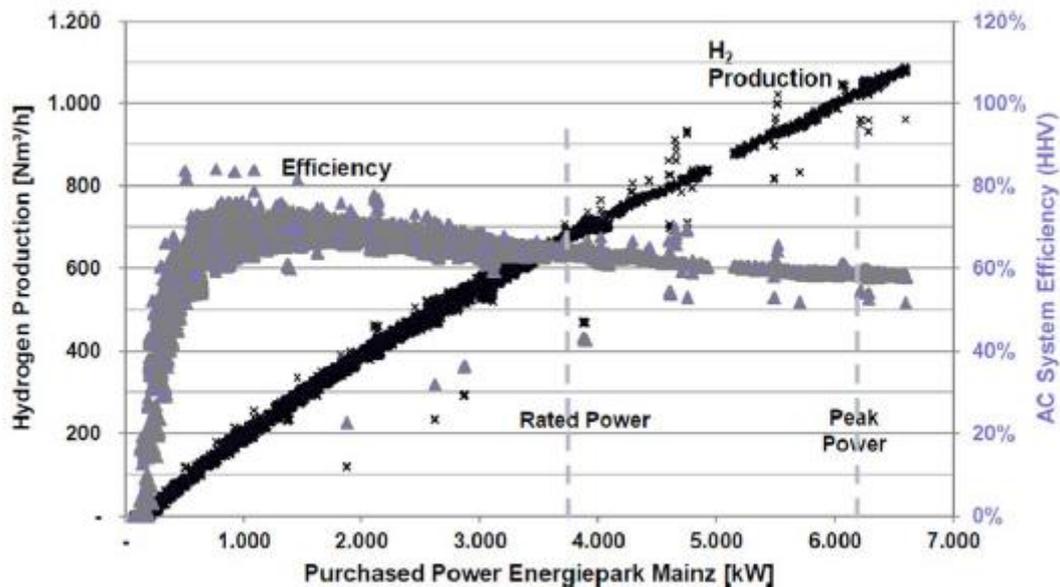
L'efficienza media degli elettrolizzatori aumenta dunque con la riduzione dei carichi parziali.



**Figura [12]** - Andamento dell'efficienza di un elettrolizzatore al variare del carico.

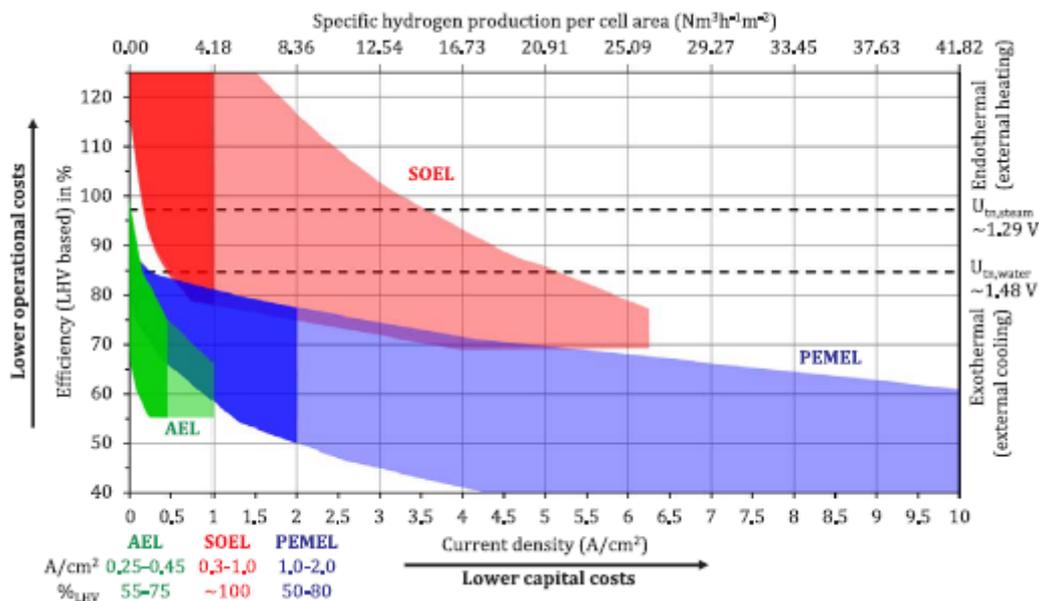
Da tenere in considerazione però, che una riduzione del carico parziale comporta sì un aumento dei rendimenti dell' elettrolizzatore, ma contemporaneamente anche un calo del rendimento totale dell' impianto dovuto alla riduzione di performance di un compressore sovradimensionato per quei carichi.[24] La figura ... rappresenta l'andamento dell' efficienza totale dell'elettrolizzatore PEM dell'impianto costruito dalla Siemens per il progetto Engiepark Mainz al variare della potenza con cui questo è stato fatto funzionare.

E' comunque importante ricordare che l'elettrolizzatore AEL possiede un carico minimo di funzionamento, compreso tra il 10-40% , al di sotto del quale l'idrogeno potrebbe diffondersi ed incontrare l'ossigeno, causando pericoli per la struttura. Per gli elettrolizzatori PEM, i produttori considerano non esserci un carico minimo per la bassa permeabilità della membrana che li costituisce



**Figura [13]** - Andamento dell'efficienza complessiva dell'impianto fornito dall'elettrolizzatore PEM della Siemens al Energiepark Mainz, considerando tutti i consumi (Compressione, raffreddamento, purificazione, controllo). In nero la produzione[Nm<sup>3</sup>/h] ed in grigio l'efficienza.

Una rappresentazione riassuntiva delle possibilità di impiego dei vari elettrolizzatori è riassunta nella figura



**Figura [14]** - Riassunto delle efficienze e range operazionali per le diverse tipologie di elettrolizzatori.

La seguente tabella riassume lo stato dell' arte dei principali parametri che caratterizzano gli elettrolizzatori.

**Tabella 15** - Riassunto dello stato dell'arte dei principali parametri delle tecnologie concernenti l'elettrolisi dell'acqua[24]

	AEL	PEMEL	SOEL
Parametri di processo			
Temperatura della cella (°C)	60-90	50-80	700-900
Pressione tipica (bar)	10-30		1-15
Densità di corrente (A/cm <sup>2</sup> )	0.25-0.45		0.3-1.0
Flessibilità		0-100	
Flessibilità di carico (%carico nominale)	20-100	5-10 min	-100/+100
Tempo di start-up a freddo	1-2 h	<10 s	Hours
Tempo di start-up a caldo	1-5 min		15 min
Efficienza			
Efficienza nominale modulo di elettrolizzazione	63-71%	60-68%	100% <sup>a</sup>
Consumo specifico di energia (kWh/Nm <sup>3</sup> )	4.2-4.8	4.4-5.0	3
Efficienza nominale di impianto <sup>b</sup> (LHV)	51-60%	46-60%	76-81%
Consumo specifico di energia (kWh/Nm <sup>3</sup> )	5.0-5.9	5.0-6.5	3.7-3.9
<b>Capacità produttive disponibili</b>			
Potenza nominale massima per impianto (MW)	6	2	<0.01
Produzione di H <sub>2</sub> per impianto (Nm <sup>3</sup> /h)	1400	400	<10
Area della cella (m <sup>2</sup> )	<3.6	<0.13	<0.06
Durabilità			
Tempo di vita	55-120	60-100	(8-20) <sup>c</sup>
Percentuale di degradazione annua (%/a)	0.25-1.5	0.5-2.5	3-50
Parametri economici			
Costi di investimento (€/kW)	800-1500	1400-2100	(>2000) <sup>c</sup>
Costi di mantenimento(% di costo di investimento all'anno)	2-3	3-5	n.a.

### 2.5.3 Documento 3: "Evaluation of hydrogen production cost in different real case studies" [42].

Il paper riporta i risultati ottenuti nel primo anno di esercizio di un impianto di generazione di idrogeno e rifornimento di veicoli ad idrogeno a Capo d'Orlando, Sicilia, per un progetto di ricerca italiano nominato i-NEXT. L'impianto sperimentale, che genera idrogeno da fotovoltaico, è progettato per rifornire giornalmente un minivan elettrico, un minibus a batteria e fuel cell per il trasporto pubblico e 2 biciclette elettriche a noleggio munite di fuel cells. Se la produzione eccede la richiesta, l'idrogeno in eccesso viene stoccato in un serbatoio di accumulo. L'impianto è comunque collegato alla rete elettrica dove può drenare l'eventuale elettricità prodotta in eccesso o da dove può attingere se l'energia generata da i fotovoltaici non è sufficiente.

L'impianto genera idrogeno grazie ad un elettrolizzatore alcalino, prodotto da ErreDue Spa, progettato per operazioni nominali a 54 A, 80° di temperatura e produzione a 10 bar. La produzione nominale di idrogeno è di circa 6.6 Nm<sup>3</sup>/h (~0.60 kg/h).

L'impianto è costituito da un buffer di bassa pressione a 9 bar, ed uno ad alta pressione, costituito da sette bombole da 50 litri ogniuna a 360 bar dove l'idrogeno pressurizzato da un compressore viene raccolto.

L'andamento del carico giornaliero dell'elettrolizzatore è mostrato in figura.

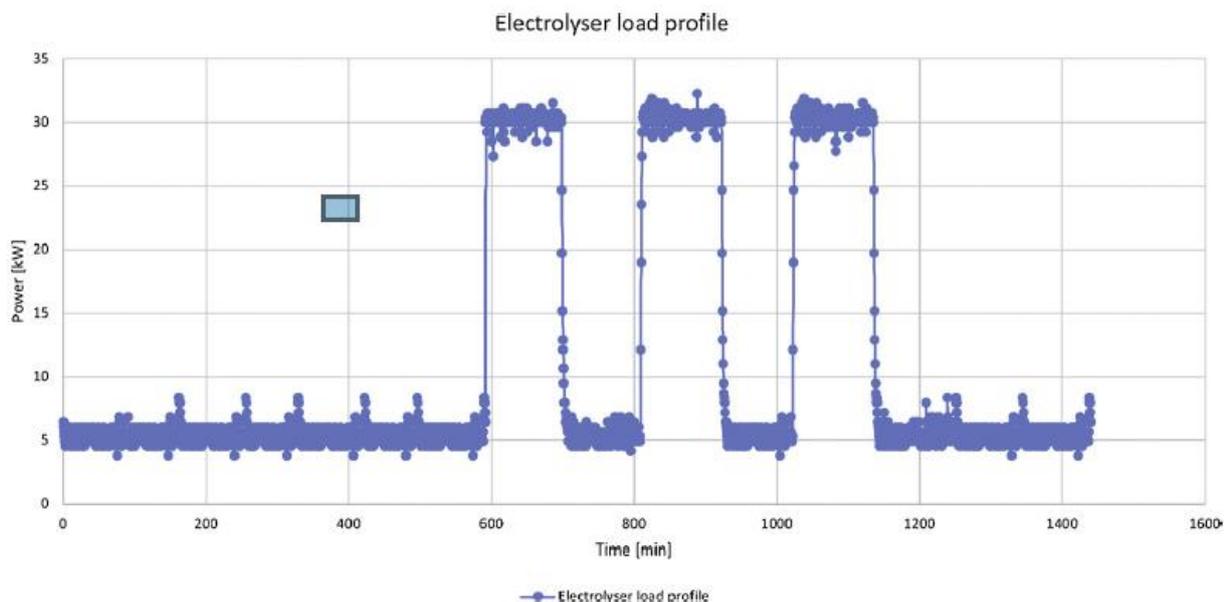


Figura [15] Profilo di carico giornaliero dell'elettrolizzatore.

L'elettrolizzatore funziona in tre manches da 120 minuti ciascuna ad una potenza nominale di 30kW ogni giorno, per un' energia complessiva di 648 MJ ( $30\text{kW} \cdot 360\text{min} \cdot 60\text{sec} = 648\text{MJ}$ ), mentre lavora in modalità stand-by a 5kW per la restante parte della giornata, per un consumo di 324 MJ. Il consumo complessivo giornaliero è quindi di 972 MJ, per una produzione di 5.4 kg di idrogeno/gg

equivalenti a  $120\text{MJ}$  (energia di 1kg di idrogeno) \* 5.4 kg/gg = 648 MJ di energia prodotta. Il rendimento è dunque:

$$\eta = \frac{648}{972} = 66.6\%$$

#### 2.5.4 Documento 4: "Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review" [43]

Il presente documento effettua un analisi tecnica ed economica sullo stato attuale delle principali tecnologie in campo power to gas facendo un riassunto dei parametri fondamentali che caratterizzano le diverse tecnologie di elettrolizzazione.

I principali dati che riporta sono i seguenti:

Tabella 16 - Tabella riassuntiva dei parametri operazionali chiave degli elettrolizzatori alcalini, PEM e SOEL. [43]

	AEL	PEM	SOEL
<b>Stato di sviluppo</b>	Commerciale	Commerciale	Laboratorio
<b>Produzione di H<sub>2</sub> in m<sup>3</sup>/h (misurato in condizioni STP)</b>	<760 ~ 2.7MW	Fono a circa 450 ~1.6MW	-
<b>Temperatura della cella in °C</b>	40-90	20-100	800-1000
<b>Tensione nella cella in V</b>	1.8-2.4	1.8-2.2	0.91-1.3
<b>Consumo energetico del sistema in kWh/m<sup>3</sup></b>	Caso 1 – 4.5-7 Caso 2 – 4.7-5.4 Caso 3 – 5.4-8.2	Caso 1 – 4.5-7.5 Caso 2 – 5.2-7.1 Caso 3 – 4.9-5.2	-
<b>Consumo energetico del sistema in futuro in kWh/m<sup>3</sup></b>	4.3-5.7	4.1-4.8	-

<b>Cold start time</b>	Minuti-ore	Secondi-minuti	-
<b>Carichi parziali</b>	Carichi parziali fino al 20% Possibili i sovra-carichi	Carichi parziali fino al 5% Possibili i sovra-carichi	-
<b>Lifetime</b>	Fino a 30 anni	Minori degli AEL	-
<b>Rendimento(%)*</b>	37-67	42-64	-

\*Il rendimento è stato calcolato autonomamente, considerando il LHV dell' idrogeno pari a 2,99 kWh/m<sup>3</sup>

I rendimenti dovuti agli elettrolizzatori AEL risultano variare maggiormente rispetto ai PEM.

La tendenza si inverte se si considerano i carichi parziali a cui gli elettrolizzatori possono funzionare. Gli elettrolizzatori AEL, infatti, possono funzionare ad un carico parziale minimo di circa il 20% rispetto a quello nominale e funzionare con un sovraccarico massimo del 150% circa. Gli elettrolizzatori PEM invece possono arrivare a carichi parziali fino al 5% senza compromettere la sicurezza dell' impianto. Gli elettrolizzatori PEM hanno un costo mediamente maggiore degli AEL, e risultano anche avere una vita media più breve.

Gli elettrolizzatori SOEL risultano una tecnologia ancora in fase di sviluppo rispetto agli altri comprovati elettrolizzatori, si ipotizza comunque un rendimento medio più alto delle altre tecnologie, anche se, si ipotizza, che le alte temperature comporteranno una degradazione dei materiali impiegati più veloce.

### 2.5.5 Riassunto dei principali KPI

La seguente tabella vuole riassumere, da i dati ritrovati nei diversi paper scientifici analizzati, i principali Key Parameters Indicators, necessari per analizzare e comparare le prestazioni dell'impianto oggetto di studio di questa tesi.

	<b>AEL</b>	<b>PEM</b>	<b>SOEL</b>
<b>Consumo elettrico @capacità nominale[kWh/kg]</b>	47.9-56.7	51.17-60	33.4-38.9
<b>Densità di corrente [A/cm<sup>2</sup>]</b>	0.25-0.45	1.0-2.0	0.3-1.0
<b>Tempo operativo da partenza a caldo</b>	1-5 min	<10 s	15 min
<b>Tempo operativo da partenza a freddo</b>	Minuti-ore	Secondi-minuti	ore
<b>Tasso di perdita di produzione [%/anno]</b>	0.25-1.5	0.5-2.5	3-50
<b>Rendimento medio [%]</b>	63-71	60-68	>90

## 2.6 Progettazione dell'impianto ad idrogeno in virtù dei KPI

L'elettrolisi dell'acqua può essere il punto di snodo nell'accoppiamento energetico di varie fonti (chimica, elettrica, mobilità, riscaldamento) bilanciando la griglia di richiesta e permettendo l'unione anche con fonti rinnovabili fluttuanti come solare ed eolica. E' quindi doveroso conoscere l'efficienza, la flessibilità, il carico parziale, la stand-by performance, la capacità dell'elettrolizzatore (impianti da svariati MW a GW) e costo capitale, dipendenti da applicazioni specifiche e strategie operative.

Un sistema di monitoraggio ragionato ed un punto di confronto robusto sono essenziali per il raggiungimento di questo scopo.

I KPI offrono al mercato una linea guida ed un paragone su quali siano i valori auspicabili dal funzionamento di un impianto.

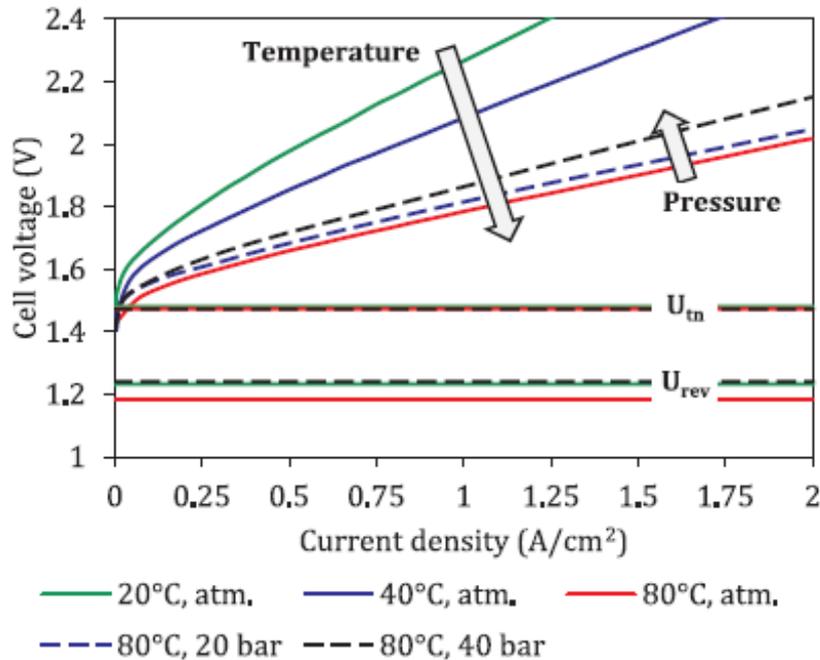
Tutti gli impianti presenti al mondo, infatti, sono caratterizzati dall'aver un funzionamento teorico, dove dissipazioni e rendimenti non sono tenuti in considerazione ed uno reale che tiene conto di tutte le possibili perdite che comportano un abbassamento delle prestazioni del sistema.

Tali perdite sono fortemente correlate alle condizioni in cui il sistema opera e richiedono quindi un'attenta conoscenza ed un monitoraggio nel tempo per avere una corretta visione di insieme dell'impianto.

[Nota - Stand-by performance: Si tratta dell'efficienza nel caso di on-off. Esiste infatti un rendimento della regolazione a due posizioni per tutti gli impianti.](#)

### 2.6.1 L'influenza di pressione e temperatura sulle prestazioni di un elettrolizzatore.

La relazione tra la tensione e la corrente, o densità di corrente, (I-U) caratterizza il comportamento elettrochimico di una cella elettrolitica. La densità di corrente è approssimativamente proporzionale al rateo di produzione di idrogeno secondo la legge di Faraday. Tuttavia, la legge di Faraday, che riguarda una cella elettrolitica ideale, deve essere moltiplicata per l'efficienza  $\eta_F$  (o efficienza attuale) che è definita come il rapporto tra tasso di produzione di idrogeno effettivo e teorico. Questa deviazione è causata da perdite da correnti parassite, che si generano nel fluido in prossimità degli elettrodi, e permeazione dei gas prodotti attraverso la membrana. Le correnti parassite, sono correnti di natura meccanica del fluido, e non elettrica, causate dall'ostacolo reciproco di quest'ultimo al passaggio verso l'elettrodo. Queste aumentano a basse resistenze elettriche, causate da una bassa densità di corrente, e ad alte temperature, e sono particolarmente rilevanti per gli elettrolizzatori AEL. La permeazione, che è il passaggio di idrogeno, e raramente ossigeno, attraverso la membrana di separazione, presente sia negli elettrolizzatori AEL che PEM, aumenta con la temperatura e la pressione e questo effetto negativo è maggiore a basse densità di corrente dovute alla minore produzione di gas [44-45]. La permeazione è un problema complesso perché può portare alla generazione di miscele esplosive di idrogeno ed ossigeno. Ad una densità di corrente nominale, l'efficienza di Faraday  $\eta_F$  risulta essere prossima al 100% (98-99.9%). Si osserva una forte diminuzione dell'efficienza di Faraday al di sotto di una densità di corrente di 50–100 mA /cm<sup>2</sup> per un elettrolizzatore AEL. Grigoriev et al. [44] riportano una diminuzione dell'efficienza di Faraday di un elettrolizzatore PEM da quasi il 100%, per pressioni fino a 20 bar, al 90% per una pressione di 130 bar [24].



**Figura [16]** – Influenza di temperatura e pressione sull’andamento delle curve caratteristiche I-U per una cella elettrolitica di un elettrolizzatore PEM

Come si può osservare dal grafico l’aumento della temperatura (come anche la riduzione della pressione) comporta una riduzione della pendenza delle curve I-U (l’andamento di densità di corrente e tensione applicata alla cella non sono lineari). Questo dipende dal fatto che, da una parte, l’aumento della temperatura corrisponde ad una riduzione della tensione della cella, o consumo specifico di energia di 0.01-0.1V/10°C o 0.02-0.24 kWh/Nm<sup>3</sup>/10°C rispettivamente per gli elettrolizzatori AEL e PEMEL [24], dall’altra, come visto precedentemente, l’aumento di temperatura comporta un aumento delle correnti parassite che ostacolano il passaggio del flusso. Per quanto riguarda la pressione, un suo aumento aiuta a ridurre l’effetto di formazione delle bolle di gas schermanti, in prossimità degli elettrodi, ma accentua il fenomeno della permeazione con il conseguente rischio di atmosfere esplosive.

I parametri di temperatura e pressione hanno quindi una forte influenza sull’andamento della densità di corrente e di conseguenza sul sistema. La scelta della densità di corrente nominale di un sistema, infatti, risulta essere un parametro fondamentale su cui influire poiché incide su operatività e costi capitali. Una maggiore densità di corrente si traduce in:

- Incremento della produzione di idrogeno per unità di area della cella, che si traduce in una riduzione dei costi capitali su Nm<sup>3</sup>
- In una riduzione di performance, dovute al calo del rendimento, che si traducono in un aumento dei costi operativi
- In una riduzione della vita media dovuto all’aumento delle sovratensioni.

Ai carichi parziali, quindi, corrisponde una riduzione della densità di corrente ed un aumento dell’efficienza. Tutti gli elettrolizzatori, dunque, possono raggiungere efficienze molto elevate con la riduzione dei carichi. Come risultato il consumo specifico nominale di energia, kWh/Nm<sup>3</sup>, normalmente fornito dal costruttore, non è un dato efficace se non viene fornita anche la densità di corrente nominale.

Le curve caratteristiche I-U dell’andamento di una cella elettrolitica risultano dunque essere un sistema di misura delle performance più efficace [24].

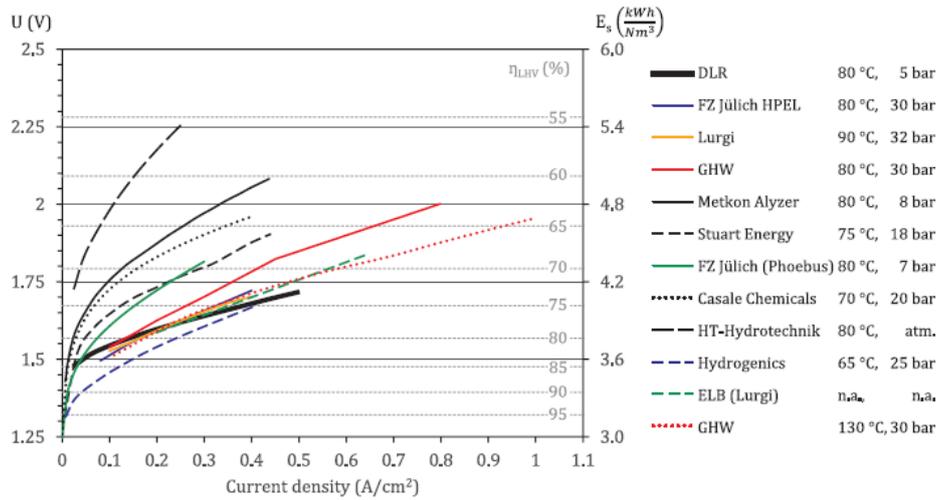


Figura [17] – Rappresentazione delle curve caratteristiche I-U di alcuni degli elettrolizzatori alcalini comparsi al capitolo 2.5.2.

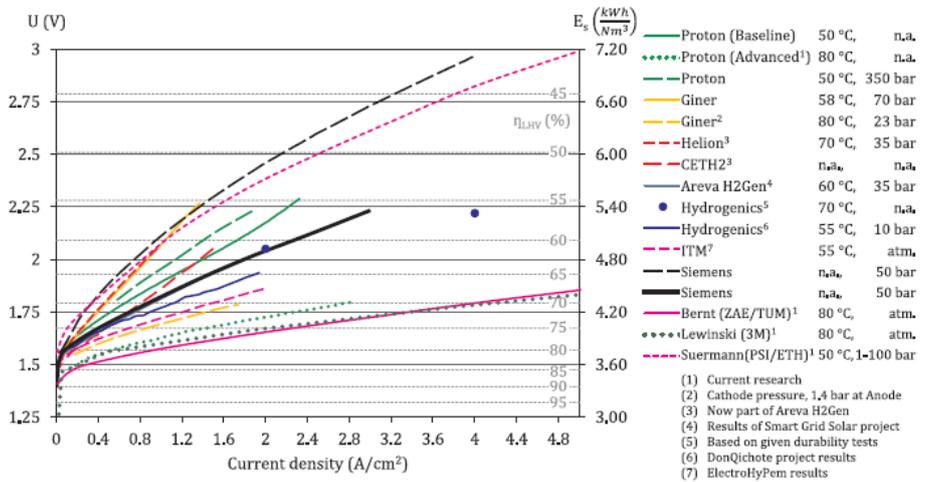


Figura [18] – Rappresentazione delle curve caratteristiche I-U di alcuni degli elettrolizzatori PEM comparsi al capitolo 2.5.2.

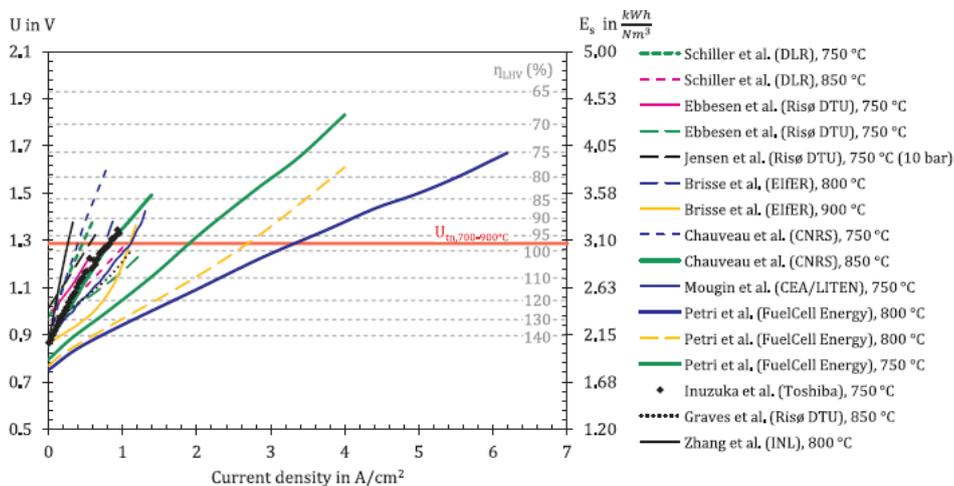


Figura [19] – Rappresentazione delle curve caratteristiche I-U di alcuni degli elettrolizzatori SOEL comparsi al capitolo 2.5.2.

### 2.6.1.1 Le condizioni di misura STP per i gas.

Un altro motivo che rende fondamentale il monitoraggio di pressione e temperatura dell'idrogeno è che questo è un gas.

Una doverosa premessa: l'idrogeno non è un gas ideale. La legge dei gas espressa dall'equazione  $PV = nRT$ , che verrà presentata in questo capitolo, è molto utile, ma occorre ricordare che rappresenta solo un'approssimazione per i gas reali. In particolare la sua capacità di rappresentarne il comportamento diminuisce quando i gas si trovano vicini ai loro punti di ebollizione. In queste condizioni, e cioè ad alte pressioni e basse temperature, diventano significative le forze intermolecolari (forze di Van Der Waals) che influenzano il comportamento delle molecole. Inoltre, quando le molecole sono vicine le une alle altre come si verifica alle alte pressioni, il volume proprio delle molecole diventa importante e non più trascurabile.

Esistono equazioni modificate (come quella di Van Der Waals) che tengono conto di ciò e che rappresentano più fedelmente il comportamento dei gas reali in queste condizioni. Viceversa, a pressioni relativamente basse e temperature relativamente alte (nel caso dell'idrogeno è sufficiente non trovarsi in un intorno della temperatura di ebollizione  $-252,9^{\circ}\text{C}$  e pressioni elevate, mai raggiunte nell'impianto oggetto di studio), l'equazione dei gas ideali riflette in modo soddisfacente il comportamento dei gas e, pur tenendo conto dei suoi limiti, può essere applicata senza riserve [46].

I gas reali, entro determinati parametri, quindi, rispondono

- alla legge di Boyle (1662) che stabilisce la relazione fra la pressione di un gas e il suo volume definendo che: "A temperatura costante, il volume di una data massa gassosa è inversamente proporzionale alla sua pressione".  $(PV)_{T,m} = a$   
T = temperatura  
m = massa  
a = costante
- alla legge di Charles (1787) che stabilisce la relazione fra il volume di un gas e la sua temperatura definendo che: "A pressione costante, il volume di una data massa gassosa è direttamente proporzionale alla sua temperatura".  $V_{p,m} = cT$   
c = costante
- alla legge di Gay-Lussac (1802) che stabilisce la relazione fra la pressione di un gas e la sua temperatura definendo che: "A volume costante, la pressione di una data massa gassosa è direttamente proporzionale alla sua temperatura assoluta".  $P_{v,m} = cT$

Dalla combinazione di queste tre formule si ottiene la cosiddetta "equazione generale dei gas":

$$PV = nRT$$

Dove:

n = numero di moli di gas.

R = costante universale dei gas.[46]

Dall'analisi dell'equazione si può comprendere come mai i valori di misura dell'idrogeno necessitano di essere correlati alle condizioni in cui le misurazioni sono state ottenute.

La portata dell'idrogeno, infatti, come anche il consumo specifico di energia, sono spesso fornite rapportate al volume: rispettivamente  $\text{Nm}^3/\text{h}$ ,  $\text{kWh}/\text{Nm}^3$ .

Essendo però l'energia che, l'idrogeno può liberare combinandosi all'ossigeno, direttamente dipendente dalla quantità di massa e non di volume, questi ultimi parametri non risultano essere sufficienti.

Noto il volume, infatti, è necessario conoscere temperatura e pressione al fine di determinare univocamente il numero di moli e quindi la massa di idrogeno prodotto.

$$V = \frac{nRT}{P}$$

Lo standard per la misurazione, fissato dalla IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), e definito STP (Standard Temperature and Pressure), è di  $0^\circ\text{C}$  e 1 bar ( $10^5$  pascal) per la misurazione dell'idrogeno [47].

## 2.7 Le norme ATEX per la prevenzione da esplosioni :

L'impianto oggetto di studio vuole essere uno strumento per l'analisi ed il monitoraggio degli impianti per la gestione e lo stoccaggio dell'idrogeno. Trattando un gas ad alto rischio di espositività, l'impianto necessita di essere progettato secondo norme che garantiscano una conformità Europea per ambienti a rischio di esplosione, le norme ATEX.

"ATEX" è l'acronimo di "ATmosphere EXplosive", ovvero atmosfera esplosiva.

Le norme ATEX, quali le norme Europee ATEX 2014/34/UE (anche ATEX 114) e ATEX 99/92/CE (anche ATEX 137 ora ATEX 153) forniscono direttive sul calcolo del pericolo, nel caso di atmosfere potenzialmente esplosive, quanto sugli accorgimenti preventivi da adottare in base alla gravità del rischio.

La normativa prevede due gruppi di strumentazioni atte a ridurre il rischio di esplosione:

- Gruppi I: prodotti da utilizzare in miniere grisucose;
- Gruppo II: apparecchiature destinate all'utilizzo in superficie.

Per gli apparecchi di superficie, come nel caso dell'impianto oggetto di studio, esistono 3 categorie di strumenti, in funzione del livello di protezione (zona di utilizzo); le categorie sono individuate dal numero 1,2,3 seguito dalla lettera G (Gas) oppure D (Dust).

- Categoria 1: apparecchi o sistemi di protezione che garantiscono un livello di protezione molto elevato;
- Categoria 2: apparecchi o sistemi di protezione che garantiscono un livello di protezione elevato;
- Categoria 3: apparecchi o sistemi di protezione che garantiscono un livello di protezione normale;

La classificazione delle aree pericolose (zone di utilizzo) viene effettuata seguendo le raccomandazioni suggerite dalle **EN 1127-1**, **EN 60079-10-1** (gas-Ex) e **EN 60079-10-2** (polveri-Ex), le quali prevedono la suddivisione delle aree pericolose in tre zone, funzione della frequenza e del tempo di presenza della sostanza esplosiva.

Nel caso di zone soggette a pericoli dovuti alla presenza di gas esplosivi la classificazione è la seguente:

Zone	Dichiarazione conformità e istruzioni d'uso
Zona 0	Un'area in cui sono presenti atmosfere esplosive in continuazione o per lunghi periodi.
Zona 1	Un'area in cui possono essere presenti atmosfere esplosive, durante le normali operazioni
Zona 2	Un'area in cui possono essere presenti atmosfere esplosive, ma solo in casi poco frequenti o per brevi periodi

In base alla zona, è richiesto l'utilizzo di strumenti di categoria adeguata per minimizzare il rischio di esplosioni e per prevenirne la gravità in caso queste si verificassero.

Tutti gli strumenti certificati ATEX apportano un codice che ne definisce la zona di impiego ed un simbolo che certifica la possibilità di impiego in atmosfera esplosiva [48].



## CAPITOLO 3 - L'IMPIANTO OGGETTO DI TESI

### 3.1 La strumentazione adottata nell'impianto

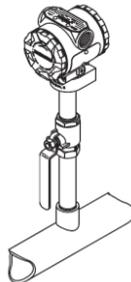
Il presente capitolo vuole essere una breve guida preliminare sulla strumentazione adottata nell'impianto. La scelta della disposizione della strumentazione sarà giustificata nel capitolo 3.2.2, quando l'impianto sarà descritto nel dettaglio.

#### 3.1.1 Strumenti di misura

Gli strumenti di monitoraggio presenti nell'impianto si dividono in:

- Trasduttori di pressione (PT)
- Trasduttori di temperatura (TT)
- Trasduttori di portata volumetrica (FT)
- Trasduttore di portata massica o misuratore di Coriolis (FT-1.14)

I trasduttori di pressione (PT) riescono a misurare la pressione, relativa o assoluta, in base alla configurazione, grazie ad una membrana capacitiva. Questa membrana viene posta in pressione dal gas presente nella pipeline e fornisce, in uscita, un segnale elettrico proporzionale alla pressione misurata [49]. Il segnale è misurato presso il sensore di pressione in polisilicone allo stato solido mentre il diaframma è fornito da catalogo o come 316L (acciaio a basso tenore di carbonio), o come Hastelloy C-276. La camera richiede una bassa quantità di olio che garantisce una bassa influenza sulla temperatura del fluido trattato.

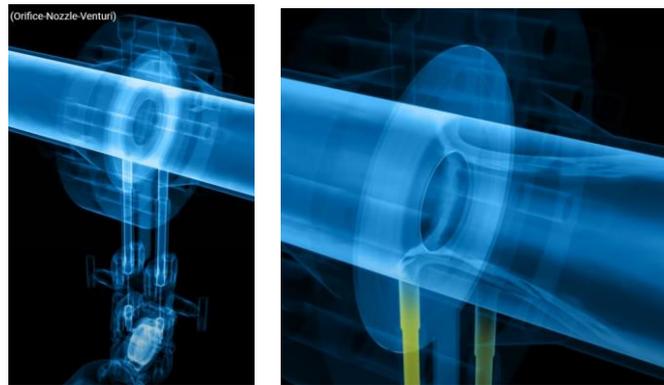


Schematizzazione di un trasduttore di pressione.

I trasduttori di temperatura (TT) misurano la temperatura del fluido con l'ausilio del cosiddetto ponte di Wheatstone (il funzionamento del ponte sarà trattato nei successivi capitoli) che consiste in un ponte a quattro resistenze, 2 note, 1 regolabile ed una variabile. Il ponte si trova in equilibrio nel momento in cui i prodotti delle resistenze opposte sono uguali. Agendo sulla resistenza regolabile il ponte può essere regolato affinché ad una specifica temperatura, solitamente 0°C, e ad una specifica tensione, questo sia in equilibrio. A questo punto la resistenza variabile, una termocoppia che varia la propria resistenza in funzione della temperatura, indurrà uno squilibrio nel circuito, tra i due capi liberi del ponte, proporzionale alla variazione di temperatura [50].

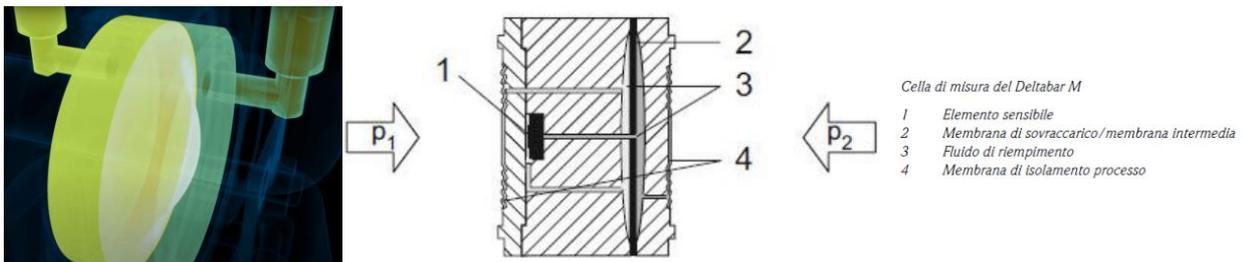
I trasduttori di portata volumetrica (FT) sfruttano la variazione di pressione generata da un orifizio tarato, a monte e a valle di questo, percepita attraverso una membrana differenziale, per comprendere la portata in volume che transita nella pipeline. La portata risulta infatti essere proporzionale alla pressione differenziale.

La membrana differenziale percepisce la differenza di pressione a monte e a valle dell'orifizio, pressione che varia a causa della perdita di carico dovuta al brusco restringimento di sezione nel condotto.



**Figura [20]** – Visione di insieme del Trasduttore di pressione differenziale a destra, dettaglio della perdita di carico localizzata a valle dell'orifizio a sinistra.

I due rami nel condotto, ( evidenziati in giallo in Figura [20], destra) percepiscono quindi una differente pressione del fluido in ingresso, pressione che causa una flessione della membrana differenziale, misurata con l'ausilio di un elemento sensibile che modifica la propria resistenza, capacità o induttanza causando un uscita di segnale variabile, proporzionale alla pressione differenziale. Il salto di pressione, misurato dal sensore è direttamente proporzionale alla velocità di deflusso del fluido, e quindi alla sua portata [49].



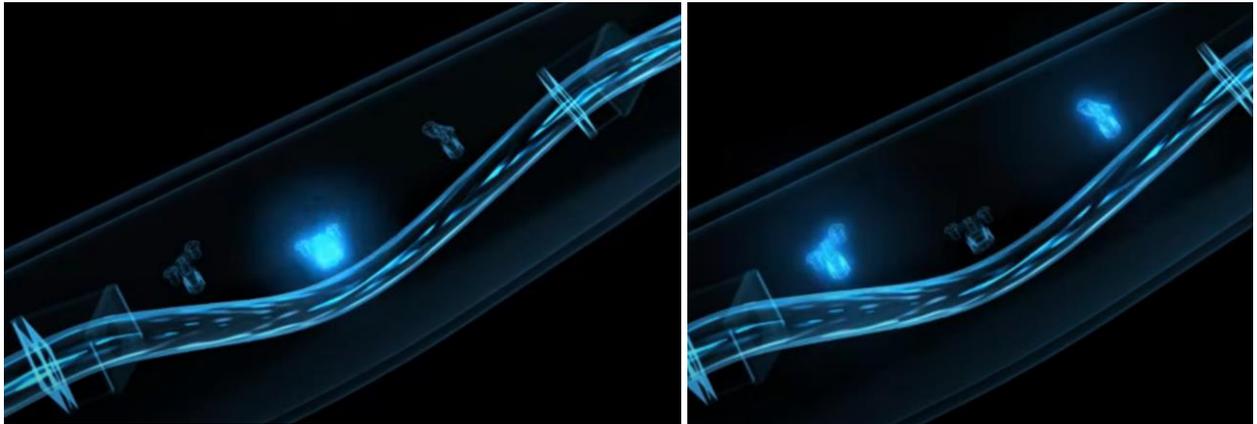
**Figura [20] a sinistra, Figura [21] a destra** – A sinistra si può osservare la flessione del diaframma dovuta alla differenza di pressione provocata nei due condotti. A destra è schematizzato il principio di funzionamento del diaframma.

Il misuratore di portata ad effetto Coriolis è costituito da un tratto mobile a ferro di cavallo al cui vertice viene posto un eccitatore che ha il compito di fare oscillare il condotto mentre questo è attraversato dal tubo.



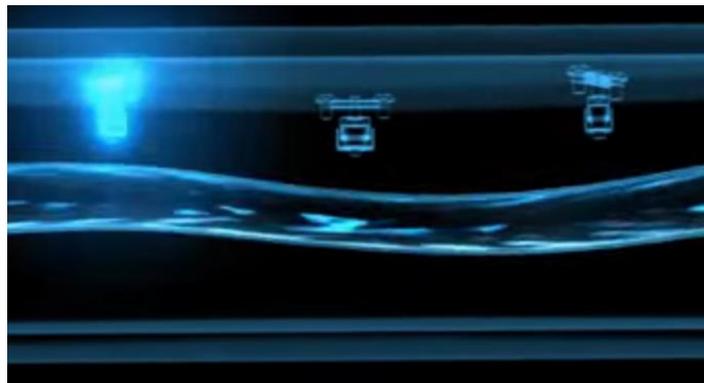
**Figura [22]** – Schematizzazione di un misuratore di portata ad effetto Coriolis

Ad una distanza equidistante dal vibratore, in direzione opposta, sono posti due sensori A e B che misurano l'oscillazione del tubo.



**Figura [22]** – a destra è evidenziato l'eccitatore, mentre a sinistra i sensori A e B.

Se non ci fosse moto del fluido nel tubo i due sensori A e B percepirebbero la stessa oscillazione. Nel momento in cui il fluido inizia a scorrere nel tubo la portata massica crea una decelerazione dell'oscillazione all'ingresso del tubo ed un'accelerazione all'uscita creando uno sfasamento percepito ai sensori. Questo sfasamento è proporzionale alla portata massica che scorre nel tubo ed è indipendente da temperatura o pressione nel tubo [51].



**Figura [22]** – Il tubo inizia a flettersi a causa dello scorrimento del fluido eccitando i sensori in maniera sfasata.

Gli strumenti di misura, fino ad ora citati, utilizzano un protocollo di comunicazione a 4-20mA. Il protocollo misura i limiti inferiori (LRL – Lower Range Limit) e superiori (URL – Upper Range Limit) percepiti da un sensore attraverso l'invio di un segnale analogico proporzionale alla misura del sensore che va da 4 mA, nel caso il segnale in ingresso sia pari al minimo percepibile dallo strumento, a 20 mA, nel caso di massimo. Se avviene un guasto nella linea, per esempio un filo viene reciso, il segnale in uscita passa a 0 mA assicurando quindi una comunicazione repentina del sensore di un malfunzionamento senza lasciare possibilità di dubbio se il segnale sia realmente in funzione o meno [52].

### 3.1.2 Il sensore di rilevazione di idrogeno

Un altro interessante strumento di monitoraggio del sistema è il Sensore di rilevazione di idrogeno:

Il rilevatore di idrogeno è necessario in tutti quei settori industriali dove si può verificare una fuga di idrogeno. Il sensore riesce a rilevare se del gas fuoriesce dal sistema e, nel caso in cui la concentrazione di idrogeno superi un valore soglia, settato ad un valore percentuale del LEL (lower explosive limit-quantità minima percentuale di idrogeno nell'aria affinché possa avvenire l'esplosione), il dispositivo si attiva inviando un segnale finalizzato alla messa in sicurezza dell'impianto.

Se per esempio il sensore fosse settato a 30% LEL, il sensore si attiverebbe nel momento in cui la percentuale di idrogeno nell'aria raggiunge il 30% del valore minimo d'idrogeno nella miscela tale per cui questa possa esplodere.

#### 3.1.2.1 Mezzo catalizzante di rilevazione del gas esplosivo e mezzo sensibile:

Quasi tutti i sensori di rilevazione idrogeno (e tutti quelli presi in esame nel progetto) sfruttano dei sensori catalitici (chiamati anche, a livello industriale, pellistori) come mezzo di rilevazione del gas. Tale elemento catalizzante, che consiste in uno strato di palladio, ha lo scopo di reagire in maniera specifica con il gas da rilevare, in questo caso innescando l'ossidazione dell'idrogeno, con un conseguente aumento della temperatura.

Il mezzo sensibile usato nel sensore invece, è il platino. Il platino infatti è un metallo che varia la propria resistività ( $\rho$ ) linearmente alla variazione della temperatura, secondo l'equazione:

$$\rho(T) = \rho_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)]$$

$\rho(T)$ =resistività del materiale a temperatura T.

$\rho_0$ =resistività del materiale a temperatura  $T_0$ .

$\alpha$ =coefficiente che dipende dal materiale.

Di conseguenza una variazione di temperatura comporta anche una variazione di resistenza, secondo l'equazione:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

L=lunghezza del conduttore

S=sezione del conduttore

[53]

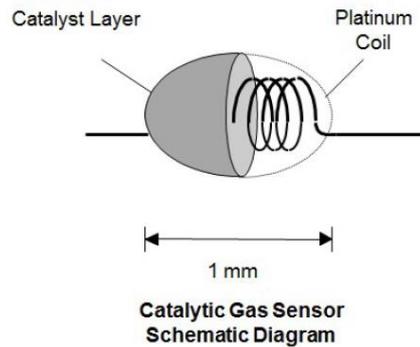
#### 3.1.2.2 Funzionamento nel dettaglio:

Il principio di funzionamento si basa su due avvolgimenti di platino, entrambi ricoperti da uno strato ceramico (allumina che va a formare la così detta forma a perla), connessi in un circuito elettrico noto come: "Ponte di Wheatstone".

Uno dei due avvolgimenti è impregnato con uno speciale catalizzatore al palladio che promuove l'ossidazione (Elemento di rivelazione), mentre il secondo non è trattato per inibire l'ossidazione (Elemento di riferimento).

La corrente passa attraverso le spirali così da permettere di raggiungere la temperatura che favorisce l'ossidazione del gas (circa 500°C). Quando il gas combustibile è bruciato nel rilevatore, l'ossidazione causa un'ulteriore aumento della temperatura del pellistore trattato, ovvero una differenza di temperatura

rispetto a quello non trattato (di riferimento) creando uno squilibrio nel circuito a ponte lineare, proporzionale alla variazione di resistenza [54].



**Figura [23]** - Avvolgimento di platino impregnato nel catalizzatore al palladio a formare la “bead”

### 3.1.2.3 Funzionamento generico del ponte di Wheatstone:

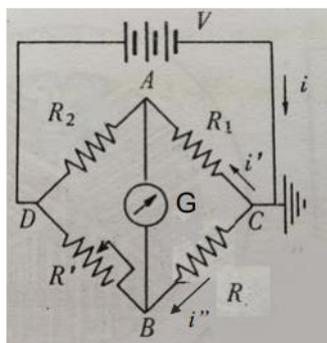
Il ponte di Wheatstone è una configurazione molto usata. Tale architettura infatti, permette di osservare la variazione di resistenza su uno dei rami con una precisione estremamente elevata. Una volta generata una differenza di potenziale nel circuito, che alimenta i due rami resistivi posti in parallelo, la corrente ( $i$ ) inizia a fluire in quest’ultimo. Se il ponte fosse in equilibrio si verificherebbe la seguente configurazione:

$V_{AB}=0$  (ponte equilibrato) se:

$$\begin{cases} i'' \cdot R_1 = i' \cdot R \\ i' \cdot R_2 = i'' \cdot R' \end{cases}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R}{R'}$$

cioè, se il prodotto fra le resistenze opposte nei rami del sistema fosse uguale, la corrente si ripartirebbe equamente tra i due rami non creando quindi una differenza di potenziale tra i capi liberi del ponte. Se invece, i prodotti delle resistenze opposte non fossero uguali, la corrente si ripartirebbe tra i due rami, prediligendo il ramo a minor resistenza. Si avrebbe perciò uno scorrimento impari di corrente tra i due rami, con conseguente variazione della tensione ai due capi liberi del ponte A-B [50].



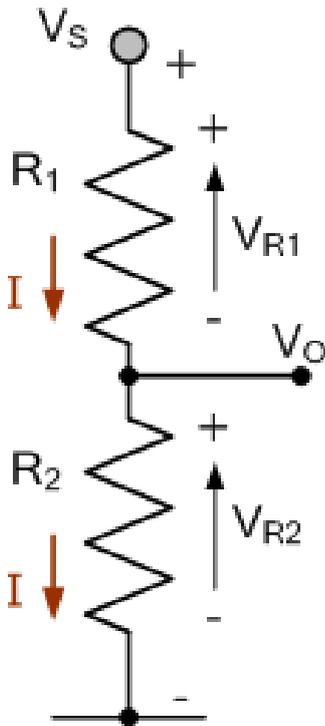
**Figura [24]** - Struttura generale di un ponte di Wheatstone

Nel dettaglio:

Applicata una differenza di potenziale al generatore, la corrente inizia a fluire nel circuito.

La differenza di tensione tra D e C risulterà essere  $V_{DC}$  pari alla tensione generata ai capi del generatore. analizzando singolarmente uno dei due rami posti in parallelo, ad esempio CAD, si osserverà che:

Il ramo sarà sottoposto alla tensione  $V_s = V_{DC}$  (essendo un ramo in parallelo con CBD).



Non avendo la corrente altrimenti che transitare attraverso il ramo, le due resistenze  $R_1$  ed  $R_2$ , poste in serie, saranno attraversate dalla medesima corrente ( $I$ ). Essendo, in oltre il ramo sottoposto alla tensione  $V_s$  la somma di  $V_{R1}$  e  $V_{R2}$  sarà uguale a quest'ultima. Sarà dunque:

$$V_s = V_{R1} + V_{R2}$$

$$V_{R1} = I \cdot R_1$$

$$V_{R2} = I \cdot R_2$$

$$V_s = I \cdot (R_1 + R_2)$$

$$I = \frac{V_s}{(R_1 + R_2)}$$

Le tensioni ai capi di ciascuna resistenza saranno:

$$V_{R1} = R_1 \cdot I_{R1}$$

$$V_{R2} = R_2 \cdot I_{R2}$$

Essendo  $I_{R1} = I_{R2} = I$  Risulterà:

$$V_{R2} = V_s \cdot \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

Con riferimento alla figura 2 , le tensioni  $V_A$  e  $V_B$  saranno:

$$V_A = V_{DC} \cdot \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

$$V_B = V_{DC} \cdot \left( \frac{R'}{R' + R} \right)$$

Tali equazioni saranno uguali se il sistema sarà in equilibrio:

$$V_A = V_B$$

cioè se:

$$\left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) = \left( \frac{R'}{R' + R} \right)$$

E quindi:

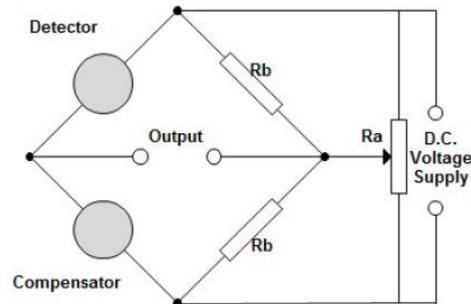
$$R_2 \cdot R = R_1 \cdot R'$$

Se il sistema invece non sarà in equilibrio

$$V_A \neq V_B$$

si misurerà di conseguenza un  $\Delta V_{AB}$ .

#### 3.1.2.4 Ponte di Wheatstone nel rilevatore di idrogeno:



**Suggested  
Operating Circuit**

**Figura [25]** - Struttura ponte di wheatstone nel rilevatore di idrogeno catalitico.

Nel ponte di Wheatstone, utilizzato nel rivelatore di idrogeno catalitico, l'avvolgimento di *platino impregnato del catalizzatore* (Detector) occupa una delle resistenze di un ramo, mentre l'avvolgimento di *platino senza catalizzatore* (Compensator), l'altra.

Il vantaggio di tale configurazione è quello di annullare le variazioni esterne quali temperatura, umidità e pressione. Com'è noto, infatti, una variazione di corrente e quindi di differenza di tensione calcolata, si verifica tra i due rami solo se il prodotto tra le resistenze dei rami opposti è diverso, cioè se:

$$\text{Compensator} \cdot R_b = \text{Detector} \cdot R_b$$

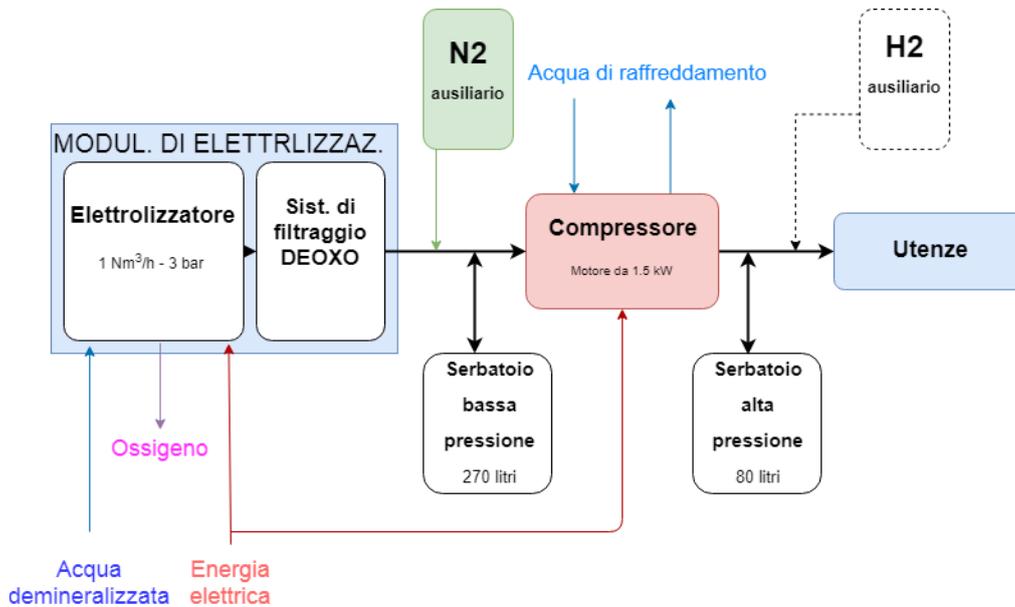
Essendo *Compensator* e *Detector* soggetti al medesimo ambiente, una variazione della resistenza dovuta unicamente a condizioni atmosferiche avviene equamente in entrambe le resistenze, di conseguenza, il prodotto delle resistenze opposte rimane uguale e, malgrado le resistenze varino, questo non comporterebbe una variazione di tensione ai capi del ponte.

Oltre alla linearità e all'ininfluenza alle variazioni ambientali, il principio catalitico offre altri due grossi vantaggi: la ripetibilità, nel senso che successive prove forniscono sempre lo stesso valore relativo alla stessa concentrazione (salvo aggiustamento nel tempo dello zero del ponte) e della riproducibilità in quanto tutti i sensori della stessa casa forniscono lo stesso valore per la stessa concentrazione senza variazioni tra un sensore o un altro [54].

## 3.2 L'impianto nel dettaglio

### 3.2.1 Process Flow Diagram (PFD)

Il process flow diagram è un diagramma comunemente utilizzato nell'ingegnerizzazione chimica e di processo per indicare il funzionamento in generale di un impianto. Il PFD è mirato a fornire la relazione tra i principali componenti della struttura senza riportare i dettagli minori quali i dettagli della pipeline e altre informazioni ausiliarie [55].



PFD dell'impianto oggetto di studio.

Il processo ha inizio nel modulo di elettrolizzazione. Il modulo riceve acqua demineralizzata ed energia elettrica e fornisce in output ossigeno, liberato poi in atmosfera, ed idrogeno con una portata di circa 1 Nm<sup>3</sup>/h ad una pressione media di 3 bar e massima di 5.5 barg ad una temperatura di +20°C/+100°C.

Il modulo è composto da un elettrolizzatore ed un sistema di filtraggio DEOXO, finalizzato alla rimozione dell'ossigeno che può rimanere nel fluido in uscita. Il filtro crea una resistenza al passaggio del fluido costringendolo attraverso una membrana catalitica composta da metalli preziosi, solitamente in leghe a base platino. Questa resistenza permette, all'eventuale ossigeno residuo, di reagire con l'idrogeno a formare vapore acqueo che può poi essere rimosso dal filtro di essiccamento se necessario. L'idrogeno in uscita dal modulo ha una purezza di circa 99,999%.

Una volta lasciato il modulo di elettrolizzazione, l'idrogeno viene accumulato in un serbatoio da 270 litri che funge da buffer per il compressore, previa riduzione di pressione a 1,5 barg. Qui l'idrogeno è aspirato da un compressore a membrana avente capacità di 1 Nm<sup>3</sup>/h e compresso a circa 34 barg in uno stoccaggio da circa 80 litri.

Delle bombole di azoto ausiliario sono impiegate per assicurare la totale assenza di ossigeno nelle pipelines prima dell'immissione di idrogeno nell'impianto. Una rampa di riduzione di pressione si assicura che l'azoto venga immesso nel sistema tra i 4 ed i 5 barg.

Una bombola di Idrogeno ausiliaria può essere attivata manualmente all'occorrenza nel caso in cui la disponibilità dell'impianto non esaurisca la richiesta. L'idrogeno immesso dalla bombola ausiliaria viene ridotto alla pressione di 3,5 bar grazie all'ausilio di un riduttore di pressione.

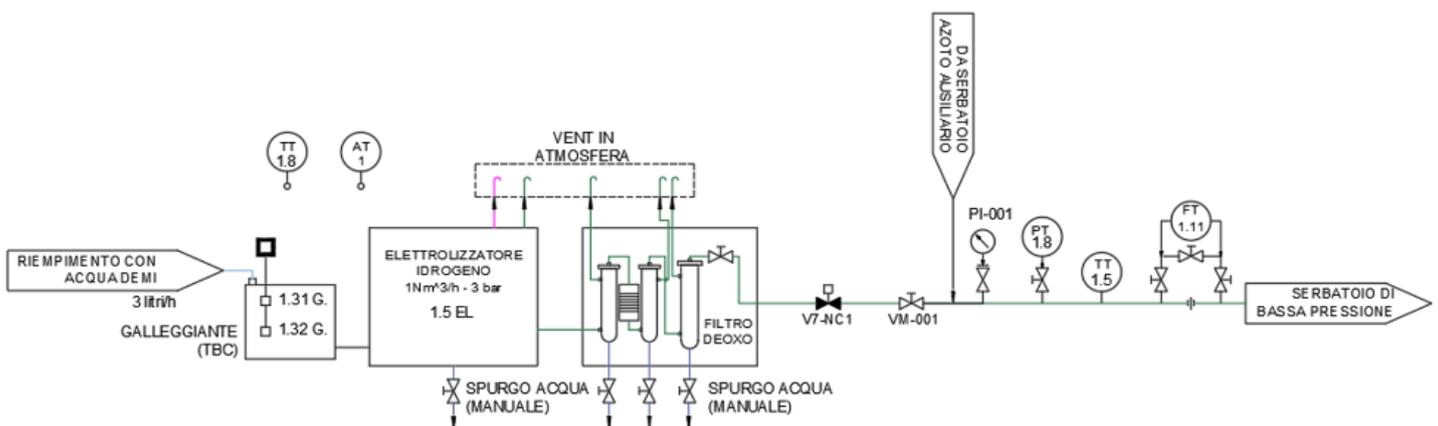
L'idrogeno stoccato nel serbatoio ad alta pressione passa infine in un tratto finale dove vengono monitorati gli ultimi parametri prima dell'invio agli utilizzatori. Qui l'idrogeno è ulteriormente ridotto a circa 0,5 barg prima dell'immissione in servizio.

### 3.2.2 Piping and Instrumentation Diagram (P&ID)

Il piping and instrumentation diagram è un diagramma dettagliato nell'industria di processo che mostra il piping e l'equipaggiamento di processo assieme alla strumentazione ed i dispositivi di controllo [56].

Lo scopo del P&ID è quello di fornire tutte le informazioni necessarie sul funzionamento dell'impianto. Nel proseguo di questo capitolo saranno trattate le strumentazioni utilizzate nell'impianto e sarà giustificato il loro impiego.

#### 3.2.2.1 Rack Elettrolizzatore



Dettaglio P&ID del rack Elettrolizzatore.

##### 3.2.2.1.1 Elettrolizzatore e sistema di filtraggio

Un galleggiante posto nella tanica di raccolta dell'acqua demineralizzata da 20 litri situata all'ingresso dell'elettrolizzatore segnala il livello dell'acqua da fornire per l'elettrolizzazione. Da qui una pompa, posta all'interno della macchina, aspira l'acqua, quando ciò è richiesto dall'unità di controllo. Qui avviene l'elettrolizzazione dell'acqua per mezzo di un elettrolizzatore AEL. L'impianto è fornito di una valvola manuale per scaricare giornalmente la condensa che si crea durante il processo di elettrolizzazione. Una volta superate le valvole di sicurezza, per idrogeno ed ossigeno, che impediscono, ad un possibile ritorno di fiamma di raggiungere la macchina, i gas vengono indirizzati rispettivamente, al filtro deoxo ed essicatore, ed al rilascio in atmosfera.

Il sistema Deoxo (costituito dai primi due cilindri che si incontrano all'uscita dall'elettrolizzatore) è progettato per ottenere una purificazione dell'idrogeno dai residui di ossigeno attraverso il principio della combustione catalitica. Il processo di rimozione della percentuale di ossigeno nell'idrogeno (generata dal processo di elettrolisi avvenuto nel Generatore di idrogeno ed ossigeno) è ottenuto attraverso uno speciale catalizzatore. Il risultato del trattamento è: idrogeno estremamente puro: 5/10 ppm di ossigeno

nell'idrogeno. Il catalizzatore si trova all'interno di un serbatoio in acciaio (denominato reattore catalitico); Il sistema è completato con due colonne di essiccazione (pre-filtro e post-filtro).

L'idrogeno elettrolitico impuro entra nel serbatoio del deoxo. L'ossigeno viene rimosso dall'idrogeno allo stato di vapore nel momento in cui passa attraverso un letto di pallet di catalizzatore di metallo prezioso che è sostenuto su una griglia. L'ossigeno si combina con l'idrogeno per formare vapore di acqua secondo la reazione:



La reazione è accompagnata dallo sviluppo di calore. Per ogni 0.1% di ossigeno nell'idrogeno di processo impuro, il massimo aumento di temperatura teorico sarà approssimativamente di 16°C.

L'idrogeno filtrato deve poi essere "asciugato" della percentuale di vapore presente al suo interno. Viene quindi inviato all'essiccatore (cilindro situato più a destra) per un'ulteriore asciugatura prima di essere immesso nella pipeline.

Sia le colonne di essiccazione del filtro deoxo che l'essiccatore stesso sono muniti di valvole manuali per lo spurgo della condensa che si genera durante il processo. Lo scarico della condensa deve essere svolto alla fine di ogni ciclo di utilizzo per non rischiare che gli scarichi possano otturarsi con conseguente riduzione dell'efficacia del materiale essiccante.

#### **3.2.1.1.2 Strumentazione**

L'idrogeno viene immesso nella pipeline attraverso l'elettrovalvola V7.NC1 normalmente chiusa come aspetto di sicurezza.

La valvola manuale VM-001 ha lo scopo di disaccoppiare la linea nel caso in cui sia richiesta della manutenzione all'impianto a monte o a valle di questa.

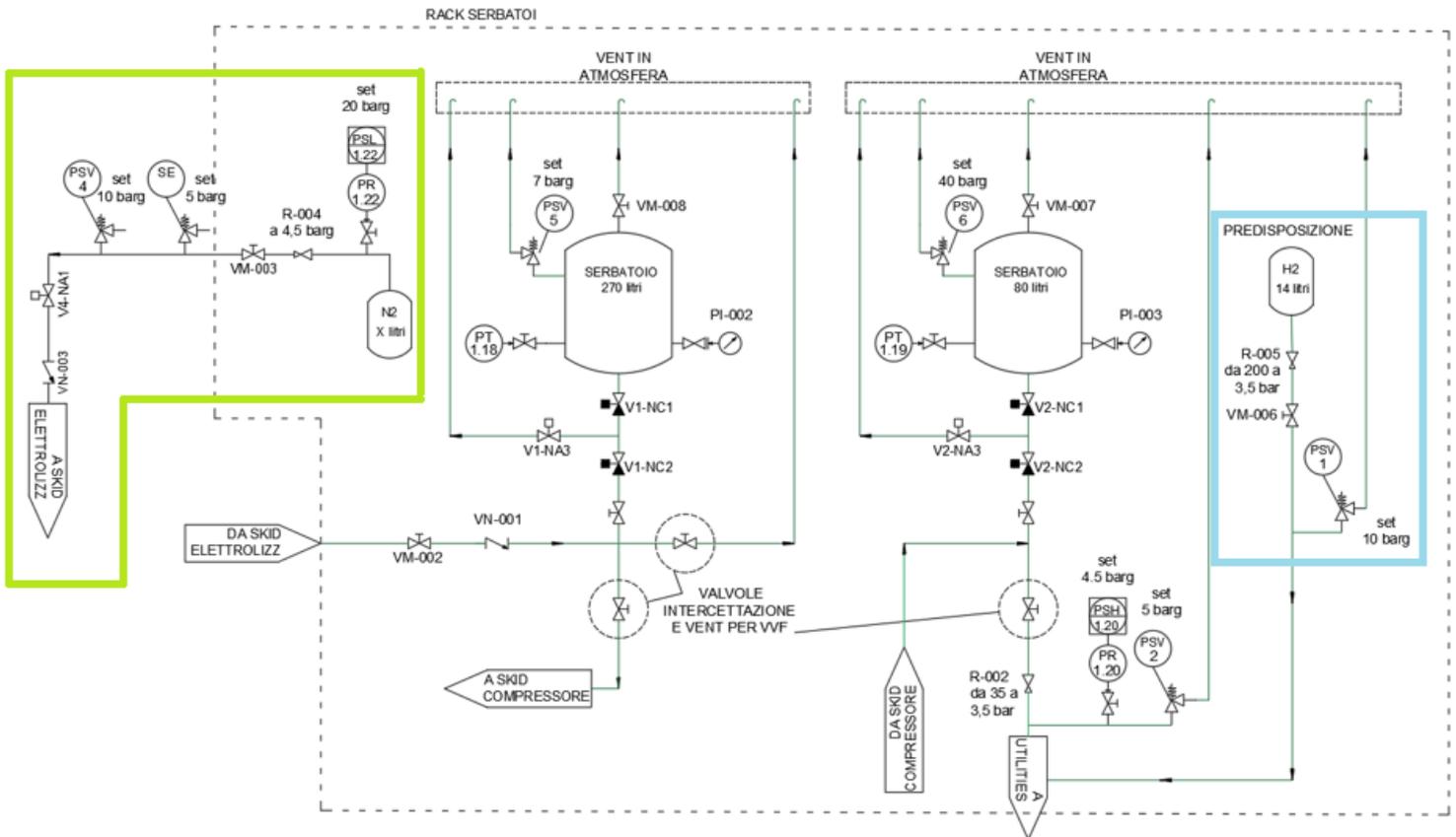
Il manometro PI-001 ha lo scopo di fornire la pressione all'interno della pipeline ad un operatore che necessiti di una consultazione in loco.

Come anticipato nel capitolo 2.6.1.1 Il trasduttore di portata volumetrica FT 1.11 non è sufficiente a definire la quantità in massa di idrogeno transitante nella pipeline poiché questa dipende dalle condizioni di pressione e temperatura a cui il gas si trova. Per fornire un monitoraggio completo del sistema è necessario quindi integrare con il trasduttore di pressione PT 1.8 e quello di temperatura TT 1.5.

Essendo il cabinato ubicato in ambiente aperto, è soggetto alle condizioni climatiche ambientali. Per verificare che le temperature all'interno del cabinato non eccedano valori che potrebbero mettere in pericolo la struttura è stato posto un trasduttore termico supplementare, il TT 1.8, che monitora costantemente l'ambiente.

Infine il cabinato è fornito di un sensore per la misurazione dell'idrogeno nell'aria AT 1, (informazioni sul funzionamento possono essere trovate al capitolo 3.1.2) che, nel caso in cui ci siano delle fuoriuscite di gas, si attiva imponendo l'arresto della macchina e la chiusura delle valvole solenoidi, mettendo in sicurezza l'area.

### 3.2.2.2 Rack Serbatoi



Dettaglio P&ID del rack Serbatoi.

Una volta che l'idrogeno viene misurato nei suoi parametri principali, è inviato al rack serbatoi (DA SKID ELETTROLIZZATORE). Qui viene raccolto in un polmone da 270 litri, prima di essere inviato al compressore. Una volta pressurizzato sarà nuovamente inviato al rack serbatoi e raccolto in un secondo serbatoio di alta pressione da circa 80 litri. Da qui, in base alla richiesta, verrà inviato alle utenze attraverso il ramo utilities.

La porzione di P&ID evidenziata in verde rappresenta il ramo ausiliario di azoto, finalizzato a garantire la totale assenza di ossigeno nella pipeline prima della messa in servizio dell'impianto. L'azoto infatti viene rilasciato nell'impianto, previa riduzione, tra i 4 ed i 5 barg, fino a completo riempimento per poi essere fatto fuoriuscire in atmosfera, trasportando con sé l'eventuale ossigeno.

La porzione di P&ID evidenziata in azzurro rappresenta un serbatoio ausiliario di H<sub>2</sub>. Il serbatoio serve a garantire la richiesta nel momento in cui le disponibilità dell'impianto non fossero sufficienti ad esaurirla completamente.

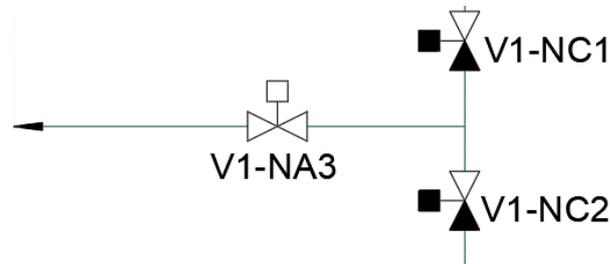
#### 3.2.2.2.1 Strumentazione

A partire dall'ingresso dell'idrogeno nel rack serbatoi (DA SKID ELETTROLIZZATORE) si intercetta la valvola VM-002 necessaria a disaccoppiare l'impianto nel caso in cui siano richiesti interventi di manutenzione.

A seguire si trova la valvola di non ritorno VN-001 che garantisce che il fluido scorra in una sola direzione.

Le valvole segnate come “valvole intercettazione e vent per VVF” sono poste nel caso si debbano effettuare interventi di emergenza per mettere in sicurezza l’impianto.

I due serbatoi, di alta e di bassa, presentano la medesima disposizione della strumentazione, verranno quindi trattati un'unica volta.



Sistema “Block-and-Bleed”

All’ingresso dei serbatoi è presente un sistema “block-and-Bleed” costituito da elettrovalvole ad azione fail-safe tali da isolare i recipienti in caso di emergenza. Se un guasto infatti dovesse occorrere e, attraverso le elettrovalvole, normalmente chiuse VX.NC1 e VX.NC2, fosse misurata una fuga di gas, questo verrebbe espulso attraverso la valvola normalmente aperta VX.NA3, mantenendo in sicurezza l’impianto.

I serbatoi sono in oltre dotati di:

- Un trasduttore di pressione che monitora costantemente la pressione del gas nel serbatoio.
- Un manometro per la consultazione in loco dello stato di pressione.
- Una valvola di sicurezza (PSV) che garantisce che le pressioni, all’interno dei serbatoi, non superino dei valori di soglia.
- Una valvola manuale necessaria per eventuali operazioni di manutenzione o scarico bombole.

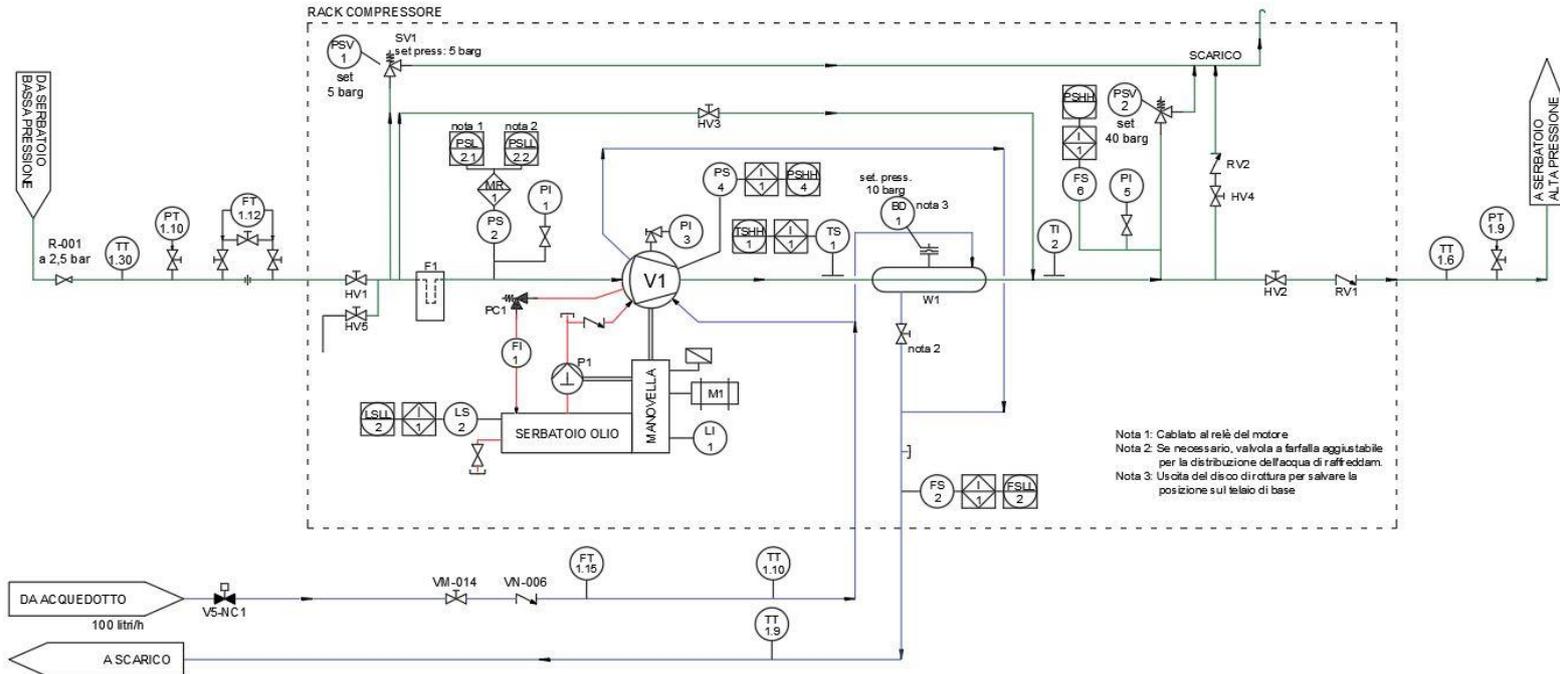
Il pressostato PR 1.20 serve per segnalare l’anomalo aumento di pressione a valle del riduttore R-002. La segnalazione sarebbe comunque gestita automaticamente dalla valvola di sicurezza SV2 posta in prossimità.

Il serbatoio ausiliario di idrogeno (parte evidenziata in azzurro nel P&ID) presenta una rampa di riduzione della pressione che permette al fluido all’interno della bombola, pressurizzato a 200 bar, di essere immesso alla pressione adeguata di 3,5 bar. Quando è necessario che la bombola ausiliaria sopperisca alla richiesta nella rete, La valvola manuale VM-006 viene attivata. La bombola ausiliaria infatti è disaccoppiata dal sistema fino a che la richiesta di idrogeno non eccede le capacità produttive dell’impianto.

La linea di Azoto, avente lo scopo di immettere il gas nella pipeline ad una pressione di circa 4,5 barg per assicurare l’assenza di ossigeno nella pipeline, presenta:

- Un pressostato PR 1.22 per assicurarsi che la pressione non ecceda i 20 barg.
- Una rampa di riduzione della pressione
- Un disco di rottura per la pressione SE
- Una valvola di sicurezza PSV4
- Un elettrovalvola che regola l’immissione dell’azoto
- Una valvola di non ritorno, VN-003, per non avere infiltrazioni di idrogeno nel ramo.

### 3.2.2.3 Rack Compressore



Dettaglio P&ID – Rack compressore ed interno compressore

L'idrogeno, proveniente dal serbatoio di bassa pressione, viene ridotto a 2,5 bar dal riduttore R-001 e misurato nei suoi parametri di pressione, portata volumetrica e temperatura, per avere una misura esatta della portata massica in ingresso al compressore.

Una volta entrato nel compressore, di cui il P&ID è riportato in figura all'interno dell'area tratteggiata, viene pressurizzato ed inviato verso il serbatoio di alta pressione.

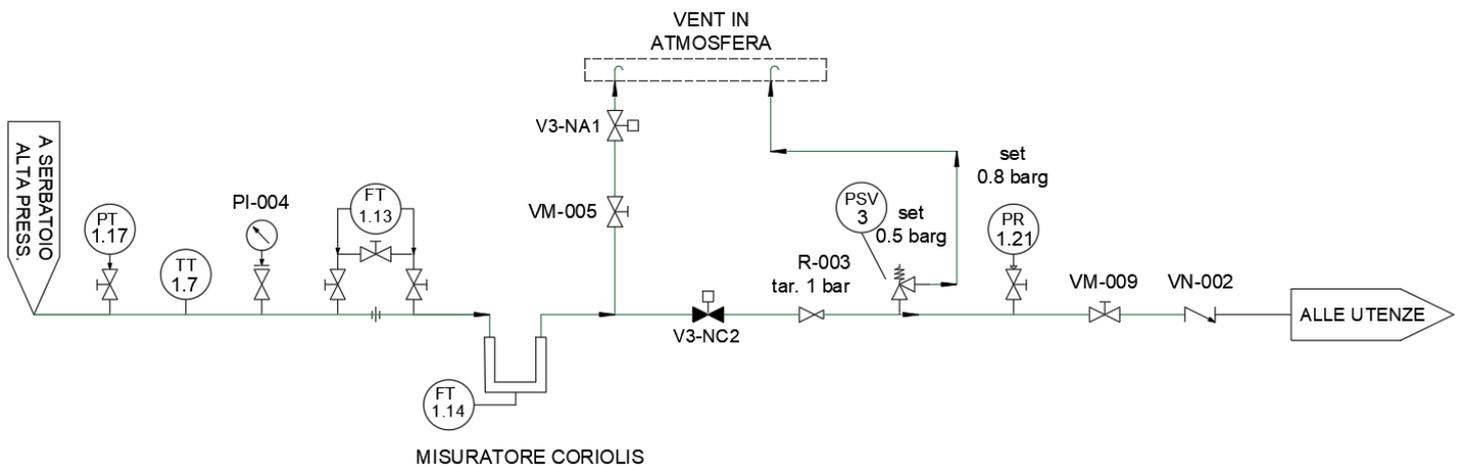
In uscita, solo temperatura e pressione sono misurate. Questo è dovuto al fatto che, a meno di perdite, la portata di ingresso deve essere uguale a quella di uscita, risulta dunque superfluo l'impiego di un secondo trasduttore di portata volumetrica. La presenza degli altri due trasduttori, invece, è giustificata dalla necessità di capire quanto calore sia stato scambiato nel processo di compressione per due motivi principali:

- Che la pressione finale del fluido varierà in funzione della temperatura secondo la legge vista nel capitolo 2.6.1.1:  $PV = nRT$
- Che le temperature, in ingresso al serbatoio e su tutta la linea, non raggiungano valori che possano compromettere la sicurezza dell'impianto.

Nella parte inferiore del P&ID si può osservare la porzione di ingresso ed uscita del circuito di raffreddamento del compressore. Il processo di compressione, infatti, comporta un aumento di calore nel fluido, che dev'essere asportato per aumentarne il rendimento.

Il circuito di raffreddamento è regolato dall'elettrovalvola V5-NC1, normalmente chiusa, ed è misurato nei suoi parametri di portata e temperatura prima di essere inviato al compressore (Essendo un fluido ed arrivando dall'acquedotto non è necessario misurarne il parametro di pressione). Per capire infine quanto calore si è riusciti ad asportare dal sistema, questo viene poi misurato in temperatura anche in uscita.

### 3.2.2.4 Ramo utilities



Dettaglio P&ID – Ramo di immissione alle utenze.

Prima di essere immesso nel sistema, l'idrogeno viene nuovamente misurato nei suoi parametri fondamentali per avere un riscontro effettivo di quanta massa di idrogeno sta venendo immessa nel sistema e la condizione di immissione. Al solito, la portata massica è ottenuta dall'impiego dei tre trasduttori di pressione, temperatura e portata volumetrico. Il misuratore di Coriolis, capace di misurare molteplici parametri simultaneamente quali portata massica e densità del fluido, è impiegato ad ulteriore verifica dei parametri riscontrati.

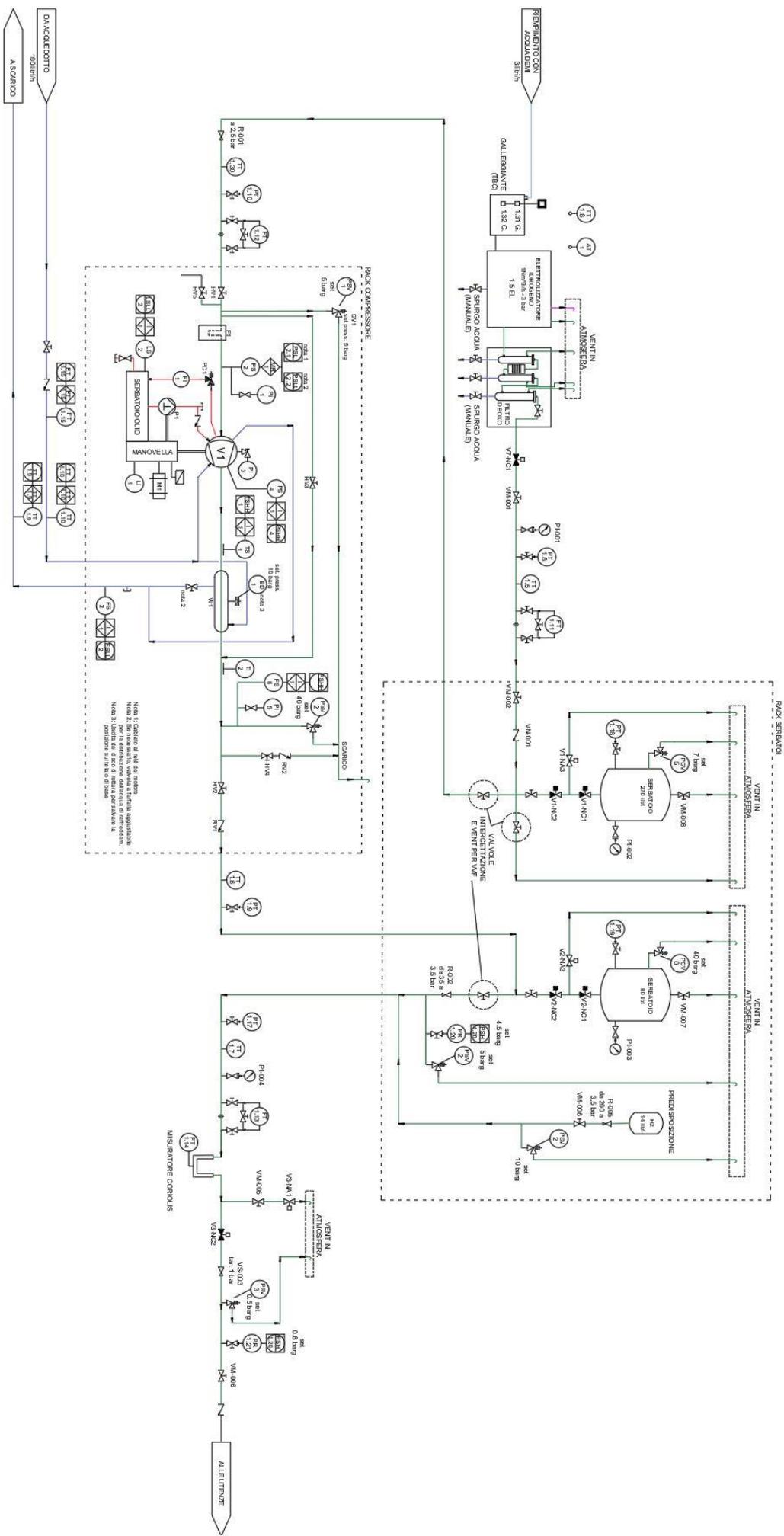
Un manometro è posto sul ramo per garantire una repentina verifica in loco ad un operatore in caso di necessità.

L'immissione dell'idrogeno alle utenze è regolata da un sistema block-and-bleed costituito dall'elettrovalvola normalmente chiusa V3.NC2 e normalmente aperta V3.NA1. Nel caso in cui dovesse verificarsi un'emergenza il fluido nella pipeline verrebbe bloccato dalla prima valvola e potrebbe essere espulso in sicurezza dalla seconda, limitando il rischio di incidenti nel sistema.

Prima dell'immissione nel sistema, l'idrogeno è ulteriormente ridotto ad 1 bar circa. La valvola di sicurezza PSV 3 ed il pressostato PR 1.21 garantiscono, in caso di anomalie di sistema, che le pressioni di ingresso dell'idrogeno nella rete non avvengano a pressioni critiche.

Le valvole manuali VM-009 e VM-005 hanno lo scopo di disaccoppiare la linea per azioni di manutenzione.

La valvola di non ritorno VN-002 è posta per garantire il deflusso del gas in un solo senso.



P&ID completo dell'impianto

### 3.2.3 Input & Output List

La Input & Output list (I/O List) è un documento che contiene la lista degli strumenti di un impianto che interagiscono con il sistema di controllo inviando e ricevendo dati. Solo, quindi gli strumenti che hanno un collegamento diretto, solitamente tramite un cavo, con il sistema di controllo hanno un TAG che compare nella lista [57].

Lo scopo è quello di avere una mappatura che permetta di identificare univocamente le porte di ingresso ed uscita dei diversi strumenti così da non rischiare di confondere i segnali che li caratterizzano.

	Rev	Unità Impianto	Tag	Descrizione	Tipo	Tipo Segnale	Funzione Digitale	Scala Analogi	Unità Ing.	Rack	Slot	Canale
1	EX-CO-00	RACK SERBATOI	V1.NC1	Double Block and bleed - serbatoio di bassa	DO	24Vdc	1= aperta			1	1	0
2	EX-CO-00	RACK SERBATOI	V1.NC2	Double Block and bleed - serbatoio di bassa	DO	24Vdc	1= aperta			1	1	1
3	EX-CO-00	RACK SERBATOI	V1.NA3	Double Block and bleed - serbatoio di bassa	DO	24Vdc	1= chiusa			1	1	2
4	EX-CO-00	RACK SERBATOI	V2.NC1	Double Block and bleed - serbatoio di alta	DO	24Vdc	1= aperta			1	1	3
5	EX-CO-00	RACK SERBATOI	V2.NC2	Double Block and bleed - serbatoio di alta	DO	24Vdc	1= aperta			1	1	4
6	EX-CO-00	RACK SERBATOI	V2.NA3	Double Block and bleed - serbatoio di alta	DO	24Vdc	1= chiusa			1	1	5
7	EX-CO-00	SKID ELETTROLIZZATORE (*)	V3.NA1	Intercettazione utilizzatori	DO	24Vdc	1= chiusa			1	1	6
8	EX-CO-00	SKID ELETTROLIZZATORE (*)	V3.NC2	Vent all'esterno dello skid	DO	24Vdc	1= aperta			1	1	7
9	EX-CO-00	SKID ELETTROLIZZATORE	V7.NC1	Intercettazione mandata di idrogeno da elettrolizzatore	DO	24Vdc	1= aperta			1	1	8
10	EX-CO-00	Da barriera sicurezza intrinseca	120.PR	Pressostato pressione serbatoio di alta	DO	24Vdc	1= Allarme			1	1	9
11	EX-CO-00	Da barriera sicurezza intrinseca	121.PR	Pressostato pressione agli utilizzatori	DO	24Vdc	1= Allarme			1	1	10

Dettaglio I/O list dell'impianto

La I/O list riporta le seguenti informazioni:

- Numero del TAG
- Revisione
- Unità impianto in cui è installato lo strumento
- TAG identificativo dello strumento
- Descrizione dell'elemento
- Tipologia (A = Analogico, D = Digitale, I = Input, O = Output)
- Tipo segnale (24V dc per strumenti a solo azionamento, 4÷20 mA per i trasduttori di misura)
- Funzione digitale (Definisce l'azione che gli strumenti ad azionamento adottano nel momento in cui ricevono il segnale. Ad esempio un'elettrovalvola Normalmente Chiusa si aprirà nel momento in cui riceve segnale)
- Scala analogica (Nei trasduttori va a determinare il LRL – Lower Range Limit, e l'URL – Upper Range Limit, entro il quale lo strumento misura).
- Unità Ing. (Definisce l'unità di misura del range di misura su cui il trasduttore opera).
- Rack (Per impianti di grandi dimensioni è possibile avere più rack di PLC (Programmable logic controller))
- Slot ( Ogni slot possiede solitamente 15 canali per organizzare le connessioni Input, Output dei segnali)
- Canale ( è la porta attraverso cui viene la connessione cavo tra PLC e strumentazione)

### 3.2.4 Analisi del circuito elettrico e del quadro elettrico del compressore.

Questo capitolo riporta l'analisi fatta al circuito elettrico che regola il funzionamento del compressore.

Prima di iniziare è bene analizzare il processo di avviamento del compressore, eseguito da un operatore, ed i criteri di funzionamento ed arresto del modulo, forniti dal produttore.

Il rack compressore è monitorato costantemente nel suo funzionamento. Se uno dei segnalatori, atti a misurare i parametri di funzionamento, dovesse segnalare che uno dei valori di soglia viene superato, questo causerebbe l'arresto del compressore ed altri protocolli finalizzati alla messa in sicurezza dell'impianto.

Lista della strumentazione impiegata nel rack compressore e dei valori di soglia		
Descrizione	TAG	Valori di soglia
Pressione all'aspirazione bassa	PSL 2.1	1 bar g
Pressione all'aspirazione troppo bassa	PSLL 2.2	0,5 bar g
Pressione all'uscita troppo elevata	PSHH 6	37 bar g
Temperatura del gas in uscita troppo elevata	TSHH 1	200°C
Rottura del diaframma	PSHH 4	5 bar g
Livello dell'olio di lubrificazione troppo basso	LSHH 2	Fissato
Portata acqua di raffreddamento bassa	FSL 2	0,1 m <sup>3</sup> /h

I possibili segnali di malfunzionamento sono i seguenti, vengono segnalati da una luce rossa comune e da una descrizione identificativa alpha-numerica sul pannello di controllo posto sul quadro elettrico del compressore.

Descrizione	TAG	Criterio			
Pressione all'aspirazione bassa	PSL 2.1	X	X	X	X
Pressione all'aspirazione troppo bassa	PSLL 2.2	X	X	X	X
Pressione all'uscita troppo elevata	PSHH 6	X	X	X	
Rottura del diaframma	PSHH 4	X	X	X	
Temperatura del gas in uscita troppo elevata	TSHH 1	X		X	
Portata acqua di raffreddamento bassa**	FSL 2	X	X	X	
Livello dell'olio di lubrificazione troppo basso	LSLL 2	X	X	X	
Motore principale in sovraccarico	M 1	X	X	X	
Ad uno dei segnali, il compressore deve essere fermato.					
Ad uno dei segnali, il motore del compressore deve essere bloccato.					
Indicazione di allarme al display alpha-numerico.					
All'avvio viene escluso per un intervallo di tempo prima della sua messa in funzione.					

\*Gli interblocchi possono essere rilasciati solo da un'azione manuale. Dopo lo sblocco, il compressore può essere ri-avviato in loco o da un dispositivo di controllo, se non ci sono ulteriori malfunzionamenti.

\*\* Il segnale è ritardato di 30 sec

I segnali di impianto operativo sono i seguenti e sono indicati da una spia di colore verde:

- Motore in movimento M1 ON
- Compressore Segnale di compressore in funzione (La luce lampeggia quando il compressore è pronto per lo start)

Per l'avvio dell'impianto le valvole manuali devono essere posizionate nelle seguenti posizioni preliminari:

		Valvole automatiche senza corrente		Valvole manuali	
Descrizione	TAG-No	OPEN (NO)	CLOSED (NC)	OPEN	CLOSED
Valvola all'aspirazione	HV 1				X
Valvola allo scarico	HV 2				X
Valvola di de-compressione	HV 4			X	
Valvola di intercettazione bypass	HV 3				X
Valvola di spurgo	HV 5				X
Manometro di intercettazione				X	

Il compressore sarà iniziato dal tasto "START". L'azionamento del sistema è possibile solo se non sono segnalati malfunzionamenti (criteri di stop, sopra elencati)

#### Lo start del compressore deve avvenire ad una temperatura dell'olio > 5°C

Sequenza di start			
	Passaggi che l'operatore deve eseguire	TAG-No.	Controllo della funzione
1	Azionare il circuito dell'acqua di raffreddamento		
2	Chiudere valvola di decompressione	HV 4	
3	Aprire valvola di bypass	HV 3	
4	Premere il pulsante START		T = 0 sec.
		PSL 2.1	I due pressostati indicati vengono Esclusi per i primi 3 minuti* Motore compressore ON
		PSLL 2.2	
		M 1	
	Aspettare circa 2 minuti** fino a che non è raggiunta la pressione dell'olio nelle teste del diaframma (vedere marchio su PI4/PI6)		
5	Aprire valvola di aspirazione	HV 1	
6	Aprire valvola di scarico	HV 2	
7	Chiudere valvola di bypass	HV 3	

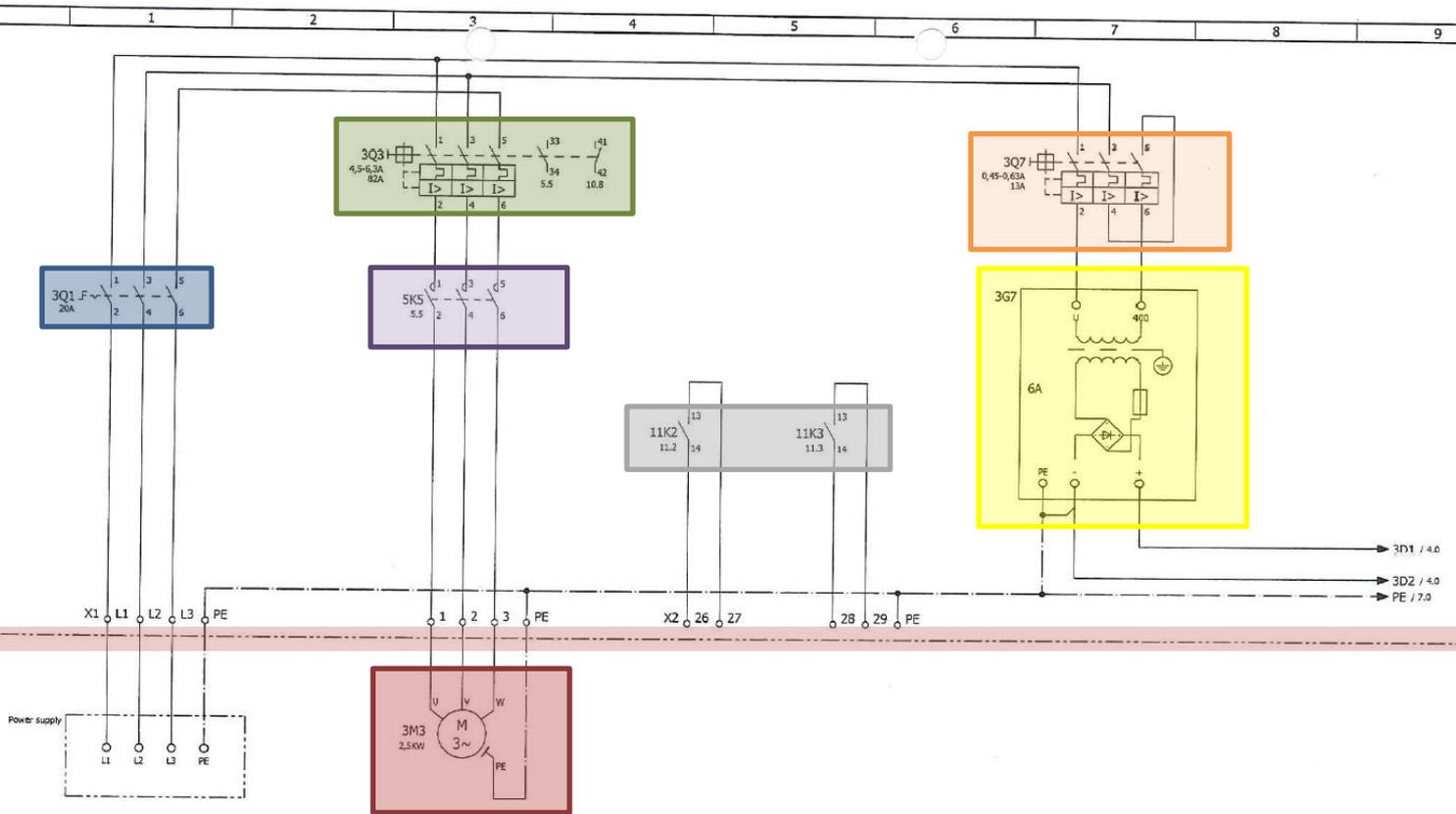
\*La ragione sarà spiegata in seguito.

\*\* In dipendenza del tempo in cui la macchina è stata ferma, la pressione dell'olio nelle teste del diagramma sarà raggiunta in pochi secondi o in minuti. Il tempo sopra indicato deve essere ridimensionato, se necessario, in accordo all'esperienza pratica acquisita sull'impianto.

L'arresto del compressore verrà attivato dal pulsante "STOP" e richiederà le seguenti operazioni

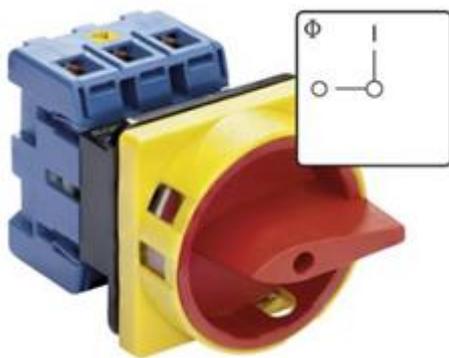
Sequenza di stop			
	Passaggi che l'operatore deve eseguire	TAG-No.	Controllo della funzione
1	Premere il pulsante STOP	M 1	Portare il motore in OFF
2	Aprire la valvola di decompressione	HV 4	
	Aspettare fino a che il compressore non smette di ruotare		
3	Chiudere valvola di scarico	HV 2	
4	Chiudere valvola di aspirazione	HV 1	
5	Aprire la valvola di bypass	HV 3	
	Aspettare circa 2 minuti		
6	Chiudere valvola di bypass	HV 3	

### 3.2.4.1 Analisi nel dettaglio



Schema circuito elettrico compressore – Pagina 3/12 (Le prime due pagine presentano titolo e legenda)

La corrente trifase, più messa a terra (PE, protective earth), arriva all’impianto dal “Power Supply” (foglio 3.0). Questa entra all’interno del quadro elettrico del compressore (il limite del quadro elettrico è segnato dalla linea tratteggiato doppio punto evidenziata in rosso) e passa per l’interruttore principale **3Q1**, un sezionatore con barra di chiusura.



#### Sezionatore **3Q1**.

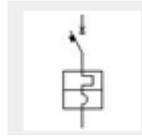
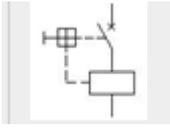
Ha lo scopo di attivare o disattivare l’alimentazione di tutto l’impianto. Le posizioni che può assumere sono due:

Corrente alimenta l’impianto (I)

L’impianto non riceve alimentazione (O)

Passato il sezionatore la linea si dirama, verso il **motore** ed il **trasformatore**.

Verso il motore si intercetta l’elemento **3Q3** che consiste in un interruttore magnetotermico di potenza 4,5-6,3A, più uno switch ausiliario NO +NC montato lateralmente.



La rappresentazione segue la direttiva fornita dal IEC 60617 [58] (International Electrotechnical Commission) di cui un dettaglio è mostrato in figura.

**Figura [26]** – Descrizione: con protezione di corrente a sinistra, interruttore/sezionatore magnetotermico a destra



**Descrizione:** Interruttore per protezione motore. Valore di intervento sganciatore di sovraccarico dipendente dalla corrente 4.5 – 6.3 A.  
Protezione da cortocircuito termomagnetico

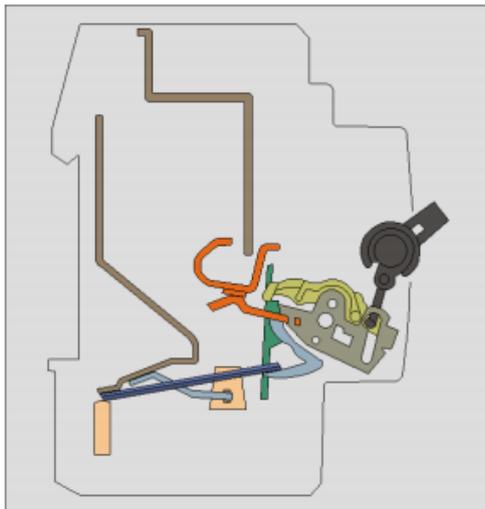


**Descrizione:** Blocchetto di contatti ausiliari montabile lateralmente (1 contatto Normalmente aperto (NO) ed 1 normalmente chiuso (NC))

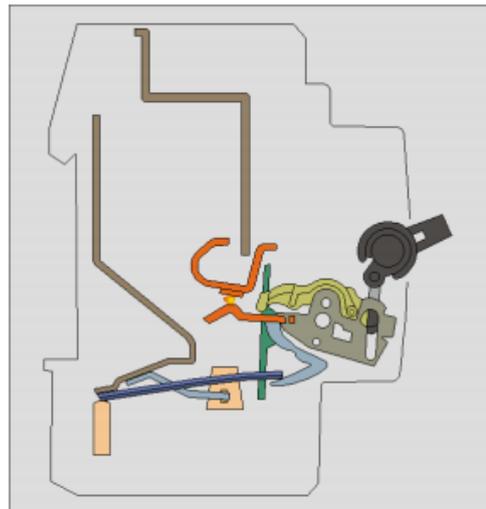
Elemento **3Q3** nel dettaglio.

#### *Principio di funzionamento di un interruttore magnetotermico:*

Il magnetotermico è un dispositivo automatico in grado di stabilire, portare e interrompere tutte le correnti, comprese quelle di cortocircuito, per le quali è stato progettato. L'apertura automatica del circuito è determinata dall'azione di due dispositivi di sgancio, uno magnetico ed uno termico, che intervengono quando sono sottoposti ad una sovracorrente. La parte del meccanismo che dipende dalla temperatura è composta da un bimetallo, con metalli aventi un diverso valore del coefficiente di dilatazione termico. La bilamina è interessata, direttamente o indirettamente, dalla corrente che circola nel circuito da proteggere. All'aumentare della corrente il calore sviluppato per effetto Joule provoca un aumento della temperatura della bilamina con conseguente dilatazione, ma il diverso coefficiente di dilatazione determina un allungamento diverso delle due lamine e quindi la lenta deformazione delle stesse. La deformazione viene sfruttata per sganciare un arpionismo che rilascia una molla, precedentemente caricata con la chiusura manuale dell'interruttore, provocando l'apertura dei contatti dell'interruttore. La reazione alle correnti di sovraccarico avviene con un certo ritardo rispetto all'insorgenza della sovracorrente. Il meccanismo di intervento magnetico consiste in una bobina magnetica e armatura a cerniera ("plunger"). Le correnti che superano la corrente nominale del dispositivo di protezione generano nella bobina un campo magnetico. Al crescere della corrente il campo magnetico si intensifica ed esercita una forza di attrazione sull'ancora di materiale ferromagnetico. Quando il valore soglia viene superato l'ancora aziona il meccanismo di intervento e il dispositivo di protezione si attiva. La reazione alle correnti di cortocircuito e alle correnti di sovraccarico avviene nell'arco di tre fino a cinque millisecondi [59].

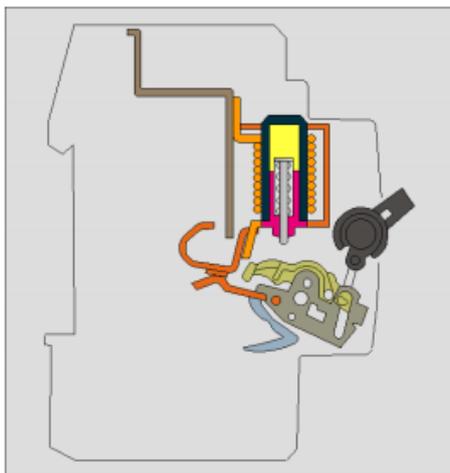


a) Condizioni di normale funzionamento

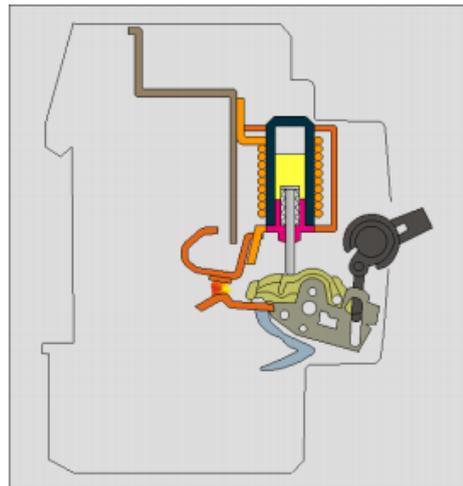


b) Condizione di sovraccarico

In caso di sovraccarico si ha la lenta deformazione della lamina bimetallica che provoca l'apertura dei contatti dell'interruttore



a) Condizioni di normale funzionamento



b) Condizione di cortocircuito

In caso di cortocircuito interviene in tempi brevissimi lo sganciatore magnetico

**Figura [27]** – Funzionamento di un interruttore magnetotermico

Da notare che l'elemento **3Q3** non solo regola la transizione di corrente verso il motore, ma anche due switch, collocati rispettivamente a 5.5 e a 10.8 che regolano il passaggio di corrente rispettivamente al relay **5K5** che governa l'omonimo contattore **5K5** [59], mostrato in figura (foglio 3.3 evidenziato in **viola**), e di un protocollo gestito dalla CPU (protocollo gestito dalla porta E 2.7) per l'arresto del sistema dovuto a sovraccarico del motore.

Da notare che nel momento in cui l'elemento **3Q3** si chiude, si chiudono ed aprono rispettivamente gli switch situati in (foglio 5.5) e (foglio 10.8).



Dettaglio 5K5

**Descrizione:** Contattore di potenza AC-3 9A, 4kW/400 V 24V DC 3 poli per la potenza più 2 normalmente aperti e 2 normalmente chiusi.

Il relay governa 2 canali principali, uno per l'alta tensione a 400 V, a corrente alternata (AC), che può sopportare correnti a 9A e 4kW di potenza, ed uno a basse tensioni, 24 V in corrente continua (DC) che gestisce due contatti NO e 2 NC. I contatti di potenza sono situati a (foglio 3.3) mentre dei contatti NO e NC solo 1 per tipologia sono utilizzati e si trovano rispettivamente in (foglio 3.4) e (foglio 9.3). Il funzionamento di quest'ultimi verrà enunciato in seguito.

Il secondo ramo prosegue verso l'elemento 3Q7, come l'elemento 3Q3 anche questo risulta essere un interruttore di potenza, in questo caso, verso il trasformatore.

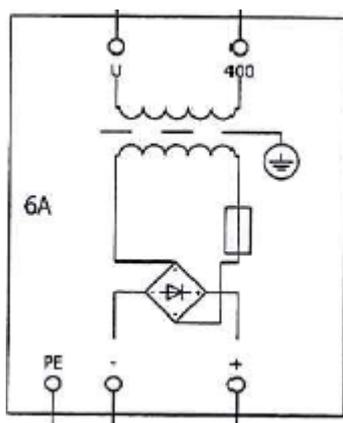
Il commutatore 3G7 converte la corrente alternata trifase in corrente continua monofase a 24V e 6A che alimenta la strumentazione del rack compressore.



Dettaglio 3G7

**Descrizione:** Alimentatore a commutazione, 24V, 6A .

Lo strumento riceve corrente in alta tensione alternata e la converte a tensione a 24V in continua (più precisamente in corrente pulsante). Questo avviene grazie all'ausilio di un ponte raddrizzatore.



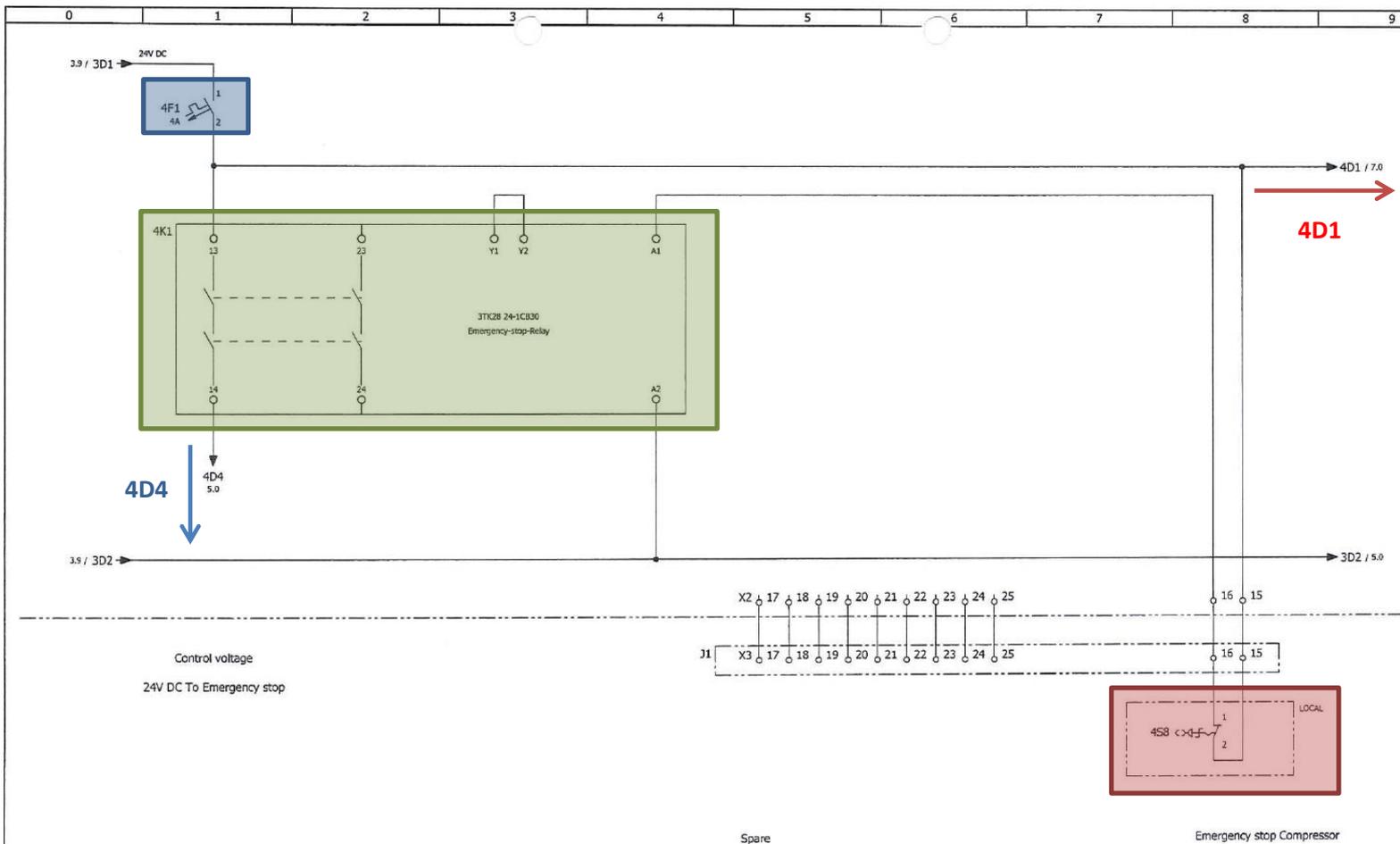
Dettaglio schema 3G7

**Descrizione dello schema di funzionamento Trasformatore con presa centrale e due diodi:**

I due diodi sono collegati ai capi del trasformatore in modo da far passare la corrente nella stessa direzione ( in figura la corrente può raggiungere i diodi o dal polo posto in alto, o da quello posto in basso del rombo. Entrambe le correnti entranti escono dal polo di destra indicato dalla freccia), mentre la presa centrale funge da massa a terra [60]. Il rettangolo che si intercetta sulla linea è un fusibile per preservare lo strumento in caso di sovracorrenti. Le correnti in uscita sono 3D1, a 24 V, al polo positivo, e 3D2 a 0V al polo negativo, che costituiscono l'andata e ritorno del circuito.

Gli interruttori 11K2 e 11K3 sono gestiti dalla centralina e non presentano uno specifico impiego nell'impianto.

Sono stati probabilmente inseriti per possibili ampliamenti o serializzazione dell'impianto.



Schema circuito elettrico compressore – Pagina 4/12

La corrente che abbandona il commutatore 3G7 è ora continua a 24V, e può alimentare la parte di strumentazione dell'impianto.

Questa è governata dall'elemento 4F1, un interruttore magnetotermico che ha lo scopo di proteggere il circuito a valle da sovracorrenti (aumento della portata di corrente superiore a quella prevista dal cavo, con conseguente repentino deterioramento delle caratteristiche meccaniche e dielettriche del filo, nonché un danneggiamento del carico[59].) e cortocircuiti (Riduzione parziale o totale della resistenza, o dell'impedenza, di un tratto di circuito elettrico, dovuta a un contatto diretto fra i suoi estremi: può avere conseguenze dannose per l'eccessivo riscaldamento che ne consegue).

La linea prosegue andando ad alimentare un relay che gestisce lo stop di emergenza e si separa nei due rami 4D1 (freccia in rosso 4.9) e 4D4 (freccia in blu 4.1). Lo scopo del relay per lo stop di emergenza è quello di permettere, ad un operatore, di interrompere tempestivamente l'impianto premendo l'apposito interruttore 4S8.

L'elemento 4S8 permette anche il passaggio della corrente diretta ai poli di alimentazione del relay senza la quale questo non si attiverebbe. Una volta attivato, il relay permette il passaggio di corrente verso il ramo 4D4 (ramo in blu 4.1) che andrà ad alimentare tutta la strumentazione dell'impianto.



Dettaglio **4S8**

**Descrizione:**

L'elemento è dotato di chiave di sblocco che chiude il contatto permettendo il passaggio di corrente. Se un qualsiasi evento dovesse richiedere il repentino arresto dell'impianto questo si otterrebbe premendo il pulsante che regola l'apertura dell'alimentazione al relay **4K1**, fornita attraverso i poli A1 e A2 con conseguente diseccitamento e interruzione di corrente verso 4D4.



Dettaglio **4F1**

**Descrizione:**

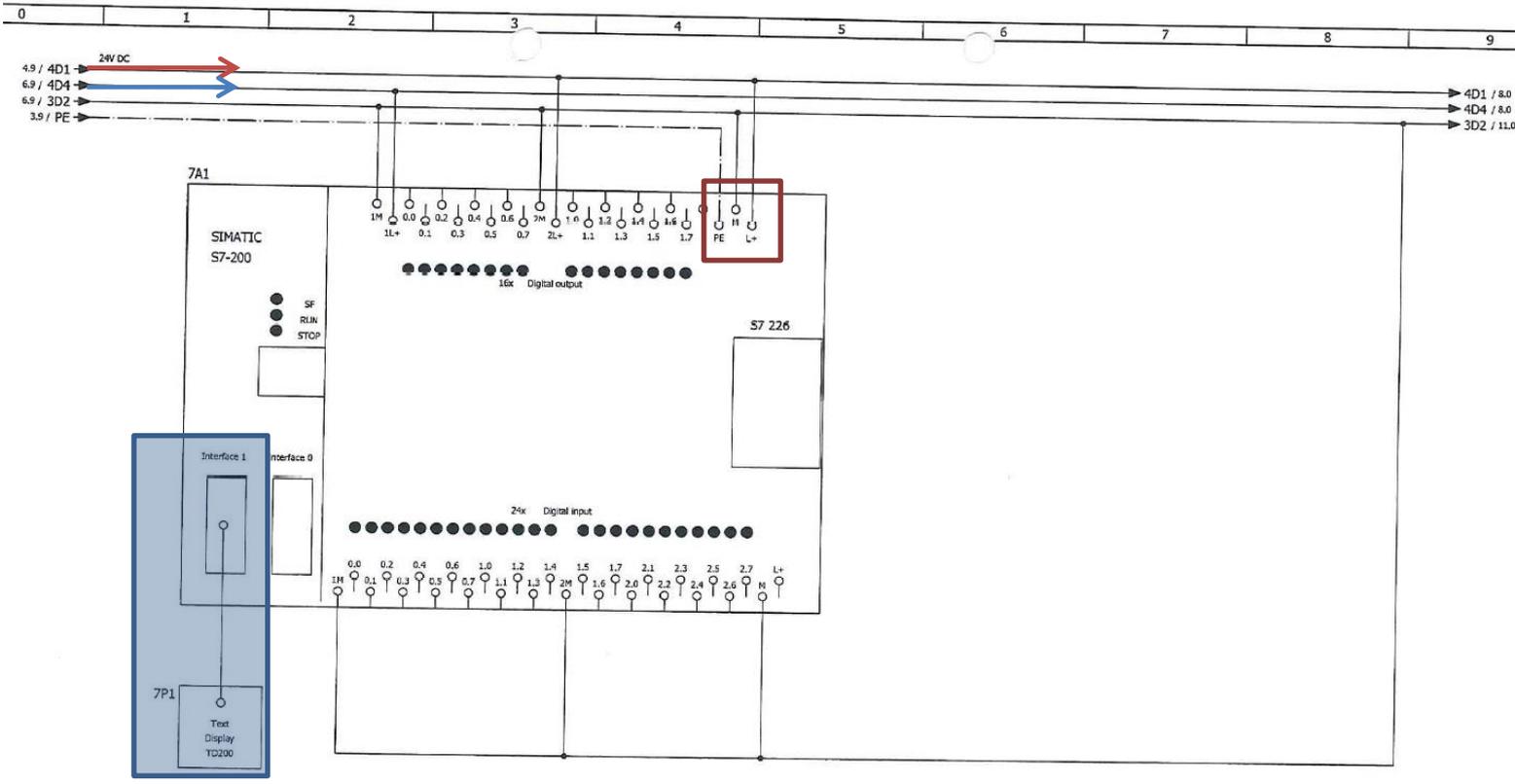
Interruttore magnetotermico ad un polo per protezione impianto da cortocircuiti. Potere di interruzione corrente secondo IEC 60947-2/ valore nominale 6kA



Dettaglio **4S8**

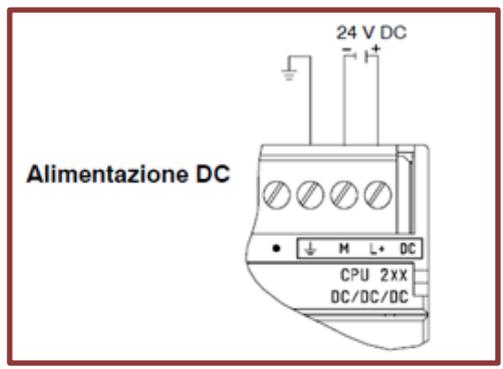
**Descrizione:**

Relè di sicurezza a due contatti di sicurezza, 1 canale 24V .  
Poli A1,A2 per l'alimentazione.  
Una volta alimentato il relè chiude i contatti 13-14 e 23-24 (i contatti 23-24 non sono utilizzati).  
Poli Y1,Y2 vengono utilizzati per l'autoverifica di corretto funzionamento dell'oggetto.



Schema circuito elettrico compressore – Pagina 7/12

Il ramo **4D1**, che non va ad alimentare il relay per lo stop di emergenza, arriva ad alimentare la centralina che gestisce i protocolli del rack.



**Dettaglio dell'alimentazione generale della centralina:**  
L'input di corrente (L+) è fornito dalla linea 4D1, mentre l'output (M, polo comune dell'alimentazione dei sensori) proviene dalla linea 3D2 che termina al trasformatore **3G7** già analizzato. La messa a terra avviene tramite la linea PE.

Figura [28], pag 22

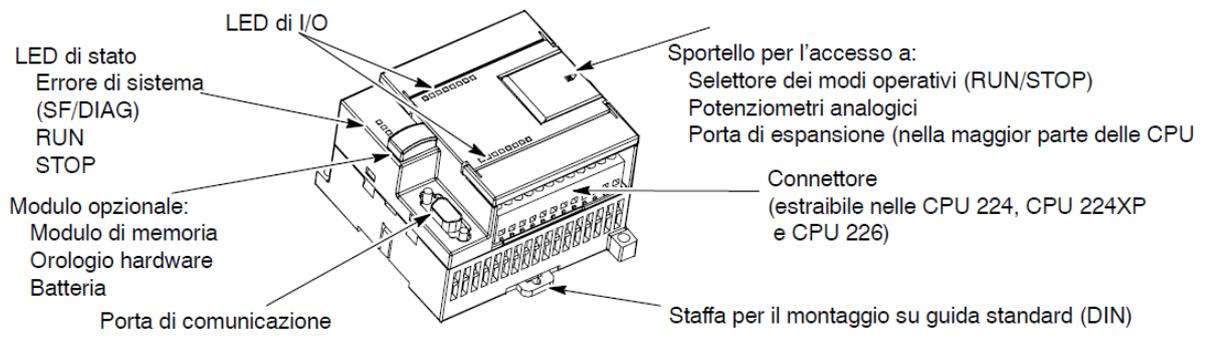
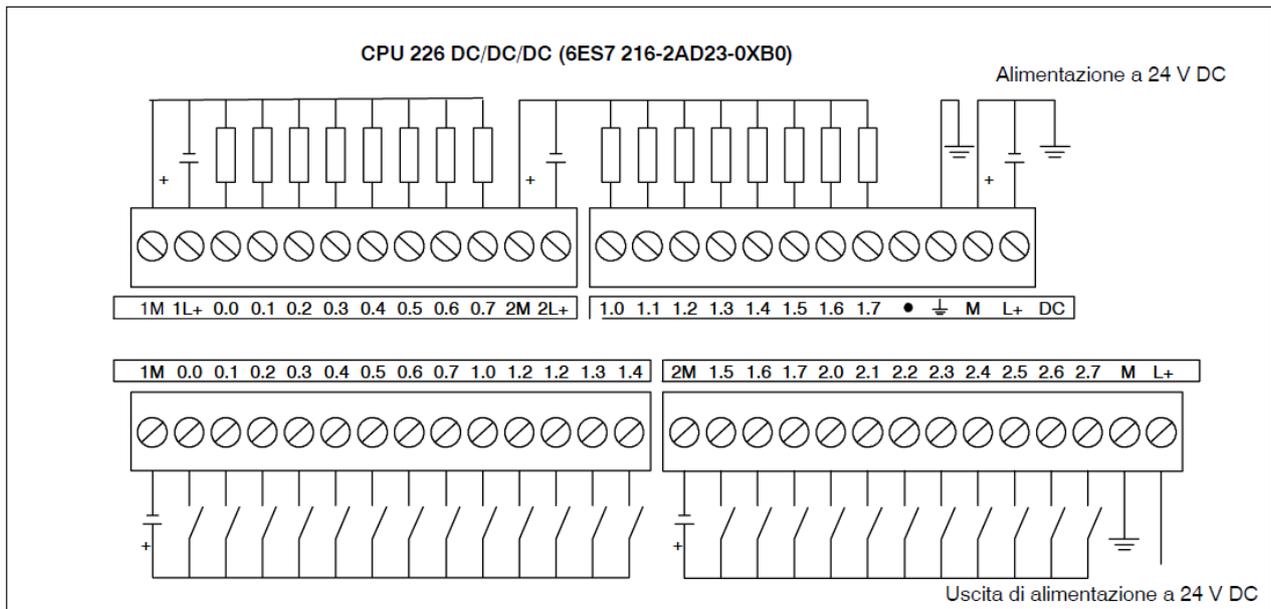


Figura [29] – Principali elementi della CPU.

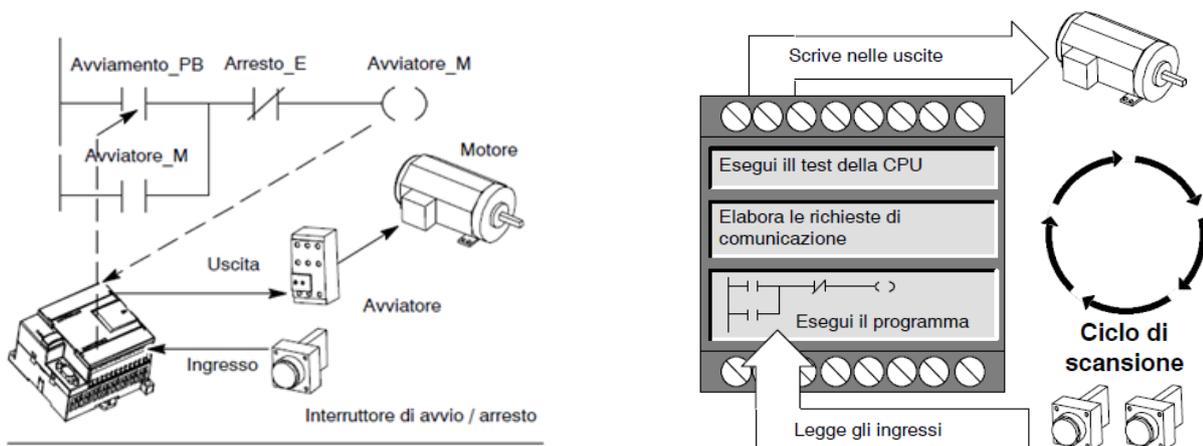
Oltre all'alimentazione generale, la centralina deve essere anche alimentata localmente poiché questa prevede separatori di isolamento in determinati punti per evitare che si formino flussi di corrente indesiderati nell'impianto. Il cablaggio alla centralina dovrà tenere conto di tali limiti di isolamento.

L'isolamento locale avviene, come osservabile nello schema del circuito elettrico del compressore sopra riportato, con la connessione degli ingressi 1L+, 2L+ e dei poli comune dell'alimentazione dei sensori 1M, 2M. Gli ingressi 1L+ e 2L+ sono alimentati rispettivamente da 4D4 e 4D1, mentre le uscite sono comuni in 3D2.



**Figura [30]** – Schema di funzionamento separatori della CPU.

Il principio di funzionamento della CPU consiste in diversi ingressi interdetti da un interruttore. Gli interruttori sono governati da relay e sensori presenti nel circuito. Nel momento in cui un interruttore (visibili nella parte bassa di Figura [30]) viene chiuso, questo permette il passaggio di corrente verso la centralina alla porta a cui lo switch è collegato (gli input alla centralina sono in basso e gli output in alto). La centralina percepisce quindi l'eccitazione della porta che attiva il protocollo, precedentemente programmato, associato.



**Figura [31]** – Controllo degli ingressi e delle uscite, a sinistra, e ciclo di scansione, a destra.

Il protocollo, che può richiedere anche l'eccitazione su più porte di ingresso per essere attivato, può anche fornire un ritardo programmabile all'eccitazione fornita in output rispetto alla ricezione dell'input di inizializzazione.

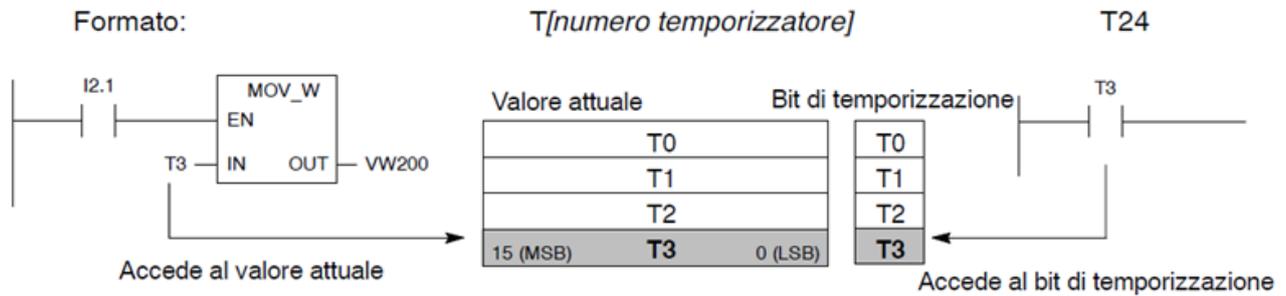
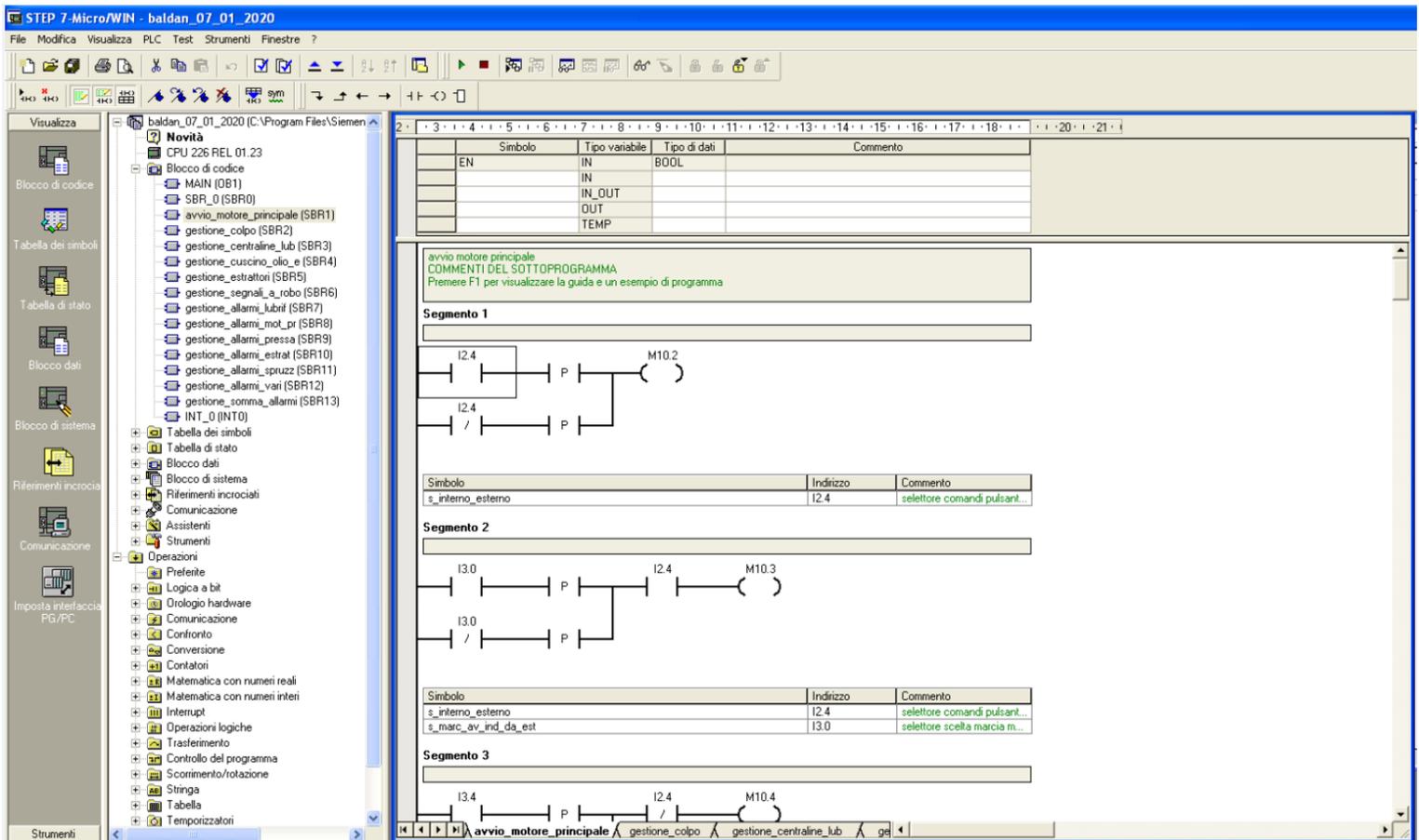


Figura [32] – Accesso al bit di temporizzazione o al valore attuale di un temporizzatore.

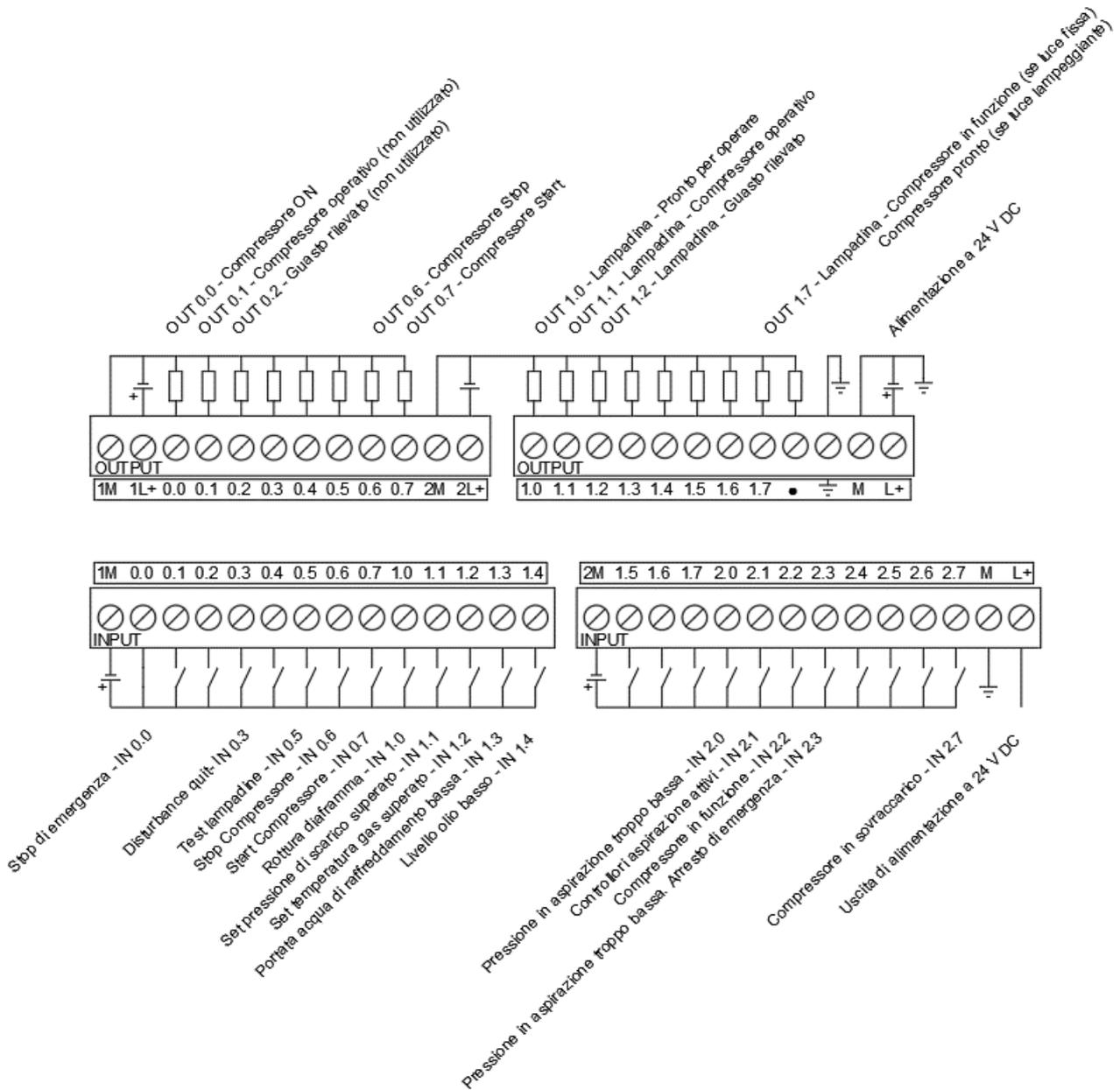
Questo, come visto precedentemente nel protocollo di avvio del compressore, permette di fornire i tre minuti di ritardo nella ricezione di segnale dai due pressostati di bassa e bassissima pressione PSL 2.1 e PSL 2.2 che altrimenti invierebbero segnale di malfunzionamento al compressore non permettendone l'avvio.



Esempio di un protocollo programmato di una CPU S7-200.

Una volta che il protocollo viene eseguito, fornisce come output un'eccitazione ad uno o più degli ingressi ed un segnale verso 7P1, il display dove i possibili messaggi alpha-numeric di failure vengono trasmessi.

L' eccitazione in uscita dalla centralina (nella parte alta, dedicata agli output) va poi a stimolare uno o più dei relay posti sulla linea, che a loro volta vanno a condizionare l'impianto.

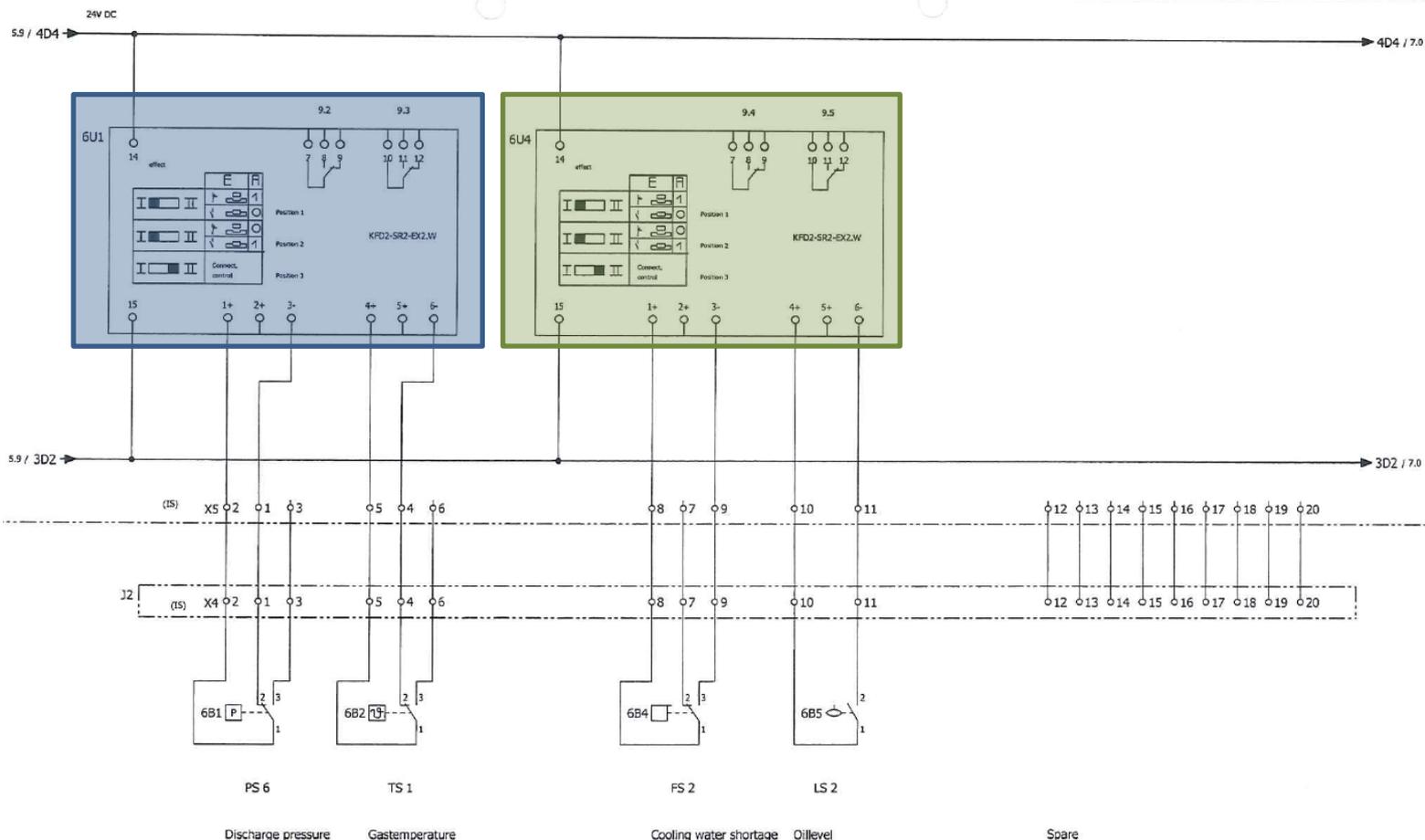


Rappresentazione degli input (in basso) e degli output (in alto) del sistema.

Dopo aver alimentato la centralina, la linea 4D1 va ad alimentare due segnali di input, rispettivamente IN 0.3 (nel documento gli input vengono presentati con la sigla "E" e gli output con "A") e IN 0.5, intercettati entrambi da uno switch, che permette il passaggio del segnale, situato sul coperchio del quadro elettrico assieme al display alpha-numerico che fornisce segnalazioni in caso di guasto, all' interruttore principale del rack compressore ed ai segnali luminosi che descrivono lo stato del sistema.



che esclude i due pressostati di bassa pressione all'aspirazione, PSL 2.1 e PSL 2.2, per i primi tre minuti dall'avvio del motore del compressore (ciò succede a pagina 5/12 e verrà trattato in seguito), l'altra conduce agli elementi **6U1** e **6U4**.



Schema circuito elettrico compressore – Pagina 6/12

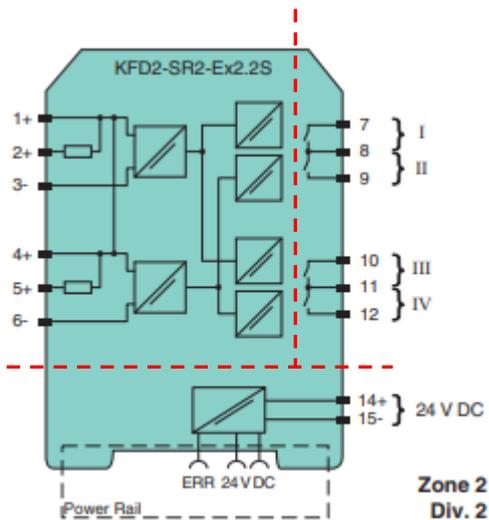


Dettaglio **6U1** e **6U4**

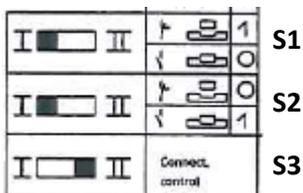
Gli elementi **6U1** e **6U4** vengono comunemente impiegati per applicazioni a sicurezza intrinseca. La caratteristica fondamentale di questi strumenti è l'isolamento galvanico tra le tre diverse aree funzionali: alimentazione, acquisizione di segnale da strumentazione in area pericolosa e invio di segnale al PLC.

L'isolamento galvanico è la condizione per cui tra due punti a differente potenziale elettrico non ha e non può avere luogo una circolazione di corrente continua. Più precisamente, non è possibile lo spostamento dei portatori di carica da un punto all'altro, mentre l'energia elettrica può ancora essere scambiata mediante altri fenomeni fisici come l'induzione elettromagnetica, l'accoppiamento capacitivo, fenomeni ottici, sonori, o meccanici [61].

L'immediato vantaggio di questa caratteristica è che, se per caso l'impianto, posto in area sicura, dovesse essere soggetto ad un sovraccarico, per esempio dovuto ad un fulmine che lo impatta, l'eccesso di corrente non può raggiungere il sensore posto in area pericolosa, prevenendo possibili incidenti.



Dettaglio 6U1 e 6U4  
schema di funzionamento



Le porte 14+ e 15- sono utilizzate per l'alimentazione a 24 V DC. Il segnale, proveniente dalla strumentazione, viene ricevuto come segnale digitale e due diversi strumenti possono essere simultaneamente gestiti. Il primo strumento è collegato ai poli 1+ e 3-, mentre il secondo ai poli 4+ e 6-.

In rosso è evidenziato l'isolamento galvanico prima citato. Questo è superato grazie all'impiego di sensori NAMUR in combinazione con contatti meccanici. Ogni sensore controlla due interruttori normalmente aperti, rispettivamente 7-8, 8-9 il primo e 10-11, 11-12 il secondo. I contatti in output possono essere impostati da "normalmente aperti" a "normalmente chiusi" intervenendo su i due switch S1 ed S2 che regolano, ognuno, una delle due coppie.

Lo switch S3 permette di abilitare o disabilitare l'analisi di guasto sulla linea dei sensori.

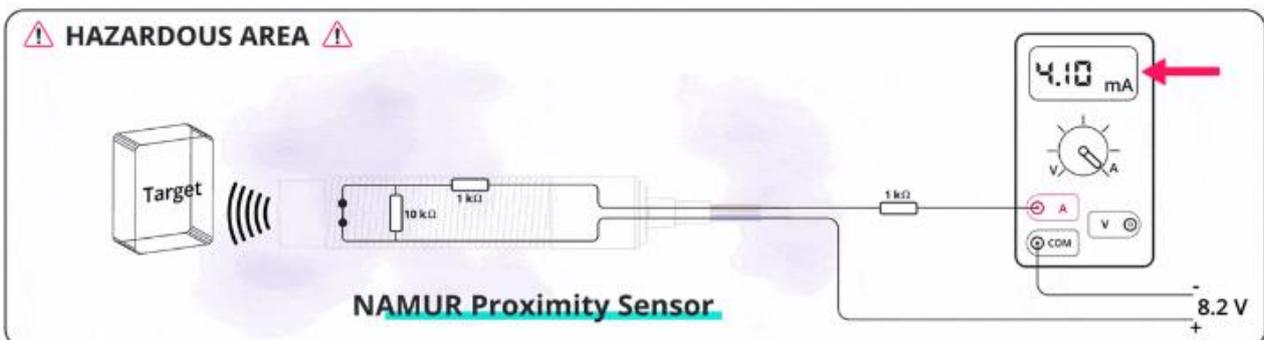
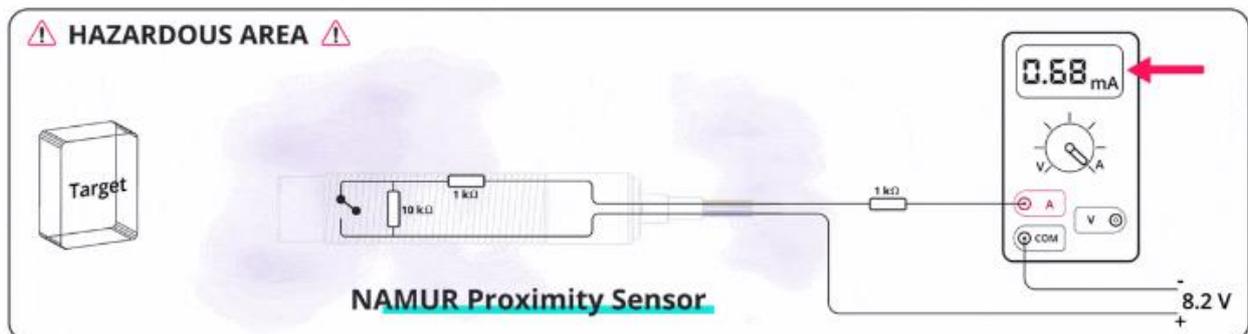
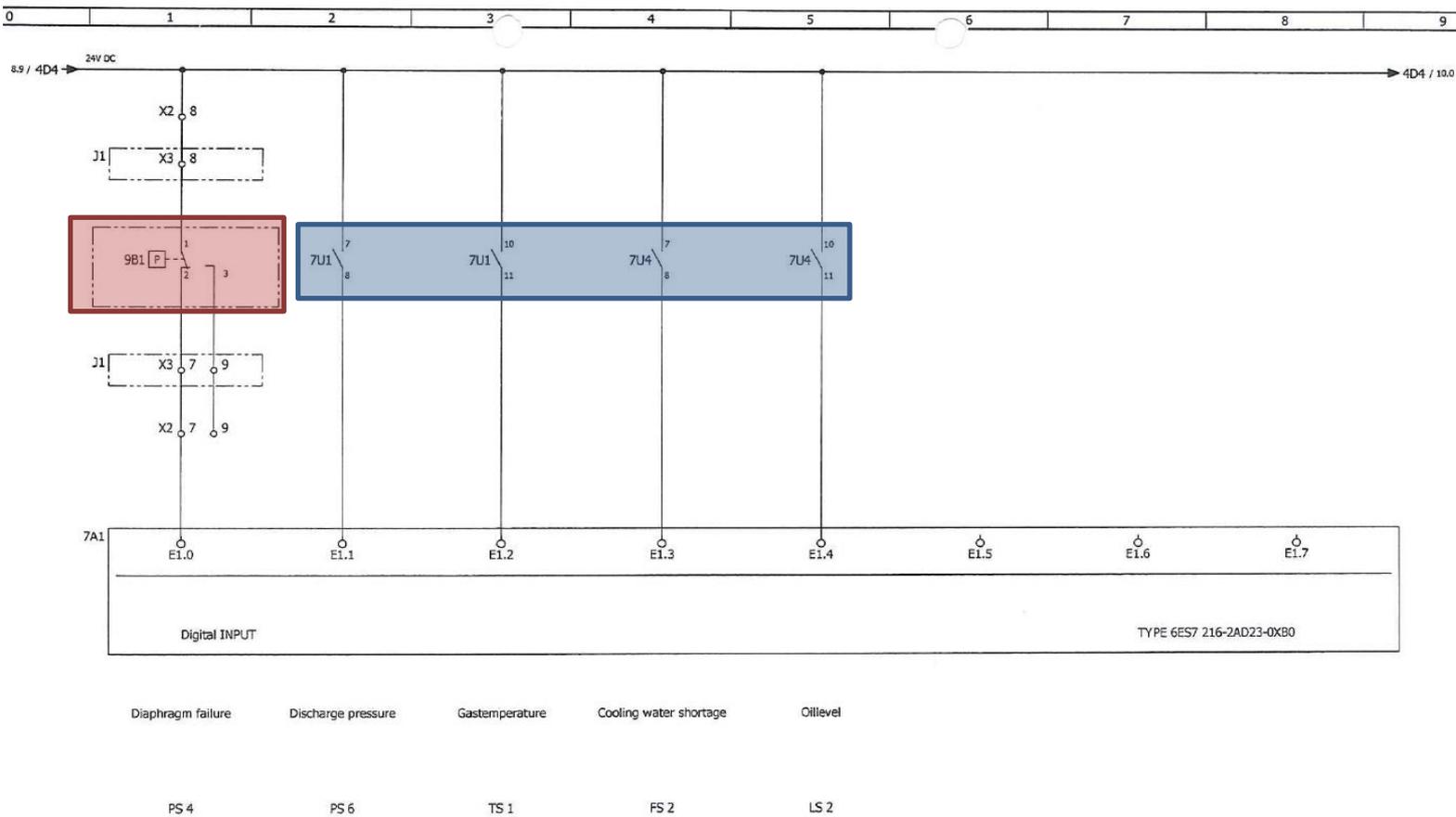


Figura [33] - Principio di funzionamento di un sensore NAMUR

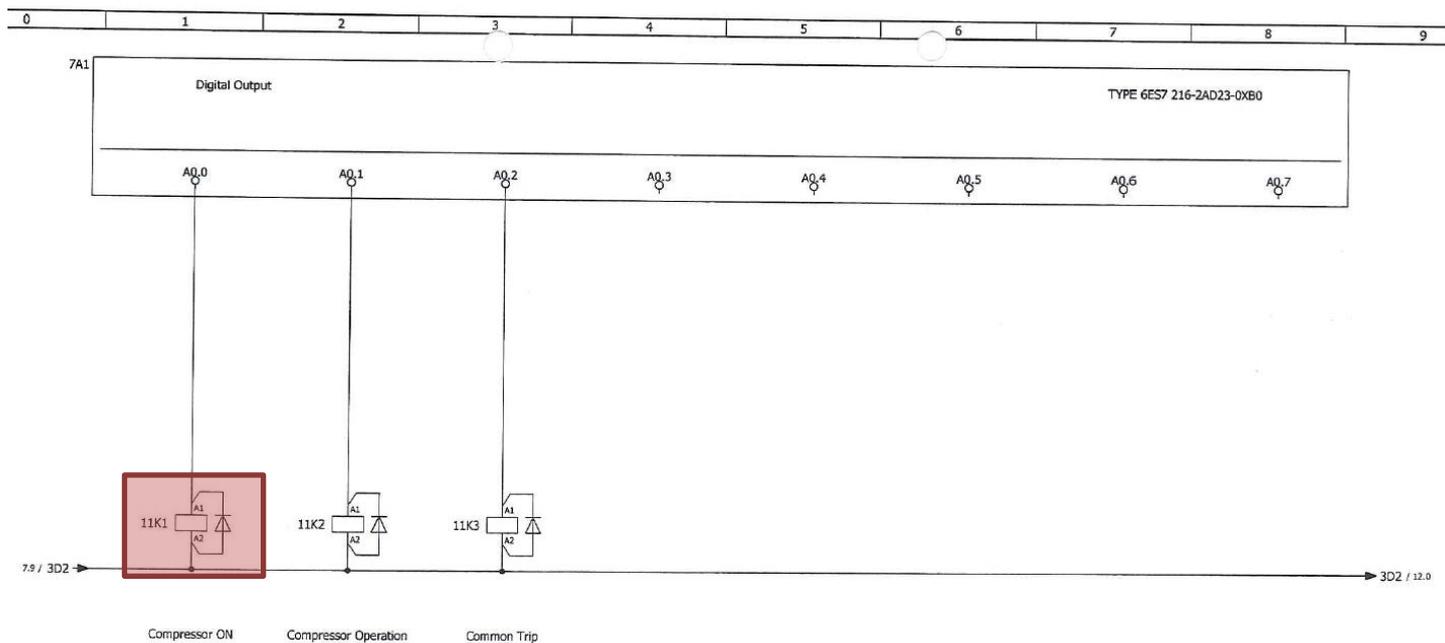
Con l'apertura e la chiusura dell'interruttore si include ed esclude dal circuito la resistenza da 10kΩ che causa una variazione di corrente misurata. L'attivazione dell'interruttore dipende da un target che si avvicina o allontana dal meccanismo. La principale differenza tra un sensore NAMUR rispetto ad uno di prossimità è che qui la corrente non viene interrotta, ma cambia semplicemente la sua intensità [62].



Schema circuito elettrico compressore – Pagina 9/12

Gli output degli strumenti **6U1** e **6U4** attivano gli interruttori **7U1** e **7U4** responsabili di attivare gli ingressi alla centralina IN1.1, IN1.2, IN1.3 e IN1.4 ed i rispettivi protocolli.

L'elemento **9B1** risulta essere il sensore responsabile del monitoraggio dello stato del diaframma e del rispettivo protocollo di arresto della macchina inizializzato dalla porta IN1.0.

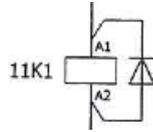


Schema circuito elettrico compressore – Pagina 11/12

Passati tre minuti da quanto è stato premuto il pulsante di START del compressore **8S8** (pagina 8.8) i pressostati di bassa e di bassissima pressione all'assorbimento, PSL 2.1 e PSL 2.2, vengono inclusi nel sistema. Questo avviene grazie all'output fornito dalla centralina alla porta OUT0.0 che va ad eccitare il relay **11K1** responsabile dell'omonimo interruttore situato a pagina 5.1.



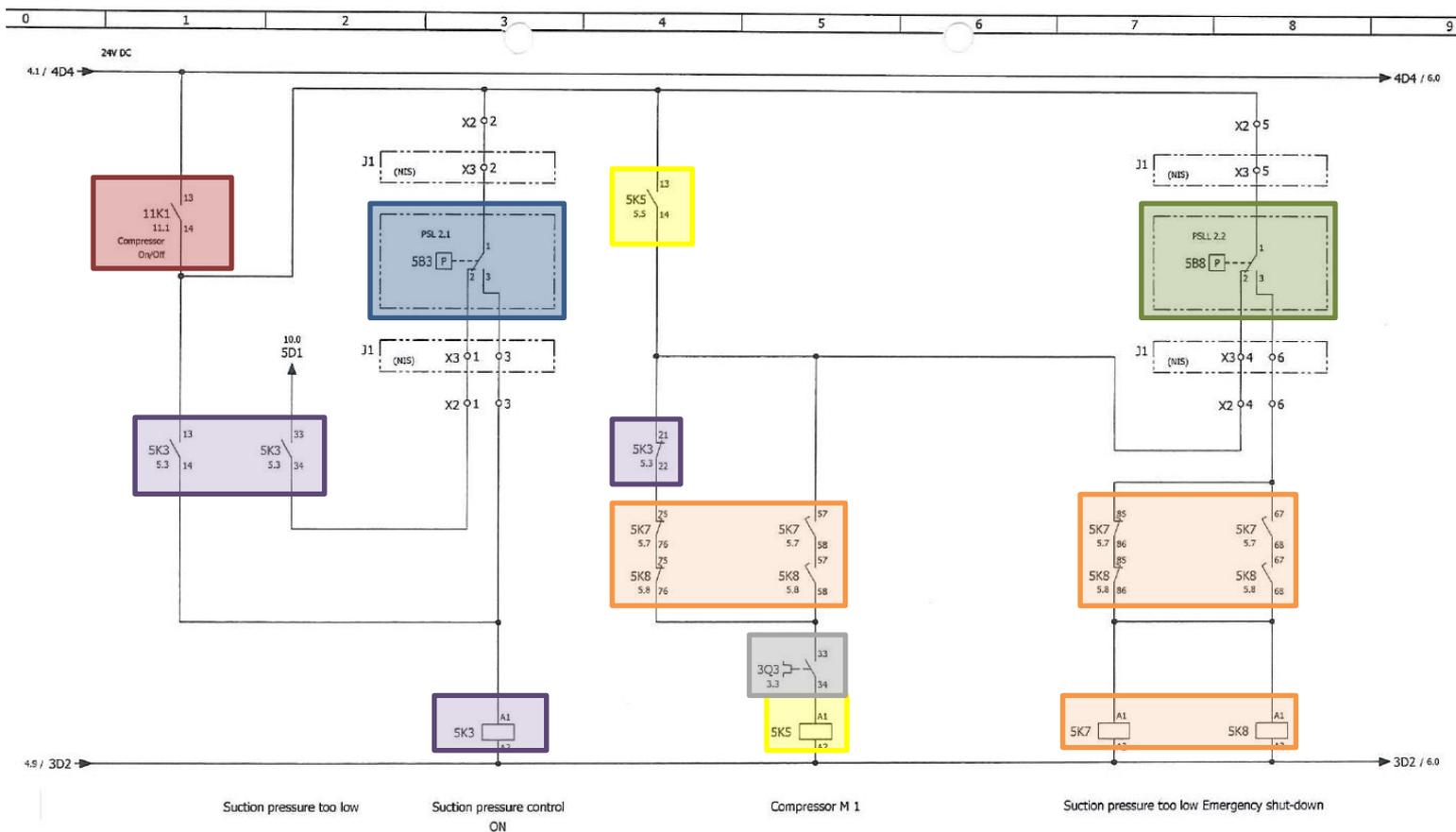
Dettaglio **11K1**



La schematizzazione presentata in figura consiste in un relay, che gestisce un solo contatto NO, posto in parallelo ad uno "snubber", anche detto soppressore. Lo snubber è un circuito elettrico usato per sopprimere i transienti elettrici (un transiente elettrico è un impulso ad alta energia concentrato in un intervallo di tempo che oscilla tra i microsecondi e i nanosecondi che porta all'instabilità e alla compromissione del componente elettronico colpito [63]).

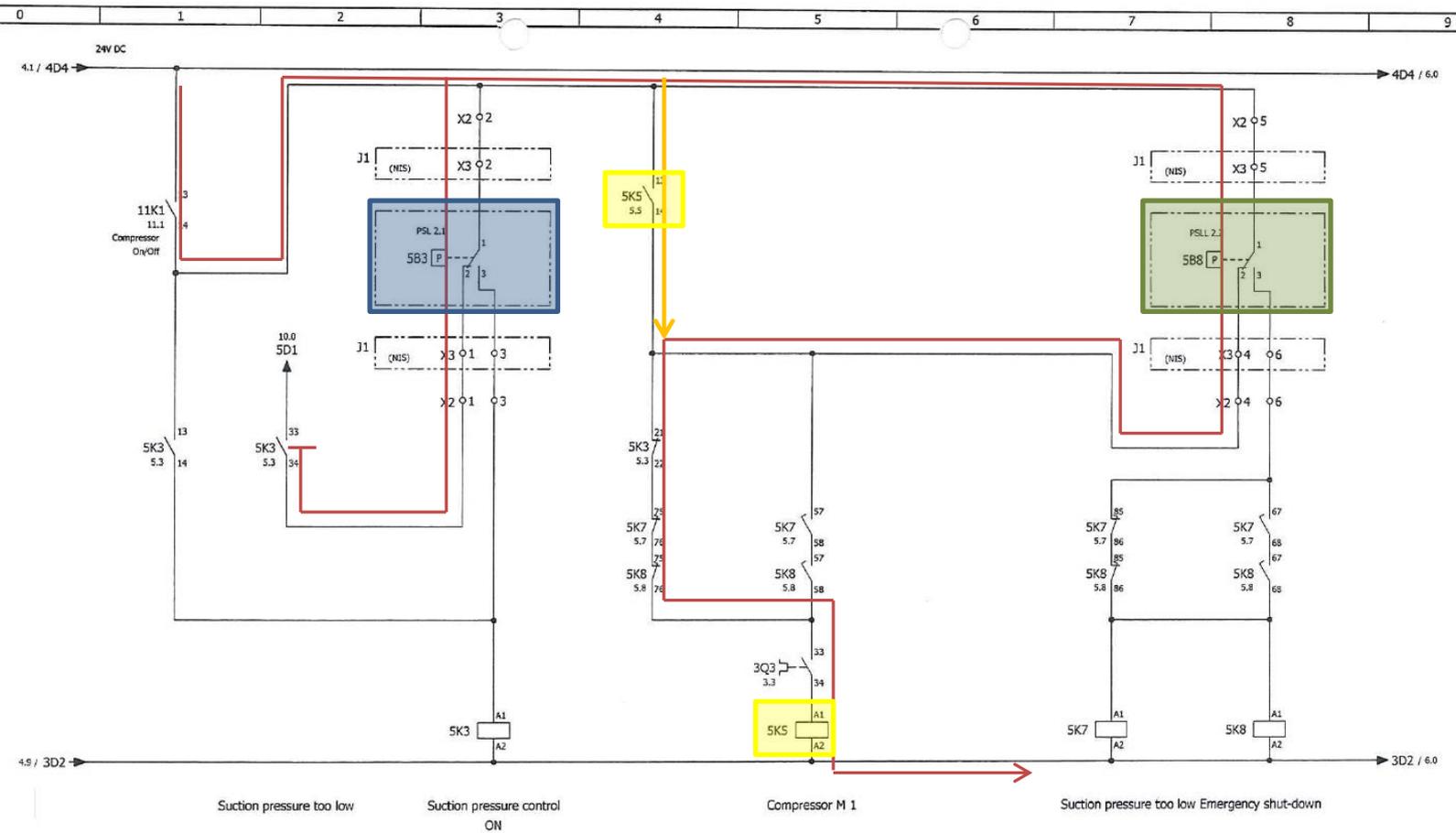
E' solito che in un circuito a corrente continua, come nel nostro caso, lo snubber sia un semplice diodo raddrizzatore disposto in parallelo ad un

carico induttivo (quali una bobina del relay o un motore elettrico). Il diodo è collegato in modo che non conduca quando il carico viene attivato. Quando il carico induttivo viene disattivato rapidamente, si avrebbe un picco di tensione nel senso inverso (l'induttore tenta di mantenere costante la corrente che circola in esso). Questo picco di tensione è conosciuto come "rimbalzo induttivo" [64]. Lo strumento serve quindi per proteggere il dispositivo dall'arco elettrico. E' un accorgimento importante per un interruttore che regola l'accensione e lo spegnimento del compressore in caso di failure del sistema.



Schema circuito elettrico compressore – Pagina 5/12

Una volta che il relay **11K1** viene eccitato, la porzione di circuito che coinvolge i due pressostati **PSL 2.1** e **PSLL 2.2** viene integrata. Essendo la valvola manuale HV1, che regola il passaggio di idrogeno al compressore, ancora chiusa, i due pressostati rilevano valori di pressione all'aspirazione sotto il set point e si posizionano perciò nella configurazione 1-2 (mostrata in figura) di arresto del sistema in condizioni normali. Il transito della corrente nel circuito segue dunque l'andamento presentato in **rosso** figura.



Schema circuito elettrico compressore – Pagina 5/12 – Rappresentazione della corrente nel circuito all'avvio del motore del compressore, prima che la valvola HV 1 sia aperta.

La linea viene interrotta nel ramo che passa attraverso **PSL 2.1**, mentre va ad eccitare il relay **5K5** nel ramo passante per il pressostato **PSLL 2.2**, facendo chiudere lo switch situato in 5.4 e garantendo così un altro circuito di eccitamento per questo relay, ed inoltre permettendo la chiusura dei tre switch per l'alimentazione trifase al motore in 3.3 e l'interruttore posto in 10.3 che controlla l'ingresso alla centralina IN2.2.

5.1	13	—	14	3.3	1	—	2	10.4	13	—	14	10.4	13	—	14
5.4	21	—	22	3.3	3	—	4		23	—	24		23	—	24
5.2	33	—	34	3.3	5	—	6		33	—	34		33	—	34
10.2	43	—	44	5.4	13	—	14		43	—	44		43	—	44
					21	—	22	5.5	57	—	58	5.5	57	—	58
					31	—	32	5.8	67	—	68	5.8	67	—	68
				10.3	43	—	44	5.4	75	—	76	5.4	75	—	76
								5.7	85	—	86	5.7	85	—	86

RELAY 5K3

RELAY 5K5

RELAY 5K7

RELAY 5K8

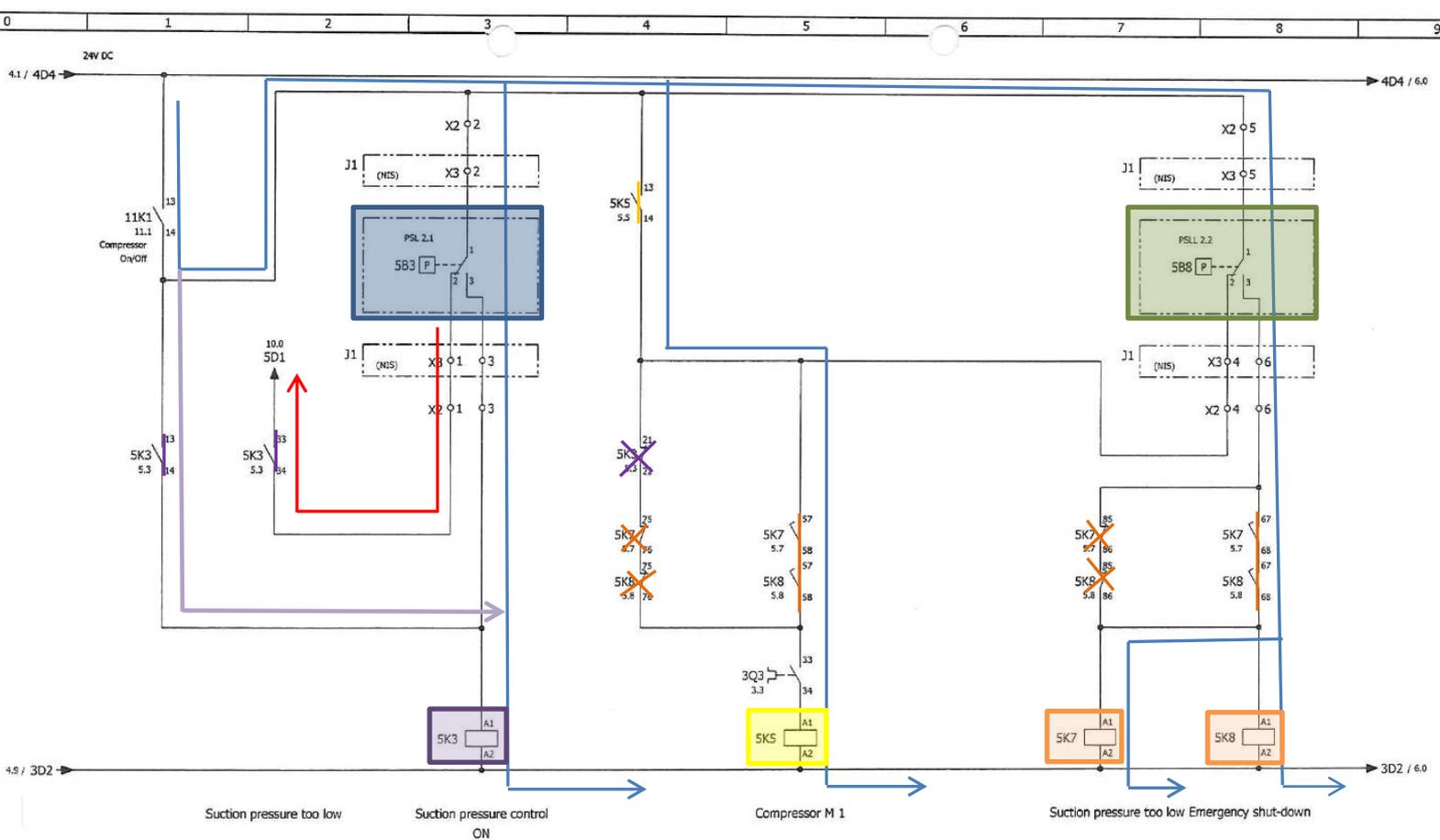
Riassunto degli interruttori gestiti dai diversi relay.

Una volta aperta la valvola HV1, la pressione in aspirazione inizia progressivamente a salire fino a raggiungere e superare i set point dei due pressostati (rispettivamente prima scatterà il pressostato **PSLL 2.2**, con un set point di 0.5 bar g, e poi **PSL 2.1** con un set point di 1 bar g).

Superato il set point di 0.5 bar g, quindi, il pressostato **PSLL 2.2** ecciterà i relay **5K7** e **5K8** che faranno scattare tutti gli interruttori a loro connessi. Da notare che gli interruttori a pagina 5, riferiti a **5K7** e **5K8** hanno una forma differente rispetto agli altri interruttori del sistema poiché questi sono ad apertura ritardata e a chiusura anticipata (altri dettagli verranno forniti in seguito).

Superato poi anche il set point di 1 bar g, anche il relay **5K3** verrà eccitato permettendo l'input alla porta IN2.1 della centralina che segnala l'entrata in funzione dei due pressostati.

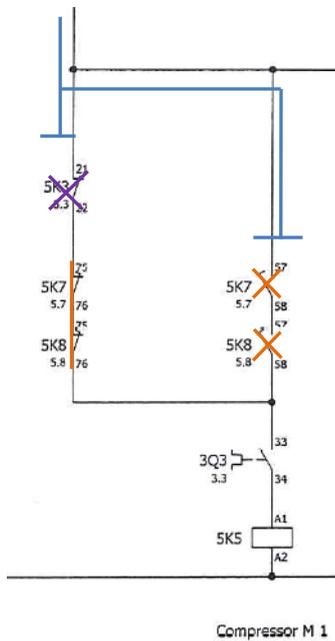
La circolazione della corrente prenderà dunque la seguente conformazione evidenziata in **blu**:



Schema circuito elettrico compressore – Pagina 5/12 – Rappresentazione della corrente nel circuito quando i due pressostati si trovano in condizione operativa (sopra i set point), dopo l'apertura della valvola HV 1.

L'impianto risulta ora essere in completa funzione. Da notare che l'eccitazione del relay **5K3** permette l'auto-ritenuta dello stesso grazie alla chiusura dell'omonimo interruttore ed il passaggio di corrente lungo il ramo evidenziato in **viola**.

Nel caso in cui la pressione all'aspirazione dovesse scendere in una situazione di arresto per il sistema, sotto cioè l'1 bar g di pressione, il pressostato **PSL 2.1** scatterebbe, alimentando il ramo di circuito 5D1, evidenziato in **rosso**, direttamente connesso alla centralina per l'arresto tramite la porta IN2.0.



Se il pressostato **PSL 2.1** non dovesse funzionare correttamente, la pressione continuerebbe a calare fino ad abbassarsi sotto il set point di 0.5 bar g del pressostato **PSLL 2.2** che scattando causerebbe la diseccitazione dei relay **5K7** e **5K8**, con la conseguente inversione degli interruttori connessi.

L'inversione degli interruttori situati sui due rami, in 5.4 e 5.5, presenti in figura, comporta però il blocco della corrente al relay **5K5**, poiché il ramo di sinistra vede un'interruzione della linea causata dall'interruttore **5K3** che risulta ora aperto.



Dettaglio **5k3**

Il relay **5k3** è un comune relay alimentato a 24 V DC dotato di tre contatti istantanei normalmente aperti ed uno normalmente chiuso.

I contatti gestiti dal reay sono i seguenti:

5.1	13	—	14	
5.4	21	—	22	NO – Normalmente aperto (Opened)
5.2	33	—	34	NC – Normalmente chiuso (Closed)
10.2	43	—	44	

La prima colonna indica la posizione, tra le pagine, dove l'interruttore è situato, mentre le altre due colonne indicano le porte a cui quello switch fa riferimento.

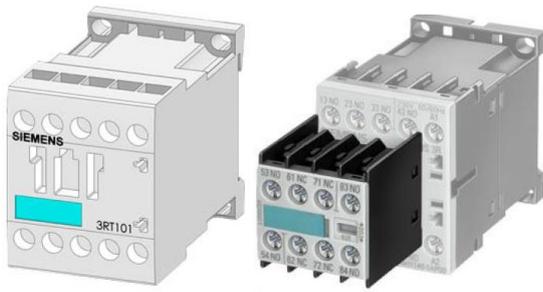


Dettaglio **5k5**

Il relay **5k5** è un relay per la trasmissione di potenza. Presenta infatti 3 poli per il passaggio di correnti ad alta tensione in corrente alternata a 400 V e 9 A. E' dotato, in oltre, di 4 contatti istantanei, due NO e due NC.

I contatti gestiti dal reay sono i seguenti:

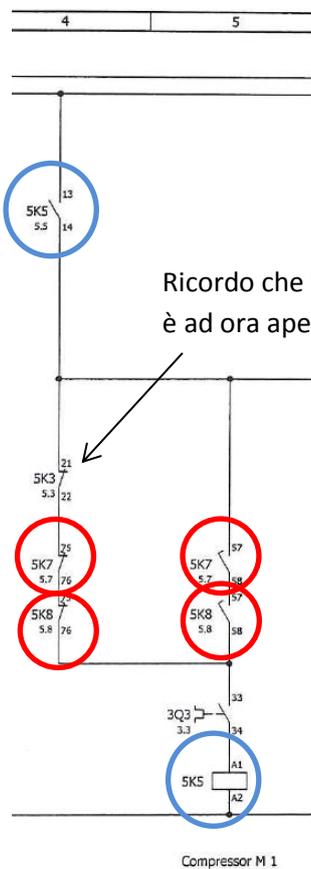
3.3	1	—	2	} Contatti di potenza
3.3	3	—	4	
3.3	5	—	6	
5.4	13	—	14	
	21	—	22	
	31	—	32	
10.3	43	—	44	



Dettaglio **5K7** e **5K8**

I relay **5K7** e **5K8**, che presentano la medesima struttura, sono formati da un modulo principale (immagine di sinistra) ed uno ausiliario (immagine di destra), montati l'uno sull'altro.

L'intero sistema è alimentato da corrente continua a 24 V. Il modulo principale presenta quattro interruttori collegati NO a chiusura istantanea, mentre il modulo ausiliario presenta due interruttori normalente chiusi (NC) ad apertura ritardata (laging switching) e due normalmente aperti (NO) ad apertura anticipata.

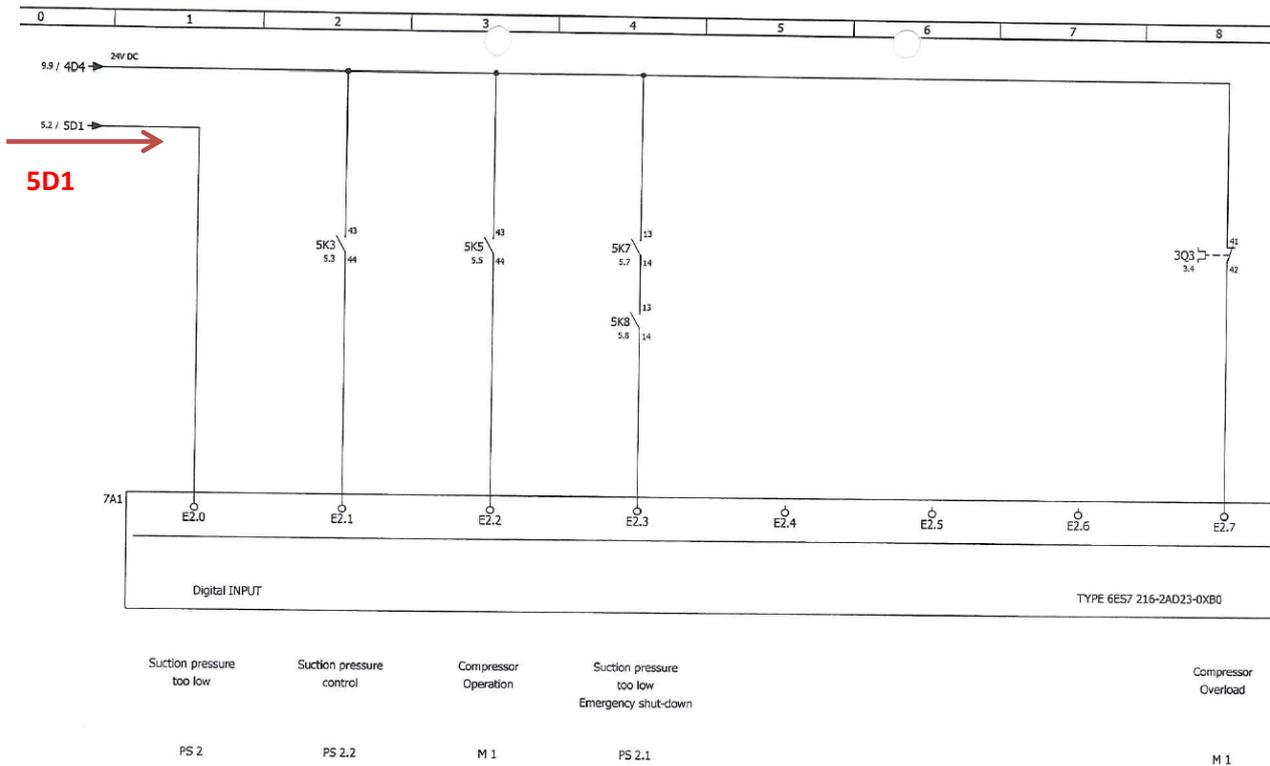


L'accorgimento serve perché non si verifichi un'apertura dei contatti **5K7** e **5K8**, nell'impianto in 5.4 e 5.5, prima che gli omonimi si chiudono. Questo evento infatti causerebbe un'interruzione dell'alimentazione del relay 5K5 che causerebbe un'apertura dell'interruttore ad esso collegato, posto in 5.4, che ed un conseguente arresto del compressore malgrado non sia stato segnalato nessun segnale di failure.

Da notare che i relay 5K7 e 5K8 governano entrambi i medesimi switch. Questo accorgimento è stato adottato in favore di sicurezza nel caso uno dei due relay non dovesse agire correttamente.

10.4	13	—	14	
	23	—	24	
	33	—	34	
	43	—	44	
5.5	57	—	58	Contatto a chiusura anticipata.
5.8	67	—	68	
5.4	75	—	76	Contatto ad apertura ritardata.
5.7	85	—	86	

L'elemento **3Q3**, nello schema di impianto, risulta essere l'interruttore magnetotermico già analizzato a pagina 3.3. Se si dovessero verificare sovracorrenti o cortocircuiti nel sistema, questo aprirebbe prontamente gli interruttori segnati nell'impianto.



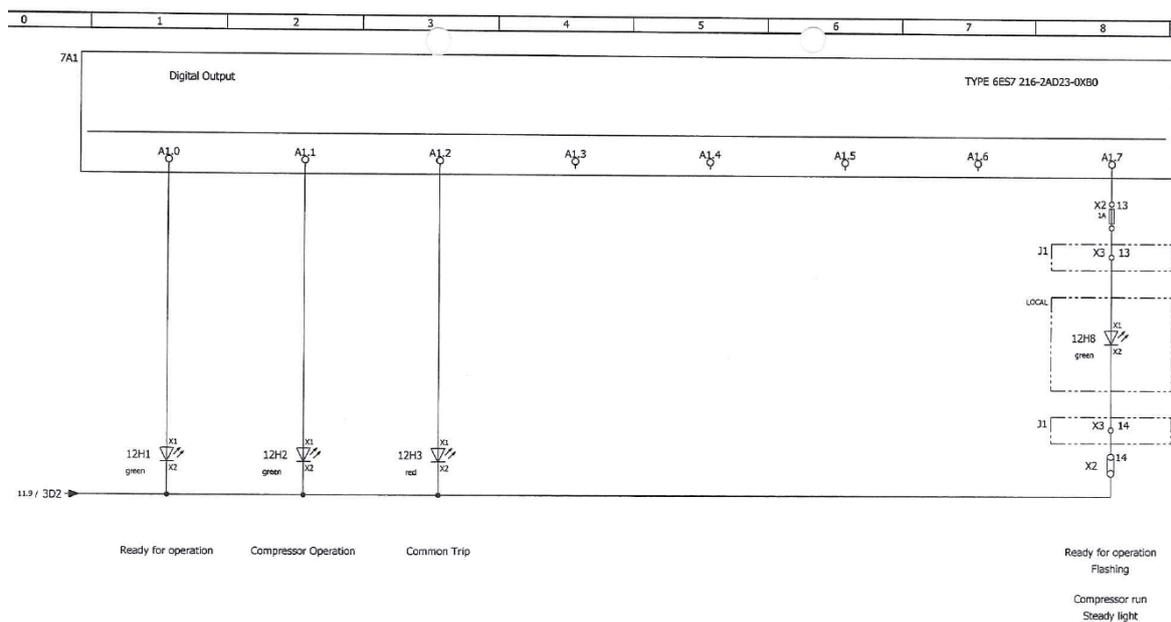
Schema circuito elettrico compressore – Pagina 10/12

Lo schema in figura rappresenta gli interruttori che interdicono il passaggio di corrente alle porte della centralina:

IN2.1, IN2.2, IN2.3, IN2.7 e l'avvio dei corrispondenti protocolli.

La linea **5D1** è la linea, già osservata in precedenza, che da 5.2, nel caso in cui il pressostato di bassa pressione

PSL 2.1 dovesse scattare per il raggiungimento del set point, attiverrebbe il protocollo azionato dalla porta IN2.0 di arresto di sistema.



Schema circuito elettrico compressore – Pagina 12/12

L'ultimo schema di impianto presenta le porte di uscita dalla centralina che vanno ad attivare le luci di segnale che segnalano lo stato di funzionamento dell'impianto.

La porta OUT1.0 regola la luce di colore verde che segnala che l'impianto può essere messo in funzione non essendoci segnali di failure.

La porta OUT 1.1 regola la luce di colore verde che segnala che il compressore è in funzione.

La porta OUT 1.2 regola la luce di colore rosso che segnala che uno dei sensori ha rilevato una failure del sistema.

La porta OUT 1.7 regola la luce di colore verde che segnala, come l'OUT 1.1 che il compressore è in funzione o pronto ad essere messo in funzione. La luce, infatti, ha due possibili condizioni, intermittente a segnalare che il compressore può essere attivato, o fissa, a segnalare che questo è effettivamente in funzione.

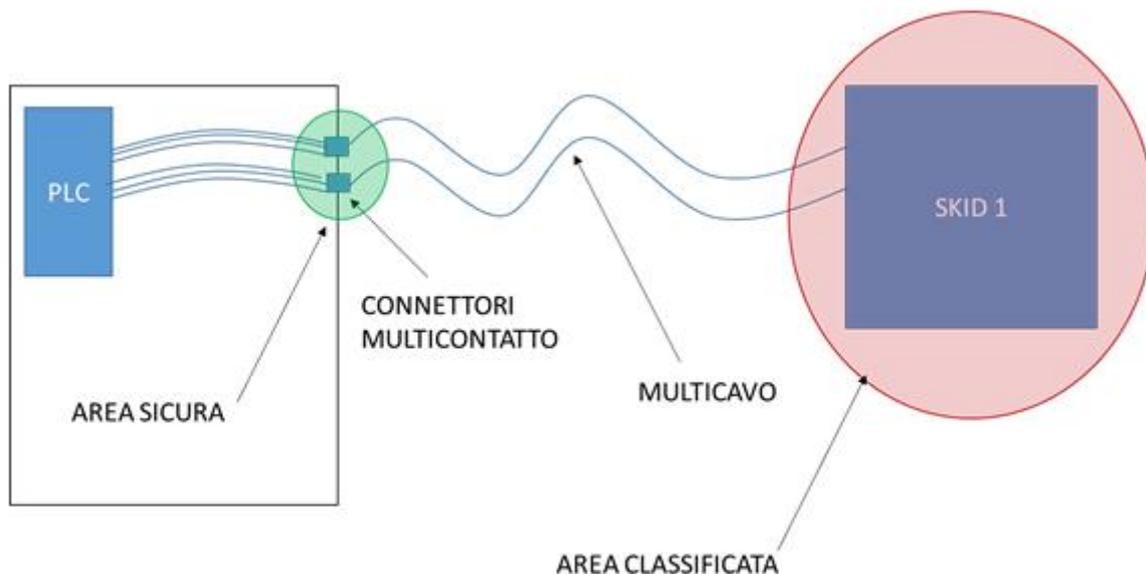
Mentre i primi tre segnali luminosi sono situati sul fronte del quadro elettrico del compressore, quest'ultimo segnale luminoso si trova in locale sul rack compressore.

### 3.2.5 Scelta dei connettori.

L'impianto oggetto di studio consiste in un impianto sperimentale atto a supervisionare il comportamento nel tempo di tutta la strumentazione impiegata, sia per il monitoraggio che per la produzione e lo stoccaggio di idrogeno. Tale impianto necessita della possibilità di essere facilmente trasportabile e re-installabile all'occorrenza. Al fine di perseguire tale scopo si è ingegnerizzata la possibilità di dividere l'impianto in quattro moduli principali:

- skid elettrolizzatore, per la produzione dell'idrogeno
- Rack serbatoi per lo stoccaggio di alta e bassa pressione e per le bombole ausiliarie
- Rack compressore per la compressione dell'idrogeno al fine di rendere efficace il suo stoccaggio
- Rack utilities per l'allacciamento e l'immissione dell'idrogeno in rete

Per ottimizzare l'allacciamento, ogni modulo è fornito internamente di tutta la strumentazione necessaria per il suo monitoraggio, ed i connettori di segnale e potenza delle strumentazioni e dei macchinari sono raggruppati in un numero minimo di cavi multipolari o multicavi che veicolano al loro interno tutti gli allacciamenti necessari.



Schematizzazione di allacciamento tra Skid e Quadro generale posto in area sicura.

Ogni cavo multipolare, divisi in cavi di segnale o di potenza, trasporta quindi un certo numero di segnali, solitamente (16) per i cavi di segnale e 5 per quelli di potenza.

Una tipologia di cavi multipolari analizzata è stata proposta dalla Marechal Electric, un'azienda nel settore dell'equipaggiamento elettrico industriale a livello internazionale da più di 65 anni.

Le soluzioni proposte hanno visto protagoniste due tipologie di cavi multipolari. La principale differenza tra le due soluzioni analizzate consiste nel fatto che il modello "Deconnector", la prima soluzione analizzata, va a perdere il grado di protezione (IP), che possiede nella configurazione in esercizio, o connessa, nel momento in cui il cavo viene posto nella condizione di non trasmettere più il segnale. Nel secondo modello analizzato, il modello "EVO", invece, l'interruzione del segnale non comporta necessariamente la perdita dell'indice di protezione, come verrà mostrato più avanti.

Indipendentemente dal modello, il principale vantaggio dell'impiego delle tecnologie Marechal è che il connettore multipolare funge sia da presa industriale che da sezionatore sotto carico. La funzione di presa industriale garantisce la conduzioni di correnti elettriche importanti, ben superiori a quelle domestiche e regolamentate dalla normativa Europea EN IEC 60309 di cui la sua equivalente Italiana CEI EN 60309. [65]

Campo di tensione	Campo di frequenza	Codice colore
20-25 V	50/60 Hz	Porpora
40-50 V	50/60 Hz	Bianco
100-130 V	50/60 Hz	Giallo
200-250 V	50/60 Hz	Blu
380-480 V	50/60 Hz	Rosso
500-1000 V	50/60 Hz	Nero
-	>60-500 Hz	Verde
Nessuna delle precedenti		Grigio

Codifica dei colori secondo IEC 60309-1 [65]

La funzione di sezionatore sotto carico garantisce la possibilità di interrompere il passaggio di corrente a valle del sezionatore e di dare un segnale visivo chiaro che la corrente non transiterà fintanto che questo non verrà riattivato. [59] In generale il sezionatore è quindi uno strumento atto a garantire la sicurezza degli operatori che operano sull'impianto. Per questo motivo la possibilità di accedere ai sezionatori, e a ciò che è posto a valle, è interdetta al personale non qualificato, detto anche PEC o persona comune, se non sotto supervisione di una figura PAV, o persona avvisata, oppure PES o persona esperta.

<p>Il <b>Decreto Legislativo 81/08</b> all'<b>art. 18</b> sancisce che: <i>"Il datore di lavoro deve, nell'affidare i compiti ai lavoratori, tenere conto delle capacità e delle condizioni degli stessi in rapporto alla loro salute e alla sicurezza"</i> e, all'<b>articolo 82</b>, il Decreto stabilisce che <i>"... l'esecuzione di lavori su parti in tensione deve essere affidata a lavoratori riconosciuti dal datore di lavoro come idonei per tale attività secondo le indicazioni della pertinente normativa tecnica"</i>.</p>	
<p>La <b>normativa CEI 11-27</b> definisce le <b>tre categorie di persone</b> che possono eseguire lavori elettrici:</p>	
PES	<p><b>Persona esperta:</b> è una persona in possesso di adeguata istruzione, conoscenza ed esperienza rilevanti tali da consentirle di analizzare i rischi e di evitare i pericoli che i lavoratori elettrici possono provocare.</p>
PAV	<p><b>Persona avvisata:</b> è una persona adeguatamente avvisata da persone esperte per permetterle di evitare i pericoli che l'elettricità può creare.</p>
PEC	<p><b>Personi comuni:</b> possono eseguire lavori elettrici fuori tensione solo sotto sorveglianza di un PAV o PES</p>

Decreti e normative atti a definire il personale qualificato per agire su impianti elettrici. [66]

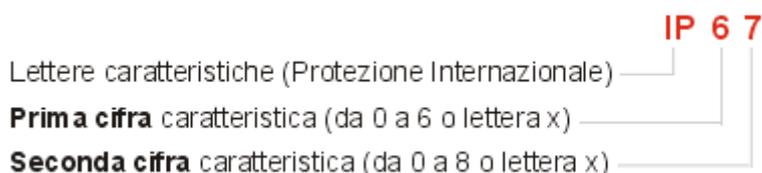
Ciò che rende necessaria la supervisione di personale esterno è la possibilità di malfunzionamento del sezionatore, che può quindi risultare sconnesso e non esserlo, o il rischio di generare l'arco elettrico. Quando il sezionatore è attivato, infatti, il circuito è interrotto, e l'aria, un dielettrico, si interpone tra le due parti interrotte del circuito. Se le tensioni in gioco sono alte però, il rischio è quello che la distanza tra le due sezioni del circuito durante l'apertura del sezionatore, sia sufficientemente bassa affinché si generi un arco elettrico attraverso l'aria che, nel caso in cui ci sia una persona nelle vicinanze, può scaricarsi anche su questa con gravi danni alla sua salute.

Le tecnologie Marechal analizzate sono state presentate come sicure e maneggiabili da personale non qualificato o formato, poiché non permettono dubbio su un possibile malfunzionamento del sezionatore, che sarà quindi visibilmente e inconfutabilmente aperto o chiuso e garantiscono assoluta sicurezza da possibili archi elettrici a chiunque le utilizzi.

I dispositivi Marechal inoltre sono conformi alla norma CEI EN 60309/2 che regolano il dimensionamento geometrico in base alle correnti nominali. Per la norma, le correnti nominali nella serie 1, utilizzata nei paesi Europei, sono 16 A, 32 A, 63 A e 125 A

### Grado di protezione (IP) [67]

Il grado di protezione di un involucro per apparecchiature elettriche è definito dalla norma CEI EN 60529/1997 (ex CEI 70-1). E' definito da due cifre che indicano rispettivamente il grado di protezione contro la penetrazione di corpi solidi estranei e il grado di protezione contro la penetrazione di liquidi.



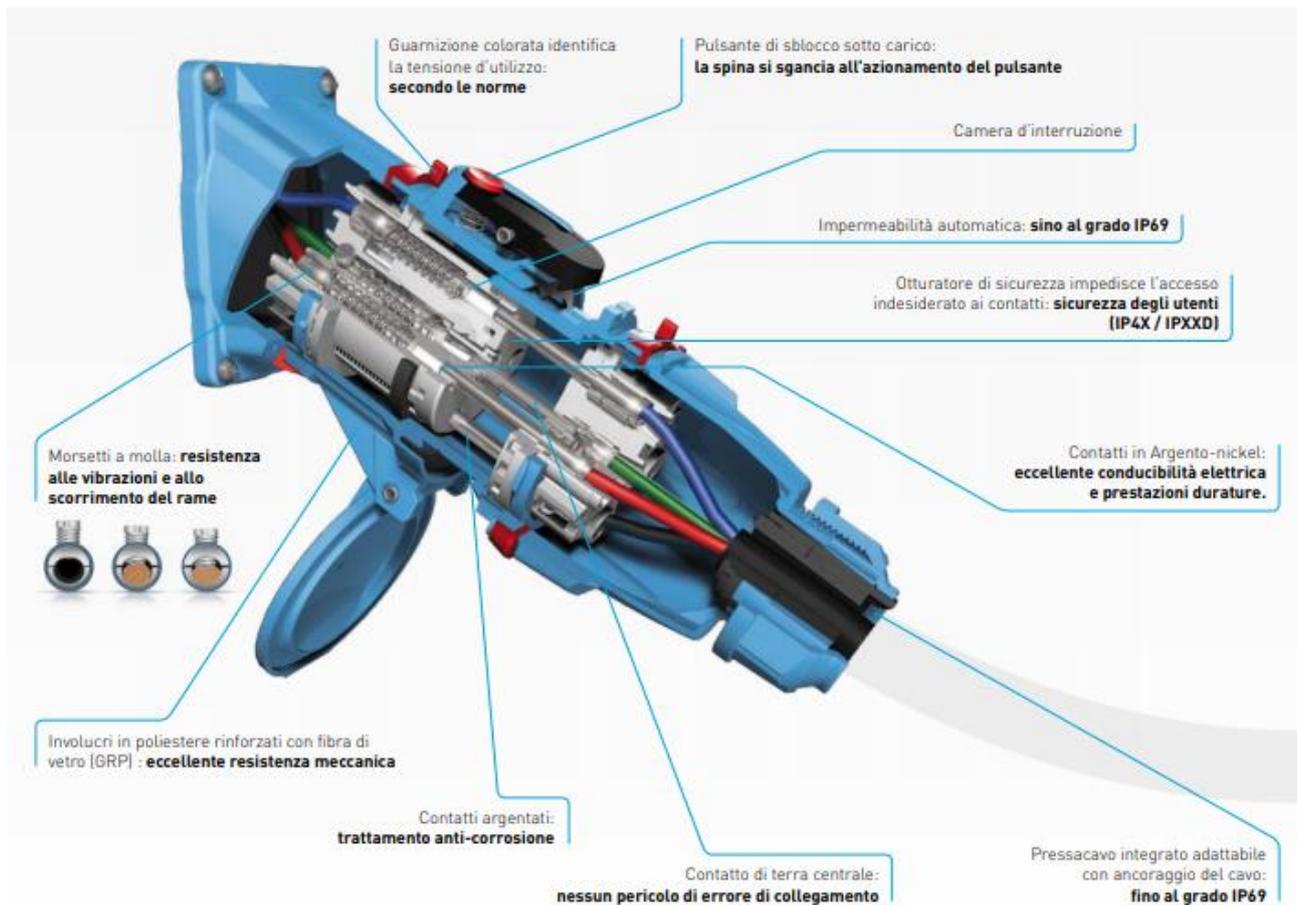
IP	Significato
<b>0</b>	Nessuna protezione
<b>1</b>	Protezione contro corpi solidi superiori a 50 mm di diametro
<b>2</b>	Protezione contro corpi solidi superiori a 12 mm di diametro
<b>3</b>	Protezione contro corpi solidi superiori a 2,5 mm di diametro
<b>4</b>	Protezione contro corpi solidi superiori a 1 mm di diametro
<b>5</b>	Protetto contro le polveri (nessun deposito nocivo)
<b>6</b>	Totalmente protetto contro le polveri

Prima cifra

IP	Significato
<b>0</b>	Nessuna protezione
<b>1</b>	Protezione contro le cadute verticali di gocce d'acqua
<b>2</b>	Protezione contro le cadute di gocce d'acqua o pioggia fino a 15° dalla verticale
<b>3</b>	Protezione contro le cadute di gocce d'acqua o pioggia fino a 60° dalla verticale
<b>4</b>	Protezione contro gli spruzzi d'acqua da tutte le direzioni
<b>5</b>	Protetto contro i getti d'acqua
<b>6</b>	Protetto contro i getti d'acqua potenti
<b>7</b>	Protetto contro gli effetti delle immersioni temporanee
<b>8</b>	Protetto contro gli effetti delle immersioni continue

Seconda cifra

## Modello Decontactor



La tecnologia Decontactor consiste in una spina ed una presa. L'inserimento della spina nella presa è ostacolato da delle molle che si oppongono all'inserimento. Se la resistenza delle molle non è vinta, cioè l'inserimento non è completato, non si ha connessione tra i contatti e quindi passaggio di corrente. Se la resistenza è vinta invece, cioè si ha il passaggio di corrente, la pulsantiera di blocco garantisce l'impossibilità di sfilamento accidentale tra spina e presa a causa delle molle. L'interruzione volontaria della corrente avviene per mezzo dell'azionamento della pulsantiera che sgancia la spina dalla presa e permette alle molle di allontanare le due parti, interrompendo i contatti tra i connettori. Essendo i contatti protetti da un involucro esterno, non c'è possibilità che chiunque azioni il meccanismo di sgancio sia sufficientemente vicino da poter essere vittima dell'arco elettrico se questo si verificasse.

Un punto di forza delle tecnologie Marechal, comparate ad altre tecnologie in commercio, è che il contatto tra le terminazioni della spina e della presa avviene di testa. Le normali tecnologie infatti sono costituite da uno spinotto ed un alveolo ad inserimento. Per l'inserimento delle due parti deve essere garantita una tolleranza. A causa di questa tolleranza però il contatto non è uniformemente distribuito, e ci saranno delle zone di non contatto. In queste zone si creano degli archi elettrici con conseguente produzione di calore che va ad aumentare la temperatura del sistema spinotto ed alveolo. I normali sistemi spinotto-alveolo, in oltre, sono fatti in ottone, se la loro temperatura aumenta, aumenta di conseguenza anche la resistività, secondo la formula  $\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$  [68] e quindi anche le dissipazioni per Effetto Joule, direttamente proporzionali alla resistività, con conseguente produzione di calore che va ulteriormente ad

aumentare la temperatura dei contatti. Questo ha un duplice effetto negativo: obbliga l'impianto ad un fermo tecnico dopo un certo periodo di esercizio, per non incorrere in eccessive temperature di alveolo e spinotto, e accentua il rischio di serraggio tra queste ultime due parti a causa della dilatazione termica dello spinotto in ottone con conseguente ostacolo allo sgancio.

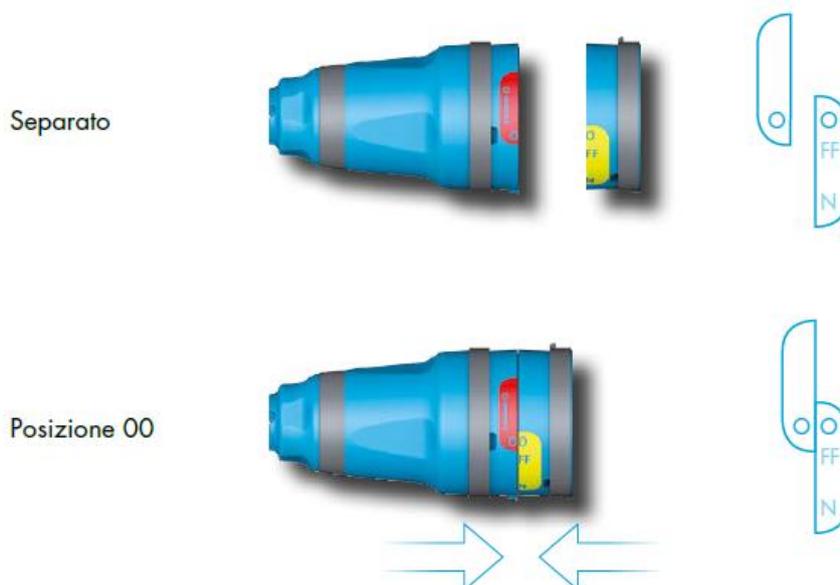
Per ovviare al problema, Marechal propone dei contatti di testa. Le sommità dei contatti infatti sono costituite da pastiglie di una lega all'85% di argento e al 15% di nichel. Tale lega ha il vantaggio di mantenere un'ottima conducibilità, garantita dall'argento, invariata anche nel caso di ossidazione superficiale. Inoltre l'alveolo è sostituito da un secondo spinotto elastico capace di comprimersi se sottoposto a pressione. Quando avviene l'aggancio tra spina e presa, tale spinotto viene compresso generando una spinta tra le teste dei due conduttori, garantendo una completa adesione delle parti ed eliminando il rischio di archi elettrici e conseguente aumento della temperatura. Per questo tali tecnologie non sono soggette a fermi macchina programmati, visto che le temperature in esercizio sono costanti e non rischiano di causare danni alla struttura.



Contatto di testa offerto dalla Marechal

Nel modello Decontactor il grado di protezione (IP) è garantito da una guarnizione che sigilla il sistema presa spina quando queste sono agganciate. Tale grado di protezione si perde nel momento dello sgancio visto che la guarnizione, solidale alla presa, cessa il contatto con la spina.

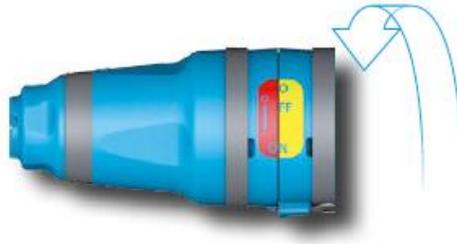
### Modello EVO



Posizione OFF



Posizione ON



Il modello EVO mantiene tutte le caratteristiche del modello deconnector, con un'unica differenza nel contatto di testa tra i connettori. Qui infatti il contatto tra le teste viene raggiunto quando il modello è posto nella posizione ON attraverso una rotazione relativa del sistema presa spina. Quando questa configurazione è raggiunta, il contatto di testa è mediato da una linguetta metallica che permette il contatto tra i due spinotti posti in assi paralleli, rendendo, di fatto, ancora più efficace l'adesione tra le teste dei contatti e la linguetta metallica. La presa, in oltre, funge da vero e proprio sezionatore perché può essere ruotata tra le configurazioni ON ed OFF senza che ci sia distacco tra il sistema presa e spina ed in particolare tra le guarnizioni garantendo ad entrambe le configurazioni il mantenimento del grado di protezione IP. Se si vuole il distacco completo tra presa e spina si deve agire su un cilindro metallico di bloccaggio che garantisce l'impossibilità accidentale di rotazione del sistema in posizione 00, posizione di sgancio delle parti.

Entrambi i modelli proposti dalla Marechal sono disponibili sia per area sicura, contraddistinti da un case di colore azzurro, sia per area ATEX, contraddistinti da un colore nero.



## Conclusioni

Lo studio delle principali tecnologie nell'ambito Power to Gas, per impianti di produzione di idrogeno, fornisce importanti spunti per comprendere i punti di forza e debolezza che le caratterizzano. L'analisi svolta su i KPI mette in luce la forte interdipendenza dei parametri in gioco che ne rende la regolazione, attraverso la variazione di carico a cui l'impianto viene sottoposto, un punto fondamentale su cui agire per ricercare un equilibrio tra rendimento e tasso di produzione, e per non incorrere in rischi sulla sicurezza. Tra i KPI analizzati uno di fondamentale importanza risulta essere la densità di corrente nominale, approssimativamente proporzionale al tasso di produzione di idrogeno, necessaria per la determinazione di costi operazionali e capitali poiché un aumento della produzione del gas, per area di cella, corrisponde ad una riduzione di costo capitale, per ogni Nm<sup>3</sup> prodotto, ma anche una riduzione di performance ed un conseguente aumento di costi operazionali oltre che un aumento del tasso medio di degradazione annua. Di contro una sua riduzione, che corrisponde ad un regime di funzionamento ai carichi parziali, si traduce in un aumento del rendimento, ma comporta un ritorno dell'investimento maggiore nel tempo a causa della riduzione dei tassi di produzione. Gli elettrolizzatori PEM, paragonati agli AEL, possiedono mediamente rendimenti un po' più bassi, ma riescono a raggiungere densità di corrente molto più elevate che permettono volumi di produzione nettamente superiori ma che comportano anche dei tassi di perdita di produzione annua, dovuti alla degradazione dell'impianto sottoposto agli alti carichi, parimenti superiore. I carichi parziali sono un punto fondamentale in particolare negli elettrolizzatori AEL. A differenza degli elettrolizzatori PEM, che possono variare il loro regime di carico senza riserve, gli elettrolizzatori AEL sono limitati inferiormente dal rischio della formazione di miscele esplosive che impongono carichi parziali fino al 20- 25%. I tempi di start-up, da caldo e freddo, sono un altro parametro fondamentale da indagare, in particolare se si vuole alimentare gli elettrolizzatori da fonti di energia rinnovabili. L'intermittenza dei carichi così forniti comporta una forte variazione nell'arco della giornata. Gli elettrolizzatori PEM ed AEL analizzati nell'elaborato forniscono una risposta dinamica molto veloce (< di 1 sec.) alle variazioni di carico quando sono in temperatura, ma in una partenza, in particolare a freddo, i tempi si dilatano notevolmente arrivando alle ore nel caso degli elettrolizzatori AEL, mentre sono molto più contenuti negli elettrolizzatori PEM, rimanendo nell'intorno dei minuti. Il rischio, in particolare nei periodi invernali è quello che l'elettrolizzatore non abbia il tempo di scaldarsi prima che il carico cali nuovamente.

L'elaborato si è poi concentrato sull'analisi dell'impianto oggetto di studio dove è stato analizzato il principio di funzionamento della strumentazione, quanto le norme che ne regolano l'impiego e il loro allacciamento elettrico ai quadri. Essendo alcune strumentazioni adoperate in zone a rischio di esplosione, queste devono garantire di non poter offrire possibilità di innesco di fiamma nel caso si verificano atmosfere esplosive e devono quindi essere certificate in base alle norme ATEX per essere impiegate, in aree pericolose, secondo il grado di sicurezza che possono fornire. Il sensore di rilevazione di idrogeno, elemento fondamentale per la gestione della sicurezza dell'impianto, deve, invece, garantire una corretta misurazione della percentuale di idrogeno nell'ambiente indipendentemente dalle possibili variazioni dei parametri atmosferici, in particolare la temperatura, risultato ottenuto grazie all'impiego del ponte di Wheatstone che vede due resistenze, una con un catalizzatore reattivo all'idrogeno, ed una senza, soggette alle stesse condizioni ambientali, che reagiscono quindi nella medesima maniera se non nel contatto con l'idrogeno. Il layout dei trasduttori è stato attentamente pensato per essere in grado di fornire tutti i parametri necessari alla comprensione del processo, senza ricadere in una ridondanza progettuale che si tradurrebbe in un aumento di costi. La misurazione della portata volumetrica all'uscita del compressore, ad esempio, risulterebbe un parametro superfluo da considerare, essendo nota la portata massica in ingresso, mentre i trasduttori di pressione e temperatura, posti all'uscita, sono essenziali per

comprendere quanto calore il compressore sia riuscito ad asportare durante il processo, necessario a caratterizzare il rendimento dell'operazione. La stesura della I/O list che definisce tutti gli ingressi e le uscite al quadro elettrico per la gestione dei trasduttori, delle elettrovalvole e delle alimentazioni garantisce una corretta installazione dei segnali della strumentazione eliminando possibilità di errore. Nell'analisi del quadro elettrico del compressore sono stati studiati nel dettaglio tutti i componenti utilizzati. La risposta del quadro elettrico del compressore ad una possibile condizione di failure, condizione cioè in cui uno o più dei sensori misurano un'anomalia nel processo, è gestita da una centralina programmabile. Questa è responsabile non solo dei protocolli di arresto del modulo di compressione in caso di necessità, ma anche, alla fase di avvio dell'impianto che prevede un ritardo nell'accensione dei pressostati atti a monitorare la pressione in aspirazione. L'impianto elettrico è inoltre dotato di strumenti di ricezione del segnale, inviato dai trasduttori, posti sul rack compressore, isolati galvanicamente che sfruttano sistemi di trasmissione meccanici per il passaggio del segnale, per non rischiare l'innesco di scintille in aree classificate. Infine è stato analizzato l'impiego di connettori multipolari, per la potenza ed il segnale, utili per favorire un allacciamento e disaccoppiamento veloce e sicuro dei moduli nel caso in cui l'impianto necessiti di essere spostato. Questi connettori vantano una sicurezza superiore rispetto ad altri articoli simili nel mercato per l'impiego di trasmissioni, di segnale e potenza, di testa. Il vantaggio rispetto alle più comuni tecnologie ad inserimento dello spinotto è che la dilatazione termica, dovuta al passaggio di corrente, non rischia di causare incastramenti che ostacolano il disaccoppiamento in caso di necessità.



## Bibliografia:

- [1] Fleming J.R., *Joseph Fourier, the 'greenhouse effect' and the quest for a universal theory of terrestrial temperatures*, *Endeavour*, Elsevier (1999) Volume 23, Issue 2, pagine 72-75
- [2] Houghton J., *Global warming*, 2005 Rep. Prog. Phys **68** 1343
- [3] [https://archive.ipcc.ch/organization/organization\\_history.shtml](https://archive.ipcc.ch/organization/organization_history.shtml)
- [4] Folland C.K., *Global temperature change and its uncertainties since 1861*, (2001) *Geophys. Res. Lett.* **106** 2621-4  
Jones P.D., Moberg A., *Hemispheric and large scale surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2201*, (2003) *J. Clim.* **16** 206-23
- [5] Mann M. E., Jones P.D., *Global surface temperature over the past two millennia*, (2003) *Geophys. Res. Lett.* **30** 1820, doi: 10.1029/2003GL017814, © American Geophysical Union
- [6] [https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto\\_serra#:~:text=Nelle%20scienze%20dell'atmosfera%2C%20,quale%20orbita%20il%20corpo%20celeste](https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_serra#:~:text=Nelle%20scienze%20dell'atmosfera%2C%20,quale%20orbita%20il%20corpo%20celeste)
- [7] <https://www.isprambiente.gov.it/it/servizi/registro-italiano-emission-trading/contesto/protocollo-di-kyoto>
- [8] <https://www.isprambiente.gov.it/it/servizi/registro-italiano-emission-trading/contesto/accordo-di-parigi-ed-eu-ets>
- [9] [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en)
- [10] Ramana M.V., *An Enduring Problem: Radioactive Waste From Nuclear Energy*, Program on Science and Global Security, Princeton University, Princeton, NJ, USA (2017) *Proceedings of the IEEE* | Vol. 105, No.3
- [11] Sacconi C., Bianchini A., Pellegrini M., *Biomasse, Classificazione e caratterizzazione delle biomasse ai fini dell'utilizzo a scopo energetico*, Modulo 1.1 – Sezione 1.1 Corso di Impianti Meccanici – Laurea Magistrale, Department of Industrial Engineering (DIN) – University of Bologna
- [12] Athari M. H., Wang Z., *Impacts of Wind Power Uncertainty on Grid Vulnerability to Cascading Overload Failures*, (2018) *IEEE Transactions on sustainable energy*, VOL.9, NO.1, January
- [13] Amirante R. Cassone E. Distaso E. Tamburrano P., *Overview on recent developments in energy storage: Mechanical, electrochemical and hydrogen technologies*, *Energy conversion and Management* **132** (2017) 372-387
- [14] YAO L. YANG B. CUI H. ZHUANG J. YE J. XUE J., *Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems*, *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* (2016) 4(4):519-528
- [15] Sonoc A. Jeswiet J. Kie Soo V., *Opportunities to improve recycling of automotive lithium ion batteries*, *Procedia CIRP* (2015) 752-757
- [16] Huang B. Pan Z. Su Z. An L., *Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives*, *Journal of Power Sources* **399** (2018) 274-286

- [17] Buzoverov E. Zhuk A., *Comparative economic analysis for different types of electric vehicles*, International Journal of Sustainable Energy Planning and Management Vol. 29 2020 57-68
- [18] [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/QANDA\\_20\\_1257](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/QANDA_20_1257)
- [19] Graziani R., *Principi di chimica generale ed inorganica. Dispense dal corso, Università di Padova, (1982)* 44-48.
- [20] <https://www.chimica-online.it/download/mole.htm>
- [21] Graziani R., *Principi di chimica generale ed inorganica. Dispense dal corso, Università di Padova, (1982)* 49-50.
- [22] <https://www.chimica-online.it/download/equivalente.htm>
- [23] Graziani R., *Principi di chimica generale ed inorganica. Dispense dal corso, Università di Padova, (1982)* 52-53.
- [24] Buttler A., Spliethoff H., *Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2440-2454
- [25] Bolognani L., *Compendio di Bioenergetica* (43)
- [26] Jain I.P., *Hydrogen the fuel for 21st century*, International Journal of Hydrogen Energy 34 (2009) 7368-7378
- [27] Sherif SA, Goswami DY, Stefanakos EK (Lee), Steinfeld A. *Handbook of Hydrogen Energy*. CRC Press; (2014) 24.  
[https://books.google.it/books?hl=it&lr=&id=jGkLBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Sherif+SA,+Goswami+DY,+Stefanakos+EK+\(Lee\),+Steinfeld+A.+Handbook+of+Hydrogen+Energy.+CRC+Press%3B+2014.&ots=DHzm2ve5Av&sig=449TPMVx059PHJrzfBA5Uzq2jc8&redir\\_esc=y#v=onepage&q=volumetric%20energy%20density&f=false](https://books.google.it/books?hl=it&lr=&id=jGkLBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Sherif+SA,+Goswami+DY,+Stefanakos+EK+(Lee),+Steinfeld+A.+Handbook+of+Hydrogen+Energy.+CRC+Press%3B+2014.&ots=DHzm2ve5Av&sig=449TPMVx059PHJrzfBA5Uzq2jc8&redir_esc=y#v=onepage&q=volumetric%20energy%20density&f=false)
- [28] Wade A. Amos, *Costs of storing and transporting Hydrogen*, National Renewable Energy Laboratory (1998) pg 27
- [29] Bloch HP, Hoefner JJ. *Reciprocating compressors: operation and maintenance*. Gulf Professional Publishing (1996).
- [30] Tuhovcak J, Hejcik J, Jicha M. *Comparison of heat transfer models for reciprocating compressor*. Appl Therm Eng (2016) 103:607–15.
- [31] Shiddiqur Rahman M. *Experimental and numerical study of snubber in hydrogen compressor*. Int J Sci Eng (2012) 3(2):21–5.
- [32] Sdanghi G., Maranzana G., Celzard A., Fierro V., *Review of the current technologies and performances of hydrogen compression for stationary and automotive applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 102 (2019) 150-170

- [33] Ahmed S, Sutherland E. Hydrogen Compression, Storage and Dispensing Cost Reduction Workshop Final Report [Internet]. U.S. Department of Energy Washington, D.C. 20585 [cited 4 February 2017]; 2013. Available from: (<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-compression-storage-and-dispensing-cost-reduction-workshop>).
- [34] Wade A. Amos, *Costs of storing and trasporting Hydrogen*, National Renewable Energy Laboratory (1998) 1
- [35] [https://it.wikipedia.org/wiki/Isomeri\\_dell%27idrogeno](https://it.wikipedia.org/wiki/Isomeri_dell%27idrogeno)
- [36] Wade A. Amos, *Costs of storing and trasporting Hydrogen*, National Renewable Energy Laboratory (1998) 6
- [37] Wade A. Amos, *Costs of storing and trasporting Hydrogen*, National Renewable Energy Laboratory (1998) 10-13
- [38] Wade A. Amos, *Costs of storing and trasporting Hydrogen*, National Renewable Energy Laboratory (1998) 13
- [39] <https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-storage#:~:text=Batteries%20are%20not%20suitable%20in,for%20extended%20periods%20of%20time.>
- [40] European Energy Research Alliance, *Key Performance Indicators (KPI) for FCH research and innovation, 2020-2030*, Joint Research Programme on Fuel Cells and Hydrogen technologies (JP FCH) & Hydrogen Europe Research (HER)
- [41] Friedemann, Schiautmann, Ruth, Gorre J., Leonhard R. *Final report on evaluation of technologies and process*, D5.9 Innovative large-scale energy storage technologies and power-to-gas concepts after optimisation (29 Febbraio 2020)
- [42] G.Dispenza, F.Sergi, G.Napoli, V.Antonucci, L.Andaloro, *Evaluation of hydrogen production cost in different real case studies*, Journal of Energy Storage 24 (2019) 100757
- [43] Götz M., Lefebvre J., Mörs F., McDaniel Koch A., Graf F., Bajohr S., Reimert R., Kolb T., *Renewable Power-to-gas: A technology and economic review*, Renewable Energy 85 (2016) 1371-1390
- [44] Grigoriev S.A., Porembskiy V.I., Korobtsev S.V., Fateev V.N., Aufrêtre F., Millet P., *High-pressure PEM water electrolysis and corresponding safety issues*, International Journal of Hydrogen Energy 36 (2011) 2721-2728.
- [45] Bidault C., Besse S., Nietsch T., Chaudron V., *Electolyser development at HELIO/AREVA. Status & Perspectives*, (2008) Fuel cell seminar & exposition, Phoenix Arizona.
- [46] Graziani R., *Principi di chimica generale ed inorganica. Dispense dal corso, Università di Padova, (1982)*
- [47] [https://it.wikipedia.org/wiki/Condizioni\\_standard#:~:text=Con%20l'indicazione%20condizioni%20standard,delle%20condizioni%20in%20cui%20si](https://it.wikipedia.org/wiki/Condizioni_standard#:~:text=Con%20l'indicazione%20condizioni%20standard,delle%20condizioni%20in%20cui%20si)
- [48] <https://www.atexitalia.it/atex/#:~:text=La%20direttiva%20ATEX%201999%2F92,base%20ai%20quali%20i%20prodotti>

- [49] Saccani C., Bianchini A., Pellegrini M., *Misuratori di pressione*, Modulo 2.3 – Corso di Strumentazione e automazione industriale – Laurea Triennale, Departement of Industrial Engineering (DIN) – University of Bologna
- [50] Saccani C., Bianchini A., Pellegrini M., *Misuratori di temperatura*, Modulo 2.4 – Corso di Strumentazione e automazione industriale – Laurea Triennale, Departement of Industrial Engineering (DIN) – University of Bologna
- [51] Saccani C., Bianchini A., Pellegrini M., Guzzini. A., *Misuratori di portata*, Modulo 2.2 – Corso di Strumentazione e automazione industriale – Laurea Triennale, Departement of Industrial Engineering (DIN) – University of Bologna
- [52] Saccani C., Pellegrini M., Guzzini. A., *Il sistema di acquisizione dati e controllo industriale*, Modulo 2.5 – Corso di Strumentazione e automazione industriale – Laurea Triennale, Departement of Industrial Engineering (DIN) – University of Bologna
- [53] [https://it.wikipedia.org/wiki/Resistivit%C3%A0\\_elettrica](https://it.wikipedia.org/wiki/Resistivit%C3%A0_elettrica)
- [54] <https://www.sensitron.it/wp-content/uploads/University/CatalyticSensors.pdf>
- [55] [https://en.wikipedia.org/wiki/Process\\_flow\\_diagram](https://en.wikipedia.org/wiki/Process_flow_diagram)
- [56] [https://en.wikipedia.org/wiki/Piping\\_and\\_instrumentation\\_diagram](https://en.wikipedia.org/wiki/Piping_and_instrumentation_diagram)
- [57] <http://instrumentationportal.com/2011/document-drawing-checklist-form/instrument-document/io-list/>
- [58] <https://std.iec.ch/iec60617>
- [59] Ferrari E., *SGI – Fascicolo 5 Impianti elettrici*, materiale didattico fornito nel corso di Servizi Generali di Impianto M (2019), Ingegneria Meccanica M, Alma Mater Studiorum Università di Bologna.
- [60] [https://it.wikipedia.org/wiki/Alimentatore\\_elettrico#:~:text=Alimentatore%20%22switching%22%20o%20%22a%20commutazione%22,-Alimentatore%20elettronico%20ATX&text=Il%20principio%20di%20funzionamento%20si,all'aumentare%20della%20frequenza%20operativa.](https://it.wikipedia.org/wiki/Alimentatore_elettrico#:~:text=Alimentatore%20%22switching%22%20o%20%22a%20commutazione%22,-Alimentatore%20elettronico%20ATX&text=Il%20principio%20di%20funzionamento%20si,all'aumentare%20della%20frequenza%20operativa.)
- [61] [https://it.wikipedia.org/wiki/Isolamento\\_elettrico](https://it.wikipedia.org/wiki/Isolamento_elettrico)
- [62] <https://realpars.com/namur-sensor/>
- [63] [https://it.wikipedia.org/wiki/Transiente\\_\(elettronica\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Transiente_(elettronica))
- [64] <https://it.wikipedia.org/wiki/Soppressore>
- [65] [https://it.wikipedia.org/wiki/Presenza\\_elettrica\\_industriale](https://it.wikipedia.org/wiki/Presenza_elettrica_industriale)
- [66] <https://www.serviziisacchi.it/chi-puo-eseguire-lavori-elettrici-differenza-fra-pes-pav-e-pec/>
- [67] [https://www.oppo.it/normative/protezione\\_ip.htm](https://www.oppo.it/normative/protezione_ip.htm)
- [68] [https://it.wikipedia.org/wiki/Resistivit%C3%A0\\_elettrica](https://it.wikipedia.org/wiki/Resistivit%C3%A0_elettrica)

## Figure

Figura [1] Houghton J., *Global warming*, 2005 Rep. Prog. Phys **68** 1343

Figura [2] Houghton J., *Global warming*, 2005 Rep. Prog. Phys **68** 1343

Figura [3] [http://eosps0.gsfc.nasa.gov/eos\\_observ/pdf/Nov-Dec06.pdf](http://eosps0.gsfc.nasa.gov/eos_observ/pdf/Nov-Dec06.pdf)  
[https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto\\_serra#:~:text=Nelle%20scienze%20dell'atmosfera%2C%20,quale%20orbita%20il%20corpo%20celeste](https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_serra#:~:text=Nelle%20scienze%20dell'atmosfera%2C%20,quale%20orbita%20il%20corpo%20celeste) )

Figura [4] Spettro ripreso con lo spettrometro interferometro infrarosso montato sul satellite Nimbus 4 nel 1971 e descritto da Hanel R. A. (1971) Appl. Opt. **10** 1367-82

Figura [5] <https://www.slideserve.com/trisha/elettrolisi-di-nacl-fuso>

Figura [6] <https://www.chimicamo.org/chimica-generale/elettrolisi-dellacqua/>

Figura [7] Buttler A., Spliethoff H., *Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2440-2454

Figura [8] Buttler A., Spliethoff H., *Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2440-2454

Figura [9] Buttler A., Spliethoff H., *Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2440-2454

Figura [10] Buttler A., Spliethoff H., *Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2440-2454

Figura [11] Sdanghi G., Maranzana G., Celzard A., Fierro V., *Review of the current technologies and performances of hydrogen compression for stationary and automotive applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 102 (2019) 150-170

Figura [12] <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/public.1602678792.139de890-44e1-453b-8176-c3d45c905178.white-paper-efficiency-en.pdf>

Figura [13] Buttler A., Spliethoff H., *Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2440-2454

Figura [14] Buttler A., Spliethoff H., *Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2440-2454

Figura [15] G.Dispenza, F.Sergi, G.Napoli, V.Antonucci, L.Andaloro, *Evaluation of hydrogen production cost in different real case studies*, Journal of Energy Storage 24 (2019) 100757

Figura [16] Buttler A., Spliethoff H., *Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2440-2454

Figura [17] Buttler A., Spliethoff H., *Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2440-2454

Figura [18] Buttler A., Spliethoff H., *Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2440-2454

Figura [19] Buttler A., Spliethoff H., *Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2440-2454

Figura [20] <https://www.youtube.com/watch?v=oUd4WxjoHKY&t=144s>

Figura [21] Saccani C., Bianchini A., Pellegrini M., *Misuratori di pressione*, Modulo 2.3 – Corso di Strumentazione e automazione industriale – Laurea Triennale, Department of Industrial Engineering (DIN) – University of Bologna

Figura [22] [https://www.youtube.com/watch?v=P0uwP2gTn\\_Q](https://www.youtube.com/watch?v=P0uwP2gTn_Q)

Figura [23] <https://www.sensitron.it/wp-content/uploads/University/CatalyticSensors.pdf>

Figura [24] ] Saccani C., Bianchini A., Pellegrini M., *Misuratori di temperatura*, Modulo 2.4 – Corso di Strumentazione e automazione industriale – Laurea Triennale, Department of Industrial Engineering (DIN) – University of Bologna

Figura [25] <https://www.sensitron.it/wp-content/uploads/University/CatalyticSensors.pdf>

Figura [26] <https://knowledge.autodesk.com/it/support/autocad-electrical/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ITA/AutoCAD-Electrical/files/GUID-DB1548A3-A4D3-47E5-86AC-3700DC57D80-htm.html>

Figura [27] Ferrari E., *SGL – Fascicolo 5 Impianti elettrici*, materiale didattico fornito nel corso di Servizi Generali di Impianto M (2019), Ingegneria Meccanica M, Alma Mater Studiorum Università di Bologna.

Figura [28] Manuale di funzionamento CPU S7-200 Vol.1, pag. 22

Figura [29] Manuale di funzionamento CPU S7-200 Vol.1, pag16

Figura [30] Manuale di funzionamento CPU S7-200 Vol.2, pag. 133

Figura [31] Manuale di funzionamento CPU S7-200 Vol.1, pag. 40

Figura [32] Manuale di funzionamento CPU S7-200 Vol.1, pag 44

Figura [33] <https://realpars.com/namur-sensor/>