



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

**ANALISI E STUDIO DI UN SISTEMA  
AUTOMATICO DI TEST PER TANK  
DI IDROGENO**

**ANALYSIS AND STUDY OF AN  
AUTOMATIC TEST SYSTEM FOR  
HYDROGEN TANK**

Studente:  
**MICHELE PALAZZI**

Relatore:  
**PROF. LEONARDO PELAGALLI**

ANNO ACCADEMICO 2021-2022



# SOMMARIO

In questi ultimi decenni, la crescente preoccupazione per il livello di inquinamento ambientale, localizzato principalmente nelle grandi aree urbane, ha portato i governi dei più grandi e potenti stati al mondo a studiare e a prendere provvedimenti per il controllo delle emissioni, soprattutto per quanto riguarda le automobili, ma, in generale, per tutti i mezzi in circolazione.

I veicoli a motore, alimentati a benzina e gasolio, sono la fonte primaria di emissione di anidride carbonica ( $CO_2$ ) e di tutti quei composti chimici inquinanti responsabili dell'aumento dell'effetto serra e della formazione di smog ed ozono a livello della superficie terrestre.

E' ormai ampiamente accertato che i problemi d'inquinamento urbano potrebbero essere attenuati con la sostituzione di una parte consistente di automobili, alimentate da motori a combustione interna, con veicoli elettrici.

In effetti, nella fase iniziale di produzione di automobili per il trasporto di passeggeri, la scelta più ovvia fu quella di alimentare il veicolo con un motore elettrico. Quest'ultimo fu poi subito soppiantato da quello a combustione interna che, al tempo, garantiva una maggiore velocità, era più economico ed in grado di assicurare maggiori percorrenze.

Ai giorni d'oggi, l'inquinamento atmosferico ha ormai raggiunto livelli che confermano, in modo drammatico, come le emissioni delle automobili alimentate a benzina e diesel rappresentino un rischio elevato sia per la salute della popolazione che per l'ambiente e pertanto il concetto di veicolo elettrico a emissioni zero ha riguadagnato interesse, anche per il fatto che la tecnologia ha consentito di raggiungere grandi risultati e traguardi in questo settore.

In linea di principio i motori elettrici sono alimentati semplicemente da una batteria. Tuttavia, le batterie esistenti (come quelle piombo-acido, nichel-cadmio o nichel-idruro metallico), oltre ad essere molto pesanti, hanno un limitato contenuto in potenza

ed energia, tanto da non essere in grado di assicurare una durata elevata e da rendere il veicolo elettrico interessante per la maggior parte dei consumatori. Ulteriori svantaggi risiedono, d'altra parte, nel lungo tempo necessario alla ricarica delle batterie e nel problema dello smaltimento delle stesse una volta arrivate a fine vita.

Tenendo conto di questi aspetti, le *fuel cells* (celle a combustibile alimentate a idrogeno) appaiono ideali come fonti energetiche alternative per i veicoli elettrici.

Il combustibile "idrogeno", utilizzato dalle celle in combinazione con l'ossigeno per produrre energia elettrica, può essere ricaricato tramite una stazione di rifornimento, in tempi molto brevi, ed immagazzinato all'interno di serbatoi installati a bordo del veicolo. Grazie al suo utilizzo si elimina, quindi, qualsiasi fonte di inquinamento ed il rifornimento non discosta molto, in termini di tempo di ricarica, da ciò che accade con auto alimentate con gas naturale (metano, GPL).

L'energia e la potenza di una *fuel cell*, inoltre, può risultare adeguata per assicurare prestazioni di guida che, anche se non ancora totalmente paragonabili a quelle di veicoli a combustione interna, possono tuttavia rendere il veicolo elettrico appetibile per un'ampia fascia di utenti.

Per questo motivo numerosi progetti governativi e privati, mirati all'utilizzo di celle a combustibile, come sistemi di alimentazione per auto, sono oggi in corso di attuazione ed alcuni di questi hanno già portato alla nascita di numerosi prototipi.

Attualmente, il problema che ancora limita la produzione di auto ad idrogeno su larga scala è legato principalmente a tre fattori: alla tecnologia di produzione delle *fuel cells*, ai costi di produzione dell'idrogeno e alle modalità di stoccaggio e rifornimento del combustibile all'interno di apposite bombole.

Per quanto riguarda il primo aspetto, i costruttori di automobili stanno facendo grandi sforzi per migliorare la struttura e le performance delle *fuel cells* al fine di ottenere prestazioni simili ai motori a combustione interna, il tutto con una buona efficienza energetica (attualmente si ha circa il 50% di energia persa nel passaggio da idrogeno ad energia elettrica).

I veri problemi, quindi, confidando negli enormi sviluppi tecnologici del settore in questione, possiamo dire che ricadano negli altri due aspetti.

Su scala globale, la produzione sostenibile di idrogeno, senza quindi l'utilizzo di idrocarburi, avviene attraverso l'elettrolisi, un processo che necessita di energia

elettrica da fornire ad una o più celle elettrolitiche per scindere l'acqua in idrogeno e ossigeno. L'esigua quantità di idrogeno prodotta dall'elettrolisi, per via del basso rendimento di produzione (circa il 30% di energia viene persa), fa sì che, a maggior ragione in questi ultimi mesi di grave crisi energetica, questo processo necessiti dell'utilizzo di fonti di energia rinnovabile.

Germania, Olanda e altri paesi del nord Europa, sotto questo punto di vista, stanno investendo molto ed hanno già lanciato e prodotto le prime stazioni di rifornimento di idrogeno completamente autosufficienti. Posizionate nei pressi di corsi d'acqua, utilizzano quest'ultima come elemento principale per le celle elettrolitiche che, con l'ausilio di energia elettrica prodotta tramite fonti rinnovabili (solare ed eolica), permettono di ottenere una buona quantità di idrogeno da stoccare e da utilizzare poi nel riempimento delle bombole, alloggiare nei mezzi di trasporto.

Con l'auspicio che la tecnologia e la conversione della produzione di energia elettrica a fonti rinnovabili prenda, negli anni a seguire, sempre più piede, rimane come grande problema quello di come riempire, in modo sicuro, le bombole di idrogeno alloggiare nei veicoli.

Ebbene sì, sono proprio le caratteristiche fisico-chimiche dell'idrogeno che fanno in modo che questo gas differisca, nel suo comportamento, da altri già utilizzati nel campo della propulsione e per questo motivo è necessario prendere i dovuti accorgimenti durante il suo utilizzo.

E' proprio in questo ambito che si inserisce il lavoro di studio e sperimentazione dell'impresa Loccioni, che negli ultimi mesi, sta investendo risorse nella progettazione di sistemi automatici di test per bombole (tank) ad idrogeno. Grazie alla disponibilità di software e strumenti di progettazione all'avanguardia è stato possibile mettere a punto ed analizzare il funzionamento di una linea di test per tank ad idrogeno per simulare ciò che accade effettivamente in una stazione di rifornimento.

In questo elaborato verrà descritto ed analizzato il processo di riempimento di bombole ad idrogeno (secondo la normativa dedicata SAE J2601), partendo dal circuito idropneumatico che permette di trasportare e convogliare l'idrogeno dai sistemi di stoccaggio fino al tank finale dell'utilizzatore.

Lo studio del processo sarà coadiuvato da simulazioni, da me effettuate, e partirà, in prima istanza, dallo sviluppo di fogli di calcolo programmabili, in Excel, con i quali verranno considerati, tramite l'utilizzo delle relative espressioni analitiche semplificate, tutti gli effetti e i fenomeni che caratterizzano il comportamento dell'idrogeno nel suo flusso dai serbatoi di stoccaggio al tank finale.

Per completare le analisi, saranno poi messe a punto delle nuove simulazioni mediante il software Amesim, che permetteranno di verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti in Excel e consentiranno di avere un quadro più completo di ciò che realmente accade durante il processo di carica delle bombole, per il fatto che, il software stesso, a differenza di Excel, ha già implementate al suo interno equazioni differenziali più adatte a descrivere il fenomeno.



## ABSTRACT

In recent decades, the growing concern for the level of environmental pollution, mainly located in large urban areas, has led the governments of largest and most powerful states in the world to study and take measures to control emissions, especially with regard to cars, but, in general, for all vehicles in circulation.

Motor vehicles, powered by petrol and diesel, are the primary source of carbon dioxide ( $CO_2$ ) emissions and of all those polluting chemical compounds that are responsible for the increase in the greenhouse effect and the formation of smog and ozone at the level of the earth's surface.

It is now widely established that urban pollution problems could be mitigated by replacing a substantial part of cars powered by internal combustion engines with electric vehicles.

Effectively, in the early stage of manufacturing passenger cars, the obvious choice was to power the vehicle with an electric motor. The latter was then immediately supplanted by the internal combustion one which, at the time, guaranteed greater speed, was cheaper and able to ensure greater mileage.

Nowadays, air pollution has now reached levels that dramatically confirm that emissions from cars, fueled by petrol and diesel, represent an high risk both for the health of the population and for the environment and therefore the concept of zero-emission electric vehicle has regained interest, also due to the fact that technology has made it possible to achieve great goals and results in this field.

In principle, the electric motor can be powered by a battery. However, existing batteries (such as lead-acid, nickel-cadmium or nickel-metal hydride), in addition to being very heavy, have a limited power and energy content, so much so that they are not able to ensure a long life and make the electric vehicle interesting for the consumer. Further disadvantages reside, on the other hand, in the long time required to recharge the batteries and in the problem of their disposal once they reach the end of their life.



Considering these aspects, fuel cells appear ideal as alternative energy sources for electric vehicles.

The “hydrogen” fuel used by the cells, in combination with oxygen, to produce electricity, can be recharged through a refuelling station, in a very short time, and stored in tanks, installed on board the vehicle.

Thanks to its use, therefore, any source of pollution is eliminated and refuelling does not differ much, in terms of timing, from what happens with cars fueled with natural gas (methane, LPG).

Furthermore, the energy and power of a fuel cell can be adequate to ensure driving performance that, even if not yet fully comparable to that of internal combustion vehicles, can nevertheless make the electric vehicle attractive for a wide range of users. For this reason, numerous government and private projects, aimed at the use of fuel cell as power system for cars, are now being implemented and some of these have already led to the creation of prototypes.

Currently, the problem that still limits the production of hydrogen cars on a large scale is mainly linked to three factors: the technology of production of fuel cells, the cost of hydrogen production and the methods of storing and refuelling the fuel inside of special cylinders.

Regarding the first aspect, car manufacturers are making great efforts to improve the structure and performance of fuel cells in order to obtain performance similar to internal combustion engines; all with good energy efficiency (currently we have about the 50% of energy lost in the transition from hydrogen to electricity).

The real problems, therefore, relying on the enormous technological developments in the sector in question, we can say that they fall into the other two aspects.

On a global scale, the sustainable production of hydrogen, therefore without the use of hydrocarbons, takes place through electrolysis, a process that requires electricity to be supplied to one or more electrolytic cells to split water into hydrogen and oxygen. The small quantity of hydrogen produced by electrolysis, due to the low production efficiency (about 30% of energy is lost), means that, even more so in these last months of serious energy crisis, this process requires use of renewable energy sources.

Germany, Holland and other northern European countries, from this point of view, are investing heavily and have already launched and produced the first completely self-

sufficient hydrogen refuelling stations. Located near waterways, they use the latter as the main element for electrolytic cells which, with the help of electricity produced through renewable sources (solar and wind energy), allows to obtain a good quantity of hydrogen to be stored, to be then used in the filling of cylinders, housed in the means of transport.

With the hope that technology and the conversion of electricity production to renewable sources will become increasingly popular in the following years, the great problem remains how to safely fill the hydrogen tanks housed in vehicles.

Yes, it is precisely the physicochemical characteristics of hydrogen that make this gas different, in its behavior, from others already used in the field of propulsion and for this reason it is necessary to take the necessary precautions during its use.

It is precisely in this area that the study and experimentation work of the Loccioni company fits, which in recent months has been investing resources in the design of automatic test system for hydrogen cylinders. Thanks to the availability of state-of-the-art software and design tools, it was possible to fine-tune and analyze the operation of hydrogen tank test line to simulate what actually happens in a refuelling station.

In this paper, the process and methods of filling tank will be described and analyzed (according to the dedicated SAE J2601 standard), starting from the hydro-pneumatic circuit, which allows the transport and conveyance of hydrogen from the storage systems to the final tank of the user.

The study of the process will be supported by simulations, carried out by me, and will start, in the first instance, from the development of programmable spreadsheets, in Excel, with which all the effects will be considered, through the use of the relative simplified analytical expressions, all the effects and phenomena which characterize behavior of hydrogen in its flow from the storage to the final tank. To then complete the analyzes, new simulations will then be developed using Amesim software, which allow to verify the reliability of the results obtain in Excel and will allow to have more complete picture of what really happens during the charging process of the tank, due to the fact that the software itself, unlike Excel, has already implemented within it differential equations more suitable to described the phenomenon.



# INDICE

SOMMARIO.....	3
ABSTRACT.....	8
ELENCO DELLE TABELLE.....	15
ELENCO DELLE FIGURE.....	17
ACRONIMI ED ABBREVIAZIONI.....	21
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI.....	24
CAPITOLO 1 "NORMA SAE J2601".....	28
1.1 Introduzione alla norma ed ambito di utilizzo.....	28
1.2 Descrizione generale del protocollo di rifornimento.....	31
1.2.1 Obiettivi del rifornimento.....	32
1.2.2 Confini operativi.....	33
1.2.3 Fenomeni associati al rifornimento.....	34
1.3 Metodi per la scelta della rampa di pressione.....	38
1.3.1 Calcolo della rampa di pressione tramite metodo delle tabelle.....	39
1.3.2 Calcolo della rampa di pressione per ogni categoria di CHSS.....	44
1.3.3 Calcolo di parametri aggiuntivi utili al rifornimento.....	44
1.4 Modello di simulazione del riempimento .....	48
CAPITOLO 2 "ANALISI DELLA LINEA DI TEST".....	53
2.1 Introduzione al problema.....	53
2.2 Descrizione generale del circuito.....	55
2.2.1 Linea di alimentazione.....	57
2.2.2 Linea di test.....	58
2.3 Analisi e ricerca dei componenti più idonei.....	59
2.3.1 Tubazioni.....	60
2.3.2 Sistema di compressione.....	60

2.3.3 Serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno.....	61
2.3.4 Riduttore di pressione.....	62
2.3.5 Scambiatori di calore.....	64
2.3.6 Valvole a 2-vie.....	65
2.3.7 Valvole di sicurezza o di massima.....	66
2.3.8 Flussimetri.....	67
2.3.9 Sensori.....	68
CAPITOLO 3 "ANALISI DEL PROCESSO TRAMITE EXCEL".....	71
3.1 Introduzione al modello di analisi tramite Excel.....	71
3.2 Calcolo dei parametri iniziali di simulazione.....	73
3.2.1 Perdite di carico concentrate.....	73
3.2.2 Perdite di carico distribuite lungo le tubazioni.....	76
3.2.3 Rampa di pressione del rifornimento.....	79
3.2.4 Flusso termico sul tank.....	84
3.3 Impostazione del foglio di calcolo Excel.....	88
3.3.1 Tabella dei parametri iniziali.....	88
3.3.2 Tabella di calcolo delle perdite di carico.....	89
3.3.3 Tabella di simulazione.....	91
3.4 Simulazione del processo di rifornimento.....	99
3.4.1 Ricarica senza rampa di pressione.....	101
3.4.2 Ricarica con rampa di pressione.....	114
3.4.3 Differenze tra i due processi.....	120
3.5 Estensione del modello in Visual Basic (VBA).....	124
3.5.1 Variazione dei parametri della linea di test.....	127
CAPITOLO 4 "ANALISI DEL PROCESSO TRAMITE AMESIM".....	131
4.1 Introduzione ad Amesim Simcenter.....	131
4.1.1 Caratteristiche del software e librerie.....	131
4.1.2 Descrizione degli step di sviluppo di una simulazione.....	133
4.2 Implementazione del circuito idraulico nel software.....	134
4.2.1 Scelta dei componenti ed impostazione dei parametri.....	135
4.2.2 Analisi dei segnali per il controllo del processo.....	143
4.3 Simulazione del processo di riempimento.....	147
4.3.1 Parametri di simulazione.....	148

4.3.2 Analisi dei risultati.....	149
4.3.3 Confronto con i risultati Excel.....	153
4.4 Simulazione del processo con HTV nel circuito.....	156
4.4.1 Modifica del circuito idraulico.....	158
4.4.2 Analisi dei risultati della nuova configurazione.....	159
4.4.3 Confronto con i grafici ricavati da studi del cliente.....	163
CONCLUSIONI.....	166
BIBLIOGRAFIA.....	169

## ELENCO DELLE TABELLE

*Tabella 1 – Categorie normate di CHSS in funzione della classe di pressione*

*Tabella 2 – Categorie di temperatura di mandata del carburante per classe di pressione*

*Tabella 3 - Casi di utilizzo della SAE J2601 e futuri sviluppi*

*Tabella 4 - Esempio di tabella di ricerca per un rifornimento H70-T40 con comunicazione per un CHSS di categoria B*

*Tabella 5 - Scelta della rampa di pressione per date condizioni al contorno*

*Tabella 6 - Esempio di tabella di ricerca che identifica il processo di interpolazione lineare attuato dalla stazione di rifornimento*

*Tabella 7 - Calcolo delle perdite di carico distribuite lungo una tubazione*

*Tabella 8 - Calcolo della rampa di pressione per il banco di test secondo la norma SAE J2601*

*Tabella 9 - Tabella per un rifornimento H70-T40 con comunicazione (categoria D)*

*Tabella 10 - Calcolo delle superfici di scambio termico per il tank*

*Tabella 11 - Calcolo della resistenza termica totale*

*Tabella 12 - Esempio di tabella dei parametri iniziali di riempimento*

*Tabella 13 - Calcolo delle perdite di carico totali lungo la linea di test*

*Tabella 14 - Tabella di simulazione: colonne da 1 a 8*

*Tabella 15 - Tabella di simulazione: colonne da 9 a 15*

*Tabella 16 - Tabella di simulazione: colonne da 16 a 21*

*Tabella 17 - Tabella di simulazione: colonne da 22 a 27*

*Tabella 18 - Configurazione del piping, parametri delle valvole e temperature di test per il rifornimento simulato*

*Tabella 19 - Caratteristiche dell'idrogeno, del tank, degli storage e parametri di simulazione per il rifornimento testato*

*Tabella 20 - Processo di minimizzazione del salto di pressione monte-valle tra storage e tank del cliente*

*Tabella 21 - Simulazione rifornimento completo senza rampa di pressione: parametri finali di interesse*

*Tabella 22 - Simulazione rifornimento completo con rampa di pressione: parametri finali di interesse*

*Tabelle 23/24 - Confronto parametri finali tra rifornimento con o senza rampa di pressione*

*Tabella 25 - Foglio di impostazione dei parametri iniziali della simulazione*



## ELENCO DELLE FIGURE

- Figura 1 - Profilo di pressione e temperatura durante il rifornimento*
- Figura 2 - Confini operativi per un rifornimento H70 secondo la SAE J2601*
- Figura 3 - Diagramma dettagliato del rifornimento con idrogeno*
- Figura 4 - Ugello per rifornimento*
- Figura 5 - Dettaglio del collegamento al veicolo*
- Figura 6 - Unica stazione ad idrogeno in Italia (inaugurata a Bolzano nel 2014)*
- Figura 7 - Corridoio di tolleranza della rampa media di pressione*
- Figura 8 - Corridoio di pressione per CHSS di categoria A, B, C*
- Figura 9 - Corridoio di pressione per CHSS di categoria D*
- Figura 10 - Schema del modello di simulazione del riempimento di un tank  
secondo la norma SAE J2601*
- Figura 11 - Rappresentazione del pacco bombole da testare*
- Figura 12 - Schema fluidico della linea di alimentazione*
- Figura 13 - Schema fluidico della linea di test*
- Figura 14 - Tubazioni e raccordi utilizzati*
- Figura 15 - Simbolo fluidico del sistema di compressione*
- Figura 16 - Schema compressore Atlas Copco*
- Figura 17 - Schema fluidico del serbatoio di stoccaggio a bassa pressione*
- Figura 18 - Simbolo fluidico del riduttore di pressione*
- Figure 19/20 - Riduttore di pressione a comando pneumatico (TESCOM)*
- Figura 21 - Schema degli scambiatori di calore in equicorrente*
- Figura 22 - Scambiatore di calore K°Bond (Kelvion)*
- Figure 23/24 - Simbolo valvole 2-vie (normalmente aperta e normalmente chiusa)*
- Figure 25/26 - Valvola proporzionale 2-vie della Maximator*
- Figura 27 - Simbolo valvola di sicurezza o di massima*

*Figure 28/29 - Valvola di sicurezza per bassa/media pressione della Nuova  
General Instruments*

*Figura 30 - Simbolo fluidico di un flussimetro*

*Figura 31 - Flussimetro ad effetto Coriolis*

*Figura 32 - Pressostato*

*Figura 33 - Manometro*

*Figura 34 - Flussostato*

*Figura 35 - Schema fluidico degli interim storage aggiornato con le sigle dei  
componenti*

*Figura 36 - Schema fluidico della linea di alimentazione aggiornato con le sigle  
dei componenti*

*Figura 37 - Schema fluidico della linea di test aggiornato con le sigle dei  
componenti*

*Figura 38 - Esempio di grafico portata-pressione per la stima delle perdite di  
carico concentrate*

*Figura 39 - Diagramma di Moody*

*Figura 40 - Rifornimento senza rampa di pressione: andamento della portata  
massica nel tempo (carica con storage a 480 bar)*

*Figura 41 - Rifornimento senza rampa di pressione: andamento della pressione  
nel low pressure storage (a 480 bar)*

*Figura 42 - Rifornimento senza rampa di pressione: andamento della quantità  
di idrogeno presente nel low pressure storage (a 480 bar)*

*Figura 43 - Rifornimento senza rampa di pressione: andamento della pressione  
nel tank (carica con storage a 480 bar)*

*Figura 44 - Rifornimento senza rampa di pressione: andamento della quantità  
di idrogeno presente nel tank (carica con storage a 480 bar)*

*Figura 45 - Rifornimento senza rampa di pressione: andamento della  
temperatura nel tank (carica con storage a 480 bar)*

*Figura 46 - Rifornimento senza rampa di pressione: andamento delle variazioni  
di temperatura nel tank (carica con storage a 480 bar)*

*Figura 47 - Simulazione rifornimento completo senza rampa di pressione:  
andamento della portata massica*

- Figura 48 - Simulazione rifornimento completo senza rampa di pressione:  
andamento della temperatura del tank*
- Figura 49 - Simulazione rifornimento completo senza rampa di pressione:  
andamento della pressione nel tank*
- Figura 50 - Simulazione rifornimento completo senza rampa di pressione:  
andamento della quantità di idrogeno immessa nel tank*
- Figura 51 - Simulazione rifornimento completo con rampa di pressione:  
andamento della portata massica*
- Figura 52 - Simulazione rifornimento completo con rampa di pressione:  
andamento della temperatura del tank*
- Figura 53 - Simulazione rifornimento completo con rampa di pressione:  
andamento della pressione nel tank*
- Figura 54 - Simulazione rifornimento completo con rampa di pressione:  
andamento della quantità di idrogeno immessa nel tank*
- Figura 55 - Confronto grafici finali tra rifornimento con o senza rampa di  
pressione*
- Figura 56 - Script in Visual Basic per l'implementazione della routine di  
calcolo*
- Figura 57 - Librerie presenti in Amesim Simcenter*
- Figura 58 - Esempio di icone dei componenti per la libreria pneumatica*
- Figura 59 - Scelta tra le possibili configurazioni di una tubazione*
- Figura 60 - Caratteristiche dei fluidi coinvolti nel processo*
- Figura 61 - Particolare della realizzazione dello storage in Amesim*
- Figura 62 - Particolare della valvola proporzionale 2-vie*
- Figura 63 - Realizzazione della linea di alimentazione in Amesim*
- Figura 64 - Modello equivalente di flussimetro ad effetto Coriolis*
- Figura 65 - Modello di riduttore di pressione comandato tramite PID*
- Figura 66 - Modello di scambiatore di calore in equicorrente*
- Figura 67 - Realizzazione della linea di test in Amesim*
- Figura 68 - Modellazione del tank del cliente*
- Figura 69 - Logica di inseguimento della rampa di pressione*
- Figura 70 - Logica di lavoro dei serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno*

*Figura 71 - Logica di calcolo del SOC (state of charge)*

*Figura 72 – Schema completo del circuito in Amesim*

*Figure 73/74 – Impostazione parametri e avvio della simulazione*

*Figura 75 – Andamento della pressione degli storage e del tank*

*Figura 76 – Andamento della quantità di idrogeno presente negli storage*

*Figura 77 - Andamento della temperatura degli storage*

*Figura 78 – Andamento della portata massica in uscita dagli storage*

*Figura 79 – Andamento della temperatura del tank*

*Figura 80 – Andamento della massa di idrogeno nel tank e SOC*

*Figure 81/82 – Confronto grafici portata massica (Excel-Amesim)*

*Figure 83/84 - Confronto grafici temperatura tank (Excel-Amesim)*

*Figure 85/86 - Confronto grafici massa di H<sub>2</sub> nel tank (Excel-Amesim)*

*Figura 87 – Curve tipiche del processo di rifornimento (norma SAE J2601)*

*Figura 88 – Hydrogen Tank Valve (HTV)*

*Figura 89 – Schema del circuito modificato in Amesim*

*Figura 90 – Andamento della pressione degli storage e del tank (nuova configurazione)*

*Figura 91 – Andamento della quantità di idrogeno presente negli storage (nuova configurazione)*

*Figura 92 - Andamento della temperatura degli storage (nuova configurazione)*

*Figura 93 – Andamento della portata massica in uscita dagli storage (nuova configurazione)*

*Figura 94 - Andamento della portata massica di idrogeno in ingresso al tank (nuova configurazione)*

*Figura 95 - Andamento della temperatura del tank (nuova configurazione)*

*Figura 96 – Andamento della massa di idrogeno nel tank e SOC (nuova configurazione)*

*Figure 97/98 – Confronto grafici pressioni (Amesim/Cliente)*

*Figure 99/100 - Confronto grafici portata massica al tank (Amesim/Cliente)*

*Figure 101/102 - Confronto grafici temperatura e SOC (Amesim/Cliente)*

*Figura 103 – Ciclo dell'idrogeno: dalla produzione alla propulsione*

## ACRONIMI ED ABBREVIAZIONI

APRR	<i>Average Pressure Ramp Rate</i> [MPa/min]: valore della rampa media di pressione
<i>APRR<sub>actual</sub></i>	Valore dell'APRR ricavato dalle tabelle [MPa/min]
<i>APRR<sub>calculated</sub></i>	Valore dell'APRR calcolato attraverso formule empiriche
<i>APRR<sub>target</sub></i>	APRR obiettivo [MPa/min]: valore della rampa di pressione che deve essere raggiunto durante il rifornimento
CHSS	Compressed Hydrogen Storage System (nella norma rappresenta il termine tecnico per indicare la bombola o il tank)
H <sub>2</sub>	Hydrogen (idrogeno)
HTV	Hydrogen Tank Valve
MOP	<i>Maximum Operating Pressure</i> : è la più alta pressione relativa del sistema durante la normale operazione di rifornimento
MP	Pressione dell'idrogeno misurata all'interno del CHSS
MT	Temperatura dell'idrogeno misurata all'interno del CHSS
<i>m<sub>startup</sub></i>	Massa o quantità di idrogeno fornita durante lo startup time
NWP	<i>Nominal Working Pressure</i> : è la pressione relativa che caratterizza le operazioni di pressurizzazione delle bombole durante il rifornimento
PRV	Pressure Relief Valve: valvola di sicurezza situata in ingresso bombola
<i>P<sub>0</sub></i>	Pressione iniziale nel CHSS misurata dalla stazione immediatamente dopo l'impulso di connessione
<i>P<sub>startup</sub></i>	Pressione misurata al termine dello startup time
<i>P<sub>station</sub></i>	Pressione dell'idrogeno fornito dalla stazione
<i>P<sub>target</sub></i>	Pressione definita dal protocollo di rifornimento al termine della ricarica

$P_{vehicle}$	Pressione dell'idrogeno all'interno del CHSS
SOC	<i>State Of Charge</i> : è il rapporto tra la densità dell'idrogeno nel CHSS con quella calcolata alla pressione NWP ed alla temperatura di 15 °C
$T_{amb}$	Temperatura ambiente
$T_{fuel}$	Temperatura dell'idrogeno fornito istante per istante dalla stazione
$T_{vehicle}$	Temperatura media dell'idrogeno all'interno del CHSS
TV	Volume del tank



# INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Il lavoro di studio e di sperimentazione, che andrò a descrivere in questo elaborato, nasce dalla curiosità e dal fascino che ha rappresentato in me, in questi ultimi anni di università, il tema dell'idrogeno.

Tutto il pianeta è alla ricerca di soluzioni alternative ai motori a combustione interna, in quanto è appurato che influiscono negativamente sui cambiamenti climatici ed ambientali e penso che la propulsione ad idrogeno possa essere, negli anni a seguire, una valida alternativa.

Per questo motivo, non appena l'impresa Loccioni mi ha proposto di analizzare e studiare il comportamento di una linea di test per bombole ad idrogeno, collocate su autoveicoli e mezzi pesanti, ho subito accettato con entusiasmo ed ho iniziato ad informarmi su questa tematica, leggendo in rete articoli scientifici e report su attività di sperimentazione.

La cosa che accomuna il pensiero di tanti studiosi che hanno realizzato pubblicazioni su questo tema, è che l'idrogeno, che di per sé rappresenta uno degli elementi più semplici dal punto di vista della struttura atomica, nel suo utilizzo a livello industriale, nasconde molte insidie ed incognite, a maggior ragione quando, come accade nella ricarica di bombole e tank, ci si spinge a temperature e pressioni molto elevate.

Per questo motivo, nel Maggio del 2020, è stata pubblicata la norma "SAE J2601" che va a regolamentare le caratteristiche che un impianto di rifornimento ad idrogeno deve necessariamente avere affinché la carica dei tank avvenga in sicurezza.

Considerando l'attuale tecnologia costruttiva delle bombole, arrivate già alla quarta generazione (type IV in composito in fibra di carbonio con rivestimento in polimero termoplastico), per salvaguardare la loro integrità strutturale, la norma prescrive che queste, al termine del processo di carica, abbiano una pressione massima all'incirca di 875 bar con una temperatura massima di 85 °C. Naturalmente futuri aggiornamenti



della norma, cavalcando l'onda del progresso tecnologico nella costruzione dei tank, potranno fissare questi limiti a valori sempre più alti per consentire un riempimento e quindi un'autonomia maggiore delle bombole.

Allo stato attuale, però, l'impianto di rifornimento, con i relativi componenti, deve essere progettato per rispettare questi limiti al termine del processo di riempimento del tank ed è stato mio compito ed oggetto di studio in questi mesi di tirocinio verificare tramite simulazioni, prima in Excel e poi su Amesim (software della Siemens per la modellazione e l'analisi di sistemi multidominio), l'andamento delle varie grandezze nell'impianto durante il rifornimento, per poi confrontarle con quelle prescritte dalla norma.

Per questo motivo, dopo aver letto e studiato in modo approfondito la norma SAE J2601, di cui parlerò all'interno del primo capitolo, mi sono occupato dell'analisi dell'impianto e della linea di test per studiarne il funzionamento e per ricercare, attraverso i diversi cataloghi dei fornitori, quali fossero i componenti più idonei al caso in esame, tenendo conto dei range di temperatura e pressione raggiunti all'interno del circuito stesso.

Terminata la fase iniziale di ricerca e di scelta di tutti i componenti che fanno parte del circuito e ricavata la rampa di pressione, che, come vedremo in seguito, rappresenta un elemento necessario da conoscere per la ricarica di bombole ad idrogeno, ho iniziato ad impostare il lavoro di simulazione del processo di rifornimento su fogli Excel, di cui parlerò in modo approfondito nel capitolo 3, implementando, attraverso le opportune formule, le leggi fisiche che influenzano la carica dei tank.

Ottenuta una prima simulazione di massima, per una data configurazione iniziale del "piping" e del circuito idraulico in generale, ho realizzato uno script di codice in Visual Basic con l'intento di ottenere un file Excel che, impostata una configurazione desiderata, calcolasse in modo automatico le grandezze di interesse ed i grafici richiesti durante il corso del rifornimento.

Con l'ausilio di questo file di programmazione, ho avuto quindi la possibilità di collaudare più configurazioni del circuito in modo molto veloce riuscendo ad ottenere quella che permettesse una carica di una maggiore quantità di H<sub>2</sub> all'interno del tank,

in tempi relativamente veloci e con temperature e pressioni che non risultassero troppo elevate.

L'ultima parte di analisi del processo di riempimento dei tank ha riguardato invece lo sviluppo di simulazioni sulla linea di test all'interno del software Amesim. Nel quarto capitolo parlerò infatti delle caratteristiche del software e di come è stato implementato il circuito idraulico al suo interno. Sempre nella stessa sezione, una volta messo a punto il processo di simulazione, si otterranno i relativi grafici che, confrontati prima con quelli realizzati in Excel e poi con quelli forniti dalla norma, permetteranno di valutare eventuali differenze di prestazioni del circuito e di validare l'intero processo di rifornimento.



# CAPITOLO 1

## “NORMA SAE J2601”

### 1.1 Introduzione alla norma ed ambito di utilizzo

La norma SAE J2601, pubblicata nel Maggio 2020, stabilisce il protocollo ed i limiti nel processo di riempimento di bombole con idrogeno gassoso per l'utilizzo su veicoli industriali e mezzi di trasporto.

Questi confini operativi insiti nel processo di rifornimento, riguardanti la temperatura di mandata e la portata massima in ingresso dell'idrogeno, l'aumento di pressione nella bombola e la pressione finale nella bombola stessa al termine della carica, sono influenzati da molteplici fattori quali la temperatura ambiente, la temperatura di erogazione del carburante e la pressione iniziale nel sistema di stoccaggio dell'idrogeno compresso del veicolo (anche detto CHSS o, per semplicità, tank).

Per quanto riguarda i protocolli di rifornimento per bombole ad idrogeno, che permettono di scegliere la rampa di pressione idonea alla ricarica e che saranno ulteriormente approfonditi in seguito, la SAE J2601 ne autorizza l'applicazione di due differenti tipologie: la prima, detta “*Metodo delle Tabelle*”, è basata su un approccio tramite tabelle di ricerca (dette *look-up table*) ed utilizza una rampa di pressione fissa da imprimere al tank durante la carica, mentre la seconda, detta “*MC Formula*”, basata su formule termodinamiche, utilizza una rampa di pressione dinamica calcolata in funzione di dati provenienti dal tank durante tutto il processo di riempimento.

A prescindere da questi aspetti, che saranno ampiamente analizzati nei paragrafi successivi, la norma, in primo luogo, classifica il rifornimento basandosi sulle caratteristiche del tank e della stazione.

Considerando l'attuale tecnologia costruttiva delle bombole, arrivate già alla quarta generazione (type IV in materiale composito in fibra di carbonio con rivestimento in

polimero termoplastico), per salvaguardare la loro integrità strutturale e per unificare la loro produzione ed il conseguente processo di riempimento, la norma prescrive due livelli di pressione che il tank, a pieno carico e una volta che l'idrogeno al suo interno si è riportato a temperatura ambiente, deve avere.

Questi livelli unificati di pressione sono classificati dalla norma tramite la lettera "H" e le due tipologie esistenti, al momento, sono la H35 e la H70, che rappresentano, rispettivamente, il valore pressione di 35 MPa (350 bar) e 70 MPa (700 bar) a rifornimento effettuato ed in condizioni di equilibrio termodinamico con l'ambiente esterno (fissato da norma a 15 °C). Naturalmente, considerando la legge di stato dei gas reali, se l'ambiente esterno si trovasse ad una temperatura differente da quella prescritta dalla SAE, anche la pressione finale subirebbe una variazione dal valore standard, secondo una relazione inversamente proporzionale alla temperatura.

Partendo, dunque, dalla classe di pressione della bombola, considerando il volume disponibile o la quantità di idrogeno che può essere introdotta, la SAE qualifica il tank con una lettera che va dalla A alla D e che rappresenta il codice identificativo della categoria alla quale appartiene.

Questo codice, che permette di individuare la fascia di volume disponibile per il riempimento in funzione del livello di pressione raggiungibile, è un parametro che la stazione di rifornimento deve necessariamente conoscere prima di procedere con la ricarica di idrogeno.

La tabella che segue elenca la categoria di appartenenza del CHSS per un dato livello di pressione e di volume occupabile dell'idrogeno compresso.

Pressure Class	Total Amount of Hydrogen in CHSS at 100% SOC (kg)	Water Volume of CHSS (L)	CHSS Capacity Category Identifier
H35	1.19 to 2.39	49.7 to 99.4	A
H35	2.39 to 4.18	99.4 to 174.0	B
H35	4.18 to 5.97	174.0 to 248.6	C
H70	2.00 to 4.00	49.7 to 99.4	A
H70	4.00 to 7.00	99.4 to 174.0	B
H70	7.00 to 10.00	174.0 to 248.6	C
H70	>10.00	>248.6	D

*Tabella 1 – Categorie normate di CHSS in funzione della classe di pressione*

Definite le modalità con le quali la stazione di rifornimento riesce a risalire alle caratteristiche del tank, un altro importante fattore, che influenza notevolmente le performance del rifornimento con idrogeno, è rappresentato dalla capacità, da parte

della stazione stessa, attraverso opportuni scambiatori di calore, di raffreddare l'idrogeno, in modo da assicurarsi di avere una temperatura di immissione del combustibile all'interno del tank che non porti ad un eccessivo surriscaldamento della bombola stessa.

La norma suggerisce tre differenti classi di temperatura alla quale può essere fatto il rifornimento, denominate con lettera "T" (ad esempio T40 sta a significare che l'idrogeno è portato circa alla temperatura di -40 °C). Le classi che, al momento, sono normate dalla SAE J2601 sono la T40, T30 e T20, quindi rispettivamente con temperatura di refrigerazione di -40 °C, -30 °C, -20 °C.

Fuel Delivery Temperature Category		$-40\text{ °C} \leq T_{fuel} \leq -33\text{ °C}$	$-33\text{ °C} < T_{fuel} \leq -26\text{ °C}$	$-26\text{ °C} < T_{fuel} \leq -17.5\text{ °C}$	$-40\text{ °C} \leq T_{fuel} \leq -26\text{ °C}$	$-40\text{ °C} \leq T_{fuel} \leq -17.5\text{ °C}$
Station Designator	35 MPa NWP	H35-T40	H35-T30	H35-T20	N/A	N/A
	70 MPa NWP	H70-T40/H70-T40D	H70-T30	H70-T20	H70-T30D	H70-T20D

**Tabella 2 – Categorie di temperatura di mandata del carburante per classe di pressione**

Future versioni ed aggiornamenti della norma potranno incorporare temperature di immissione dell'idrogeno meno spinte come -10 °C o, addirittura, a temperatura ambiente e che, probabilmente, potranno essere utilizzate per motocicli o altre applicazioni che hanno bombole con volumi inferiori.

La seguente tabella, in funzione della classe di pressione, della categoria di CHSS e della temperatura di refrigerazione dell'idrogeno, illustra gli ambiti di applicazione della SAE J2601 e i potenziali settori di sviluppo per future revisioni della norma.

Pressure Class Designation		H35			H70		
CHSS Capacity Range (Liters)		< 49.7	49.7 to 248.6	> 248.6	< 49.7	49.7 to 248.6	> 248.6
CHSS Capacity Range (kg)		< 1.19	1.19 to 5.97	> 5.97	< 2.0	2.0 to 10.0	> 10.0
CHSS Capacity Categories (nomenclature)		TBD	A, B, C	D	TBD	A, B, C	D
Maximum Flow Rate (g/s)		≤ 60	≤ 60	≤ 60	≤ 60	≤ 60	≤ 60
Fuel Delivery Temperature Category	T40	Not Included	Included	Not Included	Included		
	T30						
	T20		Fut. dev.		Future developments		
	T10						
	Ambient						

**Tabella 3 – Casi di utilizzo della SAE J2601 e futuri sviluppi**

## 1.2 Descrizione generale del protocollo di rifornimento

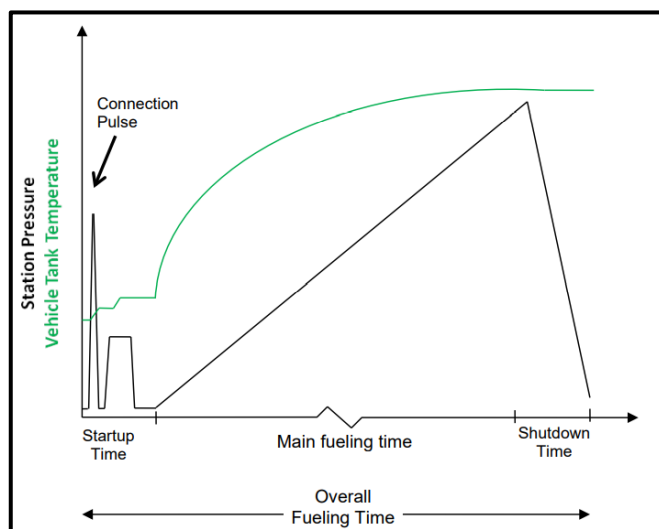
Come si è visto nel paragrafo precedente, precisamente nella *Tabella 1*, la norma SAE J2601 stabilisce il protocollo di rifornimento con idrogeno gassoso per veicoli che hanno un CHSS con capacità compresa tra 49,7 L e 248,6 L, per la classe di pressione H35, e al di sopra di 49,7 L, senza limiti di volume, per la classe H70, il tutto considerando una portata massica massima di 60 g/s.

Lo standard presuppone che una stazione esegua il rifornimento a partire dai suoi depositi, detti anche serbatoi di stoccaggio (a bassa, media ed alta pressione), fino ad arrivare al veicolo, questo solo dopo aver perfezionato la connessione col CHSS del veicolo in questione e dopo aver completato i controlli iniziali. La stazione di rifornimento è responsabile del controllo del processo di carica per fare in modo che si ricada all'interno di confini operativi che saranno descritti in seguito.

Le variabili che influiscono sul processo di rifornimento includono:

- Temperatura ambiente;
- Classe di pressione dell'erogatore;
- Dimensioni, forma, proprietà, temperatura e pressione iniziale del CHSS;
- Perdita di carico tra erogatore e veicolo;
- Calore trasferito.

La seguente figura mostra il profilo di pressione della stazione (in nero) e quello di temperatura del tank (in verde) durante il rifornimento.



**Figura 1 – Profilo di pressione e temperatura durante il rifornimento**

Il profilo si compone inizialmente di un tempo di avvio (*startup time*) che comincia una volta collegata la “pistola” della stazione di rifornimento al veicolo. Il corretto collegamento tra i due elementi è rappresentato da un impulso di pressione, detto *connection pulse*. Durante il tempo di avvio, la stazione misura la pressione iniziale del tank, determina la categoria di appartenenza del CHSS ed infine verifica la presenza di eventuali perdite.

Il rifornimento vero e proprio inizia quando il gas comincia a fluire nel veicolo. Durante questo periodo, aumentano sia la pressione che la temperatura all’interno del tank.

Per questo motivo, il protocollo di riempimento deve essere progettato in modo tale che il CHSS non superi la temperatura massima di esercizio in nessun istante durante la ricarica (fissata, per l’attuale tecnologia costruttiva delle bombole, a 85 °C).

La fase finale è quella di arresto che si verifica solo dopo che l’idrogeno ha smesso di fluire e termina nel momento in cui l’utente disconnette l’ugello dal veicolo.

### 1.2.1 Obiettivi del rifornimento

In generale, l’obiettivo della SAE J2601 è quello di consentire un rifornimento di idrogeno ad alta densità nel più breve tempo possibile, rimanendo comunque all’interno dei limiti di processo. L’obiettivo finale è quello di raggiungere uno stato di carica del tank, detto anche *State Of Charge* (SOC), compreso tra il 95 ed il 100% sotto qualsiasi condizione operativa.

Lo *State of charge* è ricavato mediante la seguente formulazione in funzione della densità (confronto tra le condizioni di esercizio e quelle standard):

$$SOC(\%) = \frac{\rho(P, T)}{\rho(NWP, 15^{\circ}C)} \times 100$$

Altro fattore da considerare nella ricarica delle bombole è che il tempo di rifornimento può variare ampiamente a seconda della temperatura ambiente, della pressione iniziale del CHSS, delle dimensioni del tank, del SOC e di altre condizioni.



Al fine di stabilire un tempo obiettivo di rifornimento, il team che ha stilato la SAE J2601, ha definito dei parametri di riferimento utili ad ottenere un riempimento ideale:

- Rifornimento categoria H70-T40
- Temperatura ambiente = 15 °C
- Capacità del CHSS = 49,7 L
- Pressione iniziale del CHSS = 10 MPa
- SOC finale  $\geq 95\%$

Sotto queste condizioni di riferimento, l'obiettivo, prescritto dalla norma, è che il tempo di rifornimento "principale" (esclusi i controlli iniziali) sia di 3 minuti o meno. Naturalmente lo scostamento dalle condizioni di riferimento, come può accadere per rifornimenti a temperature più elevate (T30 o T20) o per tank di dimensioni maggiori, fa sì che il tempo totale di ricarica sia maggiore rispetto ai 3 minuti citati dalla norma.

### 1.2.2 Confini operativi

I protocolli di rifornimento SAE J2601 sono progettati per garantire che l'idrogeno nel tank non si trovi al di fuori dei normali confini operativi. Questi limiti sono rappresentati della temperatura del CHSS e dalla MOP (Maximum Operating Pressure).

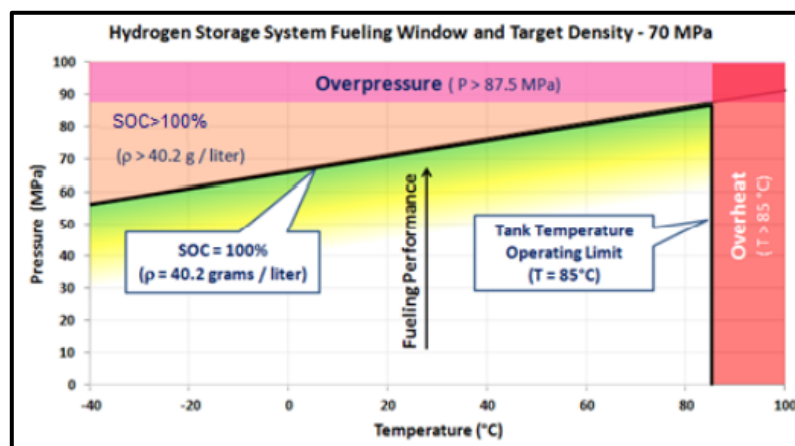


Figura 2 – Confini operativi per un rifornimento H70 secondo la SAE J2601

Per tank della classe di pressione H70, le temperature e pressioni limite sono rispettivamente da -40 °C ad 85 °C e da 0.5 MPa a 87.5 MPa (5-875 bar).

Come si nota in *Figura 4*, la temperatura massima del gas nel CHSS e la MOP sono limiti fissi.

A destra del grafico pressione/temperatura si trova la parte di surriscaldamento, mentre nella parte superiore è presente la zona di sovrappressione. La massima densità raggiungibile (corrispondente al 100% del SOC) rappresenta un limite addizionale per la ricarica.

Per mantenere il tank entro i suoi limiti operativi, la stazione deve regolare il flusso del gas a seconda delle condizioni iniziali note e delle condizioni al contorno introdotte nei paragrafi precedenti.

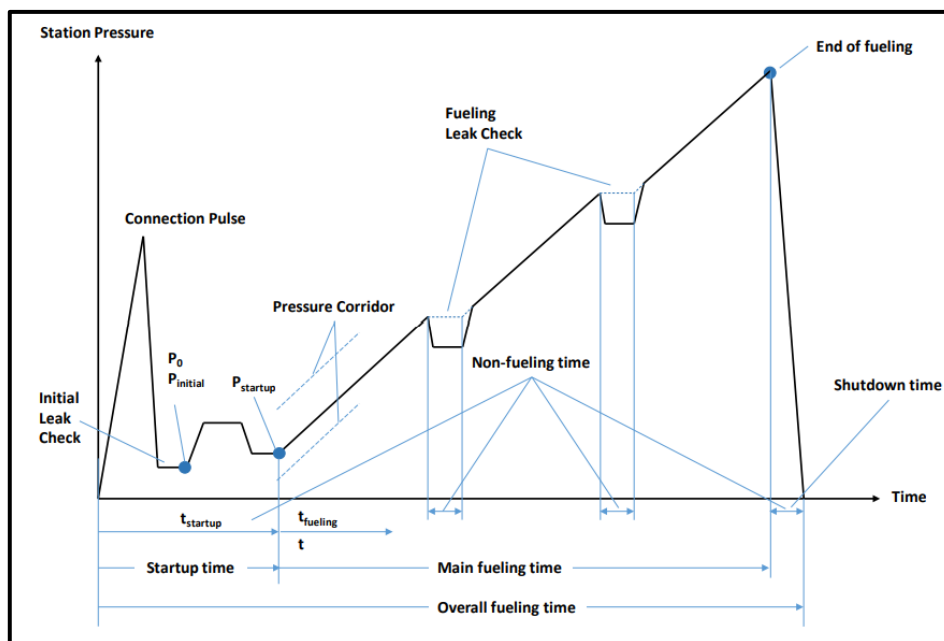
Ad esempio, se occorre effettuare il rifornimento in una giornata calda, la temperatura iniziale del CHSS potrebbe essere più alta di quella standard; la stazione deve quindi fare in modo di effettuare il riempimento più lentamente, per garantire che il CHSS non superi la temperatura massima di esercizio.

La velocità di rifornimento dipende dalla rampa di pressione applicata al CHSS, che è determinata in base alle condizioni iniziali e sarà ricavata attraverso uno dei due metodi introdotti in precedenza (*Metodo delle Tabelle* o *MC Formula*).

### **1.2.3 Fenomeni associati al rifornimento**

Entriamo ora nel dettaglio dei fenomeni che caratterizzano il rifornimento dei tank ad idrogeno, partendo dal momento in cui l'utente collega la "pistola" per la ricarica fino all'istante in cui quest'ultima viene scollegata dal veicolo.

Con l'ausilio del grafico pressione-tempo che segue (*Figura 3*), riferito alla stazione di rifornimento, ripercorriamo istante per istante ciò che accade nel processo di ricarica.



**Figura 3 - Diagramma dettagliato del rifornimento con idrogeno**

Prendendo in considerazione il tempo di ricarica, possiamo dire che il tempo totale necessario al rifornimento (*overall fueling time*), che rappresenta il tempo che intercorre tra il momento in cui l'utente collega l'ugello della stazione di rifornimento al veicolo, per iniziare la ricarica, e quello in cui quest'ultimo viene scollegato, include il tempo di avvio (*startup time*), il tempo di alimentazione (*main fueling time*) ed il tempo di spegnimento (*shutdown time*).



**Figura 4 – Ugello per rifornimento**



**Figura 5 – Dettaglio del collegamento al veicolo**

Lo *startup time*, che inizia dopo il collegamento dell'ugello per la ricarica e termina nel momento in cui inizia il flusso di idrogeno dalla stazione al tank, include:

- L'impulso di pressione iniziale (*connection pulse*): è dovuto alla connessione che si instaura tra stazione e veicolo. In particolare, in questa fase, viene inviata all'interno del circuito una piccola quantità di idrogeno che consente l'apertura della valvola di ritegno posizionata prima del tank. Lo scopo dell'impulso è quello di uguagliare, in condizioni statiche, la pressione della stazione con quella del CHSS in modo da poter misurare la sua pressione iniziale  $P_0$ ;
- La misurazione della pressione iniziale  $P_0$ ;
- La determinazione, da parte della stazione, della categoria del CHSS (A, B, C o D in base alla capacità e alla pressione);
- Il controllo iniziale di eventuali perdite nel circuito, che può essere effettuato pressurizzando il circuito di rifornimento e misurando eventuali diminuzioni della pressione (perdite di carico) anomale.

Il *main fueling time* rappresenta il periodo di tempo che intercorre tra l'inizio e la fine del rifornimento vero e proprio. In questo intervallo temporale la stazione, che tramite un'apposita metodologia, che definiremo in seguito, ha già stabilito quale sia la rampa di pressione che deve far seguire al tank (in base alle caratteristiche del tank e alle condizioni al contorno), inizia il flussaggio di idrogeno.

La curva di pressione segue un andamento particolare e soprattutto non continuo, dovuto al fatto che a monte del circuito sono presenti serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno a bassa, media ed alta pressione. Il processo di rifornimento segue, dunque, questa procedura:

- 1) All'inizio del riempimento entra in gioco il serbatoio di stoccaggio a bassa pressione che, partendo dalla  $P_{startup}$  della stazione, seguendo la rampa di pressione stabilita, flussa idrogeno verso il tank ancora vuoto grazie alla differenza di pressione esistente tra i due accumulatori.
- 2) Una volta che la pressione del tank ha raggiunto quella del serbatoio a bassa pressione, annullando il differenziale presente tra i due, quest'ultimo smette di flussare idrogeno ed inizia una breve fase di stallo del rifornimento. Durante

questa interruzione la stazione effettua un controllo sulle eventuali perdite del circuito (*fueling leak check*) che, se ha buon esito, fa proseguire il rifornimento.

- 3) Terminato il primo controllo sulle perdite, seguendo lo stesso ragionamento utilizzato per il serbatoio a bassa pressione, inizia a fluire idrogeno dal serbatoio a media pressione al tank fino all'esaurimento del  $\Delta P$  di pressione disponibile.
- 4) Segue un secondo controllo delle perdite del circuito.
- 5) Inizia il funzionamento del serbatoio di stoccaggio ad alta pressione che prosegue la ricarica fino al riempimento, o quasi, del tank (fissato intorno agli 875 bar).

Dalla *Figura 5* si può anche notare la presenza del *pressure corridor*, un intervallo di tolleranza all'interno del quale deve essere mantenuta la pressione della stazione e di conseguenza quella del tank. Una volta stabilita, da parte della stazione, la rampa di pressione che deve essere applicata durante il rifornimento, questa può non essere seguita fedelmente dal tank, istante per istante, ma la norma accetta che il livello di scostamento ricada all'interno di un certo intervallo di tolleranza che può essere calcolato tramite apposite formule.

Terminata la ricarica del tank inizia la fase dello *shutdown time*, un breve periodo di tempo grazie al quale la stazione di rifornimento viene depressurizzata molto velocemente in modo da permettere poi di scollegare l'ugello in modo sicuro.



**Figura 6 – Unica stazione ad idrogeno in Italia (inaugurata a Bolzano nel 2014)**

### 1.3 Metodi per la scelta della rampa di pressione

Il processo di carica dei tank, in generale, come accennato in precedenza, può essere influenzato da molteplici fattori di cui bisogna tener conto e su cui è necessario porre molta attenzione. Questi sono rappresentati principalmente dalla temperatura ambiente, dalla temperatura di immissione dell'idrogeno nel tank e dalla pressione iniziale del tank stesso all'inizio del riempimento.

In funzione di questi parametri fondamentali, la stazione di rifornimento, attraverso un'opportuna metodologia, seleziona la rampa di pressione più idonea da applicare per la carica del tank, in modo che questo, una volta terminato il processo, si trovi entro i limiti di pressione e temperatura prescritti dalla norma stessa.

Per quanto riguarda il metodo di selezione della rampa, la SAE J2601 stabilisce due protocolli standard basati su differenti approcci:

- Metodo delle tabelle: utilizzando delle tabelle di ricerca (look-up table), basate su condizioni al contorno note, permette di ricavare una rampa di pressione fissa che deve essere seguita dal tank durante tutto il riempimento;
- MC Formula: metodo basato su equazioni termodinamiche che permettono di ricavare una rampa di pressione che varia dinamicamente durante il tutto riempimento in funzione di parametri (pressione, temperatura, portata massica, capacità termica totale) ottenuti da opportuni sensori.

La principale differenza tra i due metodi sta nella complessità del secondo, quello che segue la MC Formula, il quale richiede l'impiego di specifiche bombole, non utilizzabili su tutti i veicoli, con al loro interno particolari sensori che consentono di inviare continui feedback alla stazione durante la carica. L'ulteriore difficoltà di applicazione risiede nel fatto che il metodo necessita di stazioni "intelligenti", dal costo e complessità superiori, per far sì che queste possano variare dinamicamente la rampa di pressione da applicare alla bombola.

Lo sviluppo di questa tecnologia, soprattutto in questi ultimi due anni, sta assumendo un'importanza notevole poiché è appurato che consente di ottenere un rifornimento migliore, non tanto in termini di riempimento, quanto a velocità di carica di ogni bombola.

Detto ciò, altro aspetto che occorre considerare è che entrambi i protocolli di scelta della rampa di pressione (metodo delle tabelle e MC Formula) permettono di effettuare il rifornimento con comunicazione o senza comunicazione di dati in merito all'andamento del processo.

Quello con comunicazione presuppone il fatto che, una volta collegata la “pistola” per il rifornimento, venga stabilita una connessione dati tra veicolo e stazione, mediante il quale, ad esempio, la stazione, nel caso in cui il tank sia pieno o ci siano problemi nella ricarica, interrompe il rifornimento. Al contrario, nel caso in cui non ci sia questa comunicazione dati, il rifornimento, note le condizioni iniziali e quelle al contorno e nota la rampa di pressione, procede senza che la stazione riceva feedback sul riempimento da parte del tank, ma tara il tempo di riempimento in base ai dati posseduti all'inizio del processo.

In questo elaborato verrà descritto ed applicato il protocollo di ricarica tramite metodo delle tabelle con comunicazione.

Il fatto che ci sia comunicazione dati sta diventando uno standard nei processi di rifornimento ad idrogeno in quanto determina una maggiore affidabilità e sicurezza del processo, con la possibilità di prevedere e riscontrare eventuali anomalie; il metodo delle tabelle, invece, è stato utilizzato per il fatto che, non possedendo il know-how sulla struttura e sulle logiche di funzionamento delle cosiddette “stazioni intelligenti”, per l'applicazione della MC Formula, risultava essere il protocollo più affidabile per condurre simulazioni, sia su Excel che su Amesim, che portassero a risultati di interesse e di rilievo.

### **1.3.1 Calcolo della rampa di pressione tramite metodo delle tabelle**


Il protocollo di rifornimento basato sulle tabelle di ricerca (*look-up tables*) utilizza, come parametri di ingresso, per la scelta della rampa di pressione più idonea alla ricarica di idrogeno, differenti grandezze quali la temperatura di mandata del

carburante da parte della stazione, la temperatura ambiente, la categoria di capacità del CHSS e la pressione iniziale del CHSS.

La modellazione di queste grandezze e del processo in generale è stata studiata per sviluppare una serie di tabelle con all'interno parametri che ottimizzano il processo di rifornimento garantendo, al contempo, che vengano rispettati i limiti operativi visti nelle sezioni precedenti.

La stazione, dunque, avvalendosi della temperatura di mandata del carburante (es. T40) e della categoria di capacità del CHSS (es. B) ma anche dell'informazione sull'assenza o presenza di comunicazione con il veicolo (rifornimento con o senza comunicazione) seleziona la corretta tabella di ricerca. La conoscenza della categoria di capacità del CHSS e della temperatura di mandata permette di ricavare in modo univoco la pressione finale che deve avere il tank al termine della ricarica.

Nel caso in esempio (Tabella 4) si ha che per un rifornimento T40 e per un CHSS di categoria B si avrà una pressione H70. Grazie a questi parametri, senza tralasciare il fatto che la stazione deve appurare se il rifornimento è con o senza comunicazione di informazioni, viene scelta, tra le tante esistenti, la tabella di ricerca corretta.

 <b>H70-T40 Capacity Category B comm</b>		APRR [MPa/min]	Target Pressure Target [MPa]	Target Pressure Top-Off [MPa]	Top-Off-APRR [MPa/min]	Target Pressure, $P_{target}$ [MPa]														
						Initial Tank Pressure, $P_0$ [MPa]														
						0,5 - 5 (no interpolation)					0,5	2	5	10	15	20	30	40	50	60
Ambient Temperature, $T_{amb}$ [°C]	>50	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
	50	5,1	78,2	87,5	2,6	see Top-Off	see Top-Off	80,8	85,7	86,8	86,5	85,8	85,0	84,0	82,7	81,1	no fueling	no fueling	no fueling	
	45	8,1	76,3	87,5	4,0	see Top-Off	see Top-Off	81,1	86,9	86,6	86,2	85,3	84,3	83,0	81,6	79,7	no fueling	no fueling	no fueling	
	40	11,5	73,2	87,5	5,4	see Top-Off	see Top-Off	81,1	86,9	86,4	85,9	84,7	83,5	82,0	80,3	78,3	no fueling	no fueling	no fueling	
	35	12,4	72,9	87,5	5,6	see Top-Off	see Top-Off	81,2	86,9	86,4	85,9	84,7	83,4	81,9	80,2	78,2	no fueling	no fueling	no fueling	
	30	15,3	70,6	87,5	6,6	see Top-Off	see Top-Off	81,0	86,8	86,3	85,6	84,3	82,8	81,2	79,4	77,2	no fueling	no fueling	no fueling	
	25	18,5	69,0	87,4	7,2	see Top-Off	see Top-Off	81,0	86,8	86,1	85,4	83,8	82,2	80,4	78,5	76,1	no fueling	no fueling	no fueling	
	20	21,8	67,9	87,4	7,6	see Top-Off	see Top-Off	81,2	86,8	85,9	85,1	83,3	81,5	79,6	77,5	75,1	no fueling	no fueling	no fueling	
	10	28,0	66,3	87,4	9,0	see Top-Off	see Top-Off	81,2	86,8	85,7	84,7	82,6	80,5	78,3	76,1	73,4	no fueling	no fueling	no fueling	
	0	28,5	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	78,4	84,6	86,8	85,6	84,4	83,1	80,6	78,1	75,6	73,1	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
	-10	28,5	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	82,2	87,1	86,4	85,2	84,0	82,8	80,4	77,9	75,4	72,9	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
	-20	28,5	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	86,0	86,8	86,1	84,9	83,7	82,4	80,0	77,6	75,1	72,7	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
	-30	28,5	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	86,8	86,5	85,7	84,5	83,3	82,1	79,6	77,2	74,9	72,5	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
	-40	28,5	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	86,5	86,2	85,4	84,2	83,0	81,8	79,3	77,0	74,6	72,3	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
	<-40	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	

**Tabella 4 - Esempio di tabella di ricerca per un rifornimento H70-T40 con comunicazione per un CHSS di categoria B**



Una volta selezionata la tabella di ricerca appropriata, la stazione determina la rampa media di pressione ( $APRR_{actual}$ ) e la pressione obiettivo ( $P_{target}$ ), in funzione dei parametri specifici dell'evento di alimentazione da realizzare come la temperatura ambiente, ricavata attraverso opportuni sensori posti sulla stazione, e la pressione iniziale del CHSS, determinata, durante il tempo di avvio (*startup time*), grazie al *connection pulse*.

Prendendo ad esempio nella *Tabella 5* una determinata temperatura ambiente di 20 °C, si ottiene in modo automatico la rampa di pressione  $APRR_{actual} = 21,8$  MPa/min (che viene solitamente espressa in bar/s, quindi  $APRR_{actual} = 3,63$  bar/s) poiché quest'ultima dipende esclusivamente dalla temperatura esterna. E' la combinazione tra temperatura ambiente e pressione iniziale del tank, ad esempio di 10 MPa, che permette di definire la  $P_{target}$ , in questo caso uguale ad 86,8 MPa (868 bar).

H70-T40 Capacity Category B comm	APRR [MPa/min]	Target Pressure $P_{target}$ [MPa]	Target Pressure Top-Off [MPa]	Top-Off- APRR [MPa/min]	Target Pressure, $P_{target}$ [MPa]														
		Initial Tank Pressure, $P_i$ [MPa]																	
		0,5 - 5 (no interpolation)			0,5	2	5	10	15	20	30	40	50	60	70	>70			
>50	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling		
50	78,2	87,5	2,6	see Top-Off	see Top-Off	80,8	86,8	86,5	85,8	85,0	84,0	82,7	81,1	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling		
45	76,3	87,5	4,0	see Top-Off	see Top-Off	81,1	86,6	86,2	85,3	84,3	83,0	81,6	80,3	78,7	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
40	73,2	87,5	5,4	see Top-Off	see Top-Off	81,1	86,4	85,9	84,7	83,5	82,0	80,3	78,3	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
35	72,9	87,5	5,6	see Top-Off	see Top-Off	81,2	86,4	85,9	84,7	83,4	81,9	80,2	78,2	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
30	79,6	87,5	6,6	see Top-Off	see Top-Off	81,0	86,3	85,6	84,3	82,8	81,2	79,4	77,2	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
25	69,0	87,4	7,2	see Top-Off	see Top-Off	81,0	86,1	85,4	83,8	82,2	80,4	78,5	76,1	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
20	21,8	86,8	86,8	86,8	86,8	86,8	86,8	85,9	85,1	83,3	81,5	79,6	77,5	75,1	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
15	28,0	86,3	87,4	9,0	see Top-Off	see Top-Off	81,2	86,8	85,7	84,7	82,6	80,5	78,3	76,1	73,4	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
0	28,5	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	79,4	84,6	86,8	85,6	84,4	83,1	80,6	78,1	75,6	73,1	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
-10	28,5	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	82,2	87,1	86,4	85,2	84,0	82,0	80,4	77,9	75,4	72,9	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
-20	28,5	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	86,0	86,8	86,1	84,9	83,7	82,4	80,0	77,6	75,1	72,7	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
-30	28,5	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	86,8	86,5	85,7	84,5	83,3	82,1	79,6	77,2	74,9	72,5	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
-40	28,5	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	86,5	86,2	85,4	84,2	83,0	81,8	79,3	77,0	74,6	72,3	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	
<-40	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	

**Tabella 5 - Scelta della rampa di pressione per date condizioni al contorno**

Per veicoli senza comunicazione, la stazione farà rifornimento in base alla rampa media di pressione ( $APRR_{actual}$ ) della tabella di ricerca fino a quando non viene raggiunto il valore obiettivo  $P_{target}$  della tabella stessa.

Per i veicoli con comunicazione verrà applicata la stessa rampa di pressione, con la differenza che la stazione ha la possibilità di utilizzare i dati del veicolo, compresa la

temperatura misurata sul CHSS, per calcolare il SOC e di conseguenza la quantità di idrogeno che permette di ottenere un SOC compreso tra il 95 % ed il 100 %.

Tuttavia, la  $P_{target}$  rappresenta il primo e più importante limite da rispettare: quindi se il tank raggiunge la sua  $P_{target}$ , per una data rampa di pressione, quando ancora il SOC < 95%, il rifornimento si interrompe ugualmente per evitare che si siano danneggiamenti alla struttura della bombola.

In generale i casi che si possono verificare in un rifornimento con comunicazione sono:

- SOC < 100% —> il rifornimento si interrompe al raggiungimento della  $P_{target}$  altrimenti prosegue fino ad arrivare al SOC massimo;
- SOC = 100% —> il rifornimento si interrompe anche se non è stata raggiunta la  $P_{target}$ .

La stazione, durante la scelta dei parametri di rifornimento ( $APRR_{actual}$  e  $P_{target}$ ), potrebbe anche trovarsi di fronte a condizioni al contorno intermedie tra i valori che sono classificati nelle tabelle di ricerca, come, ad esempio, una  $T_{amb}$  compresa tra 10°C e 20°C. Per risolvere questa problematica la stazione stessa ricava i parametri corretti per quel dato rifornimento attraverso un processo di interpolazione lineare.

Prendiamo come esempio la *Tabella 6* per descrivere il processo di interpolazione che attua la stazione per la ricerca dei giusti parametri data una  $T_{amb} = 18^\circ\text{C}$  ed una pressione iniziale del tank di 35 MPa.

H70-T40 4-7kg non- comm		Average Pressure Ramp Rate, APRR [MPa/min]	Target Pressure, $P_{target}$ [MPa]													
			Initial Tank Pressure, $P_i$ [MPa]													
			0,5	2	5	10	15	20	30	40	50	60	70	> 70		
Ambient Temperature, $T_{amb}$ [°C]	> 50	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
	50	5,1	77,8	77,6	77,3	76,9	76,6	76,2	75,7	75,3	74,7	73,9	72,8	no fueling	no fueling	no fueling
	45	8,1	76,3	77,2	76,9	76,5	76,4	76,2	75,6	75,3	74,7	73,9	72,7	no fueling	no fueling	no fueling
	40	11,5	73,2	75,6	76,8	76,3	76,4	76,2	75,6	75,3	74,6	73,9	72,7	no fueling	no fueling	no fueling
	35	12,4	72,9	75,3	76,4	76,0	76,1	75,9	75,3	75,1	74,5	73,8	72,7	no fueling	no fueling	no fueling
	30	15,3	70,6	73,9	75,8	75,2	75,4	75,1	74,3	74,1	73,3	72,4	71,3	no fueling	no fueling	no fueling
	25	18,5	69,0	72,8	75,1	74,5	74,7	74,3	73,3	73,0	72,0	71,1	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
	20	21,8	67,9	72,1	74,5	73,7	74,0	73,2	72,2	71,9	69,7	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
	10	28,0	66,3	71,1	74,1	73,2	72,4	70,9	70,9	69,6	66,9	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
	0	28,5	74,0	73,4	72,4	70,6	70,7	69,6	68,6	67,1	65,7	64,0	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
	-10	28,5	73,4	72,9	71,9	70,0	70,0	68,4	66,5	64,4	62,9	61,2	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
	-20	28,5	72,9	72,3	71,3	71,0	69,5	68,0	65,7	62,4	60,0	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
	-30	28,5	72,1	71,6	70,6	70,4	69,0	67,4	65,2	61,8	58,7	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
	-40	28,5	71,6	71,1	70,2	70,0	68,5	66,9	64,8	61,5	58,5	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
	< -40	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling

*Tabella 6 – Esempio di tabella di ricerca che identifica il processo di interpolazione lineare attuato dalla stazione di rifornimento*

Il processo di interpolazione, realizzato dalla stazione, può essere così descritto:

- 1) Ricerca dei valori estremi per date condizioni al contorno:
  - Per una temperatura ambiente di 18°C si considerano le caselle che corrispondono a 10°C e 20°C;
  - Per una pressione iniziale del CHSS di 35 MPa si considerano le caselle che corrispondono a 30 MPa e 40 MPa
- 2) Interpolazione lineare tra i valori di  $P_{target}$  per il primo punto di pressione iniziale del CHSS (30 MPa) considerando i tre valori di temperatura (la  $T_{amb}$  effettiva e i due valori estremi):

$$P_{target2} = 70,9 \text{ MPa} + \frac{(72,2 \text{ MPa} - 70,9 \text{ MPa}) * (18^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C})}{(20^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C})}$$

$$P_{target2} = 71,94 \text{ MPa}$$

- 3) Interpolazione lineare tra i valori di  $P_{target}$  per il secondo punto di pressione iniziale del CHSS (40 MPa) considerando i tre valori di temperatura (la  $T_{amb}$  effettiva e i due valori estremi):

$$P_{target3} = 69,6 \text{ MPa} + \frac{(71,9 \text{ MPa} - 69,6 \text{ MPa}) * (18^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C})}{(20^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C})}$$

$$P_{target3} = 71,44 \text{ MPa}$$

- 4) Interpolazione tra i valori  $P_{target2}$  e  $P_{target3}$  utilizzando i valori estremi di pressione iniziale del CHSS (30 MPa e 40 MPa):

$$P_{target} = P_{target2} + \frac{(P_{target2} - P_{target3}) * (35 - 30)}{(40 - 30)}$$

$$P_{target} = 71,94 + \frac{(71,44 - 71,94) * (35 - 30)}{(40 - 30)} = 71,69 \text{ MPa}$$

### 1.3.2 Calcolo della rampa di pressione per ogni categoria di CHSS

Una volta ricavata la rampa media di pressione tramite tabelle di ricerca ( $APRR_{actual}$ ), la norma stabilisce una differenza di applicazione della rampa stessa a seconda della categoria di CHSS sul quale deve essere effettuato il rifornimento.

In particolare, per i CHSS di categoria A, B, C la stazione applica una pressione basandosi su una rampa con un  $APRR_{target}$  uguale al valore dell' $APRR_{actual}$ . Per CHSS di categoria D, invece, la stazione applica la pressione basandosi su una rampa con un  $APRR_{target}$  che è pari al minimo tra due valori dell'APRR, quello calcolato tramite tabelle ( $APRR_{actual}$ ) e quello ricavato attraverso una formulazione empirica ( $APRR_{calculated}$ ).

Quindi se il CHSS è di categoria A, B, C:

$$APRR_{target} = APRR_{actual}$$

Mentre se il CHSS è di categoria D:

$$APRR_{calculated} = 28,5 * \frac{V_{stationD}}{V_{CHSS}}$$

$$APRR_{target} = \text{Min}(APRR_{calculated}, APRR_{actual})$$

Con:

$V_{stationD}$  = rappresenta un valore settato dalla stazione che deve essere compreso tra 137 L e 174 L

$V_{CHSS}$  = volume del CHSS da riempire con idrogeno

$APRR_{actual}$  = valore dell'APRR ricavato tramite tabelle di ricerca

### 1.3.3 Calcolo di parametri aggiuntivi utili al rifornimento

Nei paragrafi precedenti abbiamo introdotto e spiegato la procedura seguita dalla stazione di rifornimento per il calcolo della rampa media di pressione tramite tabelle

( $APRR_{actual}$ ), della  $APRR_{target}$  e della pressione limite al termine della ricarica ( $P_{target}$ ).

Oltre a questi parametri, che sono quelli essenziali da conoscere per effettuare il rifornimento, la stazione calcola altre importanti grandezze che utilizza durante il riempimento dei tank e che abbiamo già introdotto parlando del profilo di pressione della stazione in funzione del tempo di carica.

Questi due parametri sono il tempo di avvio, anche detto  $t_{startup}$ , e l'ampiezza del corridoio di pressione entro il quale deve sempre rimanere il profilo di pressione della stazione e del tank durante il rifornimento.

Come già detto, il  $t_{startup}$  rappresenta il tempo di avvio del processo di rifornimento e comprende tutte quelle fasi preliminari che consentono alla stazione di settare i giusti parametri per la ricarica (*connection pulse*, calcolo della pressione del tank e delle condizioni al contorno).

Per far sì che la stazione completi queste operazioni preliminari, il tempo di avvio deve rispettare la seguente condizione:

$$t_{startup} \geq \frac{a * V^b * m_{startup}^c}{APRR_{target}}$$

Con:

$APRR_{target}$  = rampa media di pressione stabilita tramite metodo delle tabelle

V = volume del CHSS (tank)

$m_{startup}$  = massa fornita dalla stazione durante il tempo di avvio, solitamente pari a 200 grammi (serve per aprire la valvola di ritegno del tank per consentire la misura della pressione del CHSS)

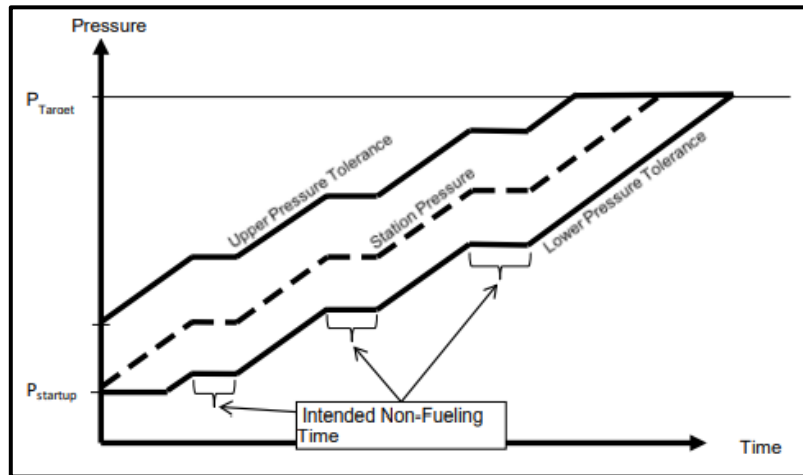
a = 1,717 (costante determinata sperimentalmente)

b = -0,9773 (costante determinata sperimentalmente)

c = 0,9828 (costante determinata sperimentalmente)

Per quanto riguarda l'intervallo di tolleranza, invece, abbiamo detto in precedenza che la pressione applicata dalla stazione deve rientrare all'interno di un limite inferiore ed uno superiore, come è possibile vedere dalla *Figura 7*.

Questo intervallo è anche detto corridoio di tolleranza e la norma stabilisce che la stazione, ad eccezione dei primi 15 secondi (tempo di avvio massimo), debba mantenere costantemente la pressione all'interno di questo intervallo.



**Figura 7 - Corridoio di tolleranza della rampa media di pressione**

Le stazioni di rifornimento ad idrogeno sono progettate in modo tale che, se il valore di pressione supera la tolleranza superiore prestabilita (*l'upper pressure tolerance*), la pressione stessa dovrà rientrare all'interno del suo corridoio entro 5 secondi altrimenti il rifornimento verrà interrotto.

Per quando riguarda il limite inferiore, invece, se la pressione della stazione scende al di sotto del *lower pressure tolerance* avrà a disposizione un tempo di 15 secondi per ritornare ai valori prestabiliti.

La differenza, in termini di tempistiche di intervento della stazione per l'interruzione del rifornimento, sta nel fatto che, se la pressione supera il limite superiore, può provocare danni alla struttura della bombola con il rischio di surriscaldamento ed esplosione; al contrario, se scende al di sotto del limite inferiore, non ci sono rischi strutturali per la resistenza della bombola ma solo quelli di un rifornimento incompleto che non rispetta più i parametri stabiliti dalla norma.

I limiti di tolleranza sono ricavabili attraverso delle semplici formulazioni che differiscono, però, nel caso si tratti di un rifornimento per CHSS di categoria A, B, C oppure per quelli di categoria D.

Per CHSS di categoria A, B, C i limiti di tolleranza si ottengono come:

$$P_{station} \leq P_{startup} + (APRR_{target} * t_{fueling}) + \Delta P_{upper}$$

$$P_{station} \geq P_{startup} + Max[(APRR_{target} * t_{fueling}) - \Delta P_{lower} ; 0]$$

Con:

$t_{fueling}$  = tempo effettivo di riempimento (calcolato da inizio immissione idrogeno fino all'istante di tempo considerato per il calcolo dell'intervallo)

$\Delta P_{upper} = 7$  MPa (determinata sperimentalmente)

$\Delta P_{lower} = 2,5$  MPa (determinata sperimentalmente)

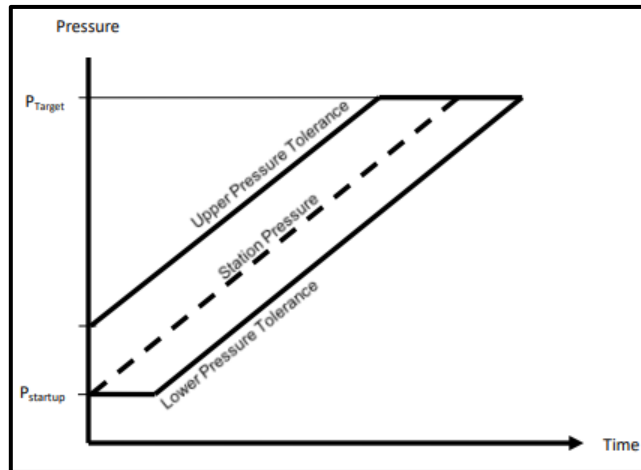


Figura 8 – Corridoio di pressione per CHSS di categoria A, B, C

Per CHSS di categoria D i limiti di tolleranza si ottengono come:

$$P_{station} \leq P_{startup} + (APRR_{target} * t_{fueling}) + \Delta P_{upper}$$

$$P_{station} \geq P_{startup} + Max[(1 \text{ MPa}/\text{min} * t_{fueling}) - \Delta P_{lower} ; 0]$$

Con:

$t_{fueling}$  = tempo effettivo di riempimento (calcolato da inizio immissione idrogeno fino all'istante di tempo considerato per il calcolo dell'intervallo)

$\Delta P_{upper} = 7$  MPa (determinata sperimentalmente)

$\Delta P_{lower} = 2,5 \text{ MPa}$  (determinata sperimentalmente)

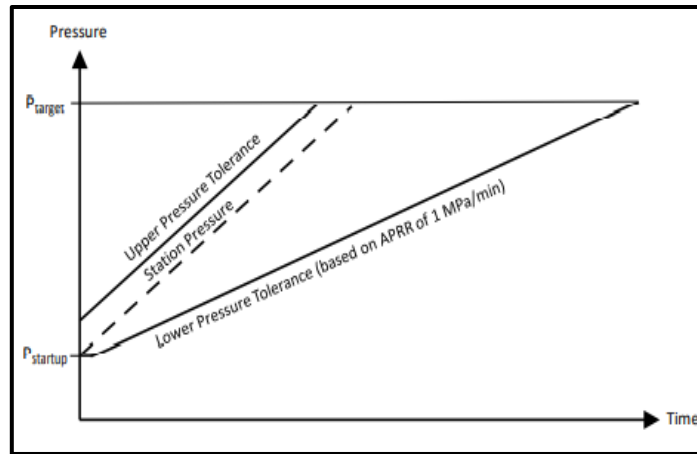


Figura 9 – Corridoio di pressione per CHSS di categoria D

## 1.4 Modello di simulazione del riempimento

La norma SAE J2601 introduce anche un modello di simulazione del processo di rifornimento per valutare l'evoluzione della pressione e della temperatura del gas all'interno del CHSS.

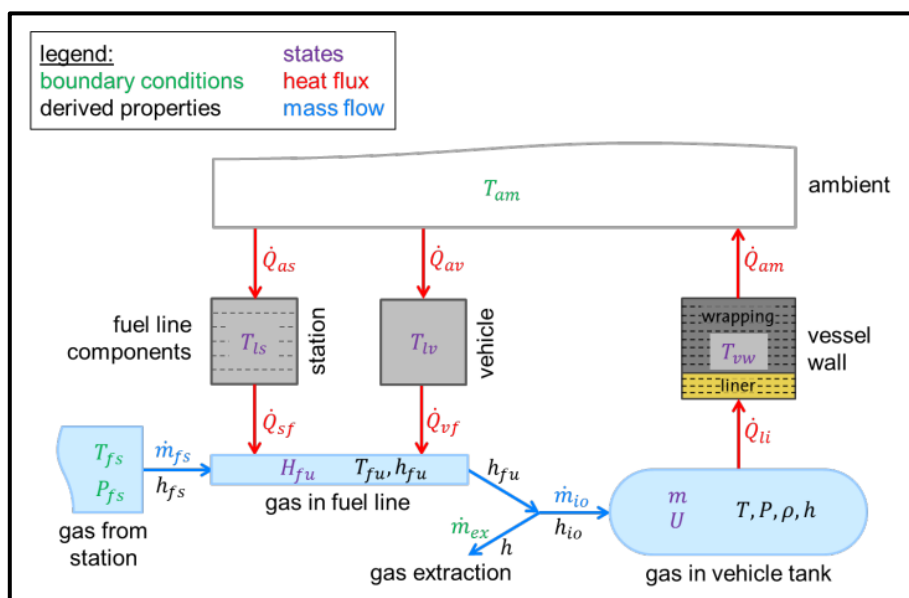


Figura 10 – Schema del modello di simulazione del riempimento di un tank secondo la norma SAE J2601



Il gas combustibile viene erogato dalla stazione con una determinata pressione  $P_{fs}$  (equivalente alla  $P_{station}$ ) ad una temperatura  $T_{fs}$  (equivalente alla  $T_{fuel}$ ).

Sia la pressione che la temperatura del carburante variano con il procedere della simulazione; in particolare, la pressione aumenta secondo una legge lineare rispetto al tempo (definita dalla rampa di pressione), mentre la temperatura, in un primo momento, decresce dalla temperatura ambiente fino ad un valore stabilito dalla classe di temperatura di mandata del carburante (es. T40).

La caduta di pressione tra la stazione di rifornimento ed il CHSS del veicolo, dovuta alle perdite di carico del circuito, viene utilizzata in combinazione con il coefficiente di perdita di carico per calcolare la portata massica  $\dot{m}_{fs}$  erogata dall'ugello.

Parallelamente l'entalpia specifica  $h_{fs}$  viene calcolata in funzione del suo contributo stazionario  $h(P_{fs}, T_{fs})$  più il suo contributo dinamico  $\frac{1}{2}w_{fs}^2$  con  $w_{fs}$  velocità del gas in uscita dalla stazione.

Il carburante "fresco", proveniente dalla stazione, entra in un volume di controllo detto "*gas in fuel line*" dove scambia calore con le masse termiche costituite dai tubi e dagli altri componenti come, ad esempio, le valvole.

Le masse termiche appartenenti alla stazione e al veicolo sono separate. Ogni massa termica è caratterizzata dalla sua massa, dalla capacità termica specifica e dalla conduttività termica. Per ogni massa termica viene risolto un sistema di equazioni differenziali per ricavare la temperatura effettiva nel corso della simulazione.

Le masse termiche sono modellate in modo differente:

- Quella che rappresenta i componenti della stazione viene discretizzata in direzione radiale per consentire di avere un profilo di temperatura unidimensionale  $T_{ls}$ .
- Quella lato del veicolo è modellata come una massa *lumped* o concentrata che ha una temperatura omogenea  $T_{lv}$ .

Entrambe le masse termiche scambiano calore con l'ambiente a temperatura  $T_{amb}$  ed i rispettivi flussi termici sono  $\dot{Q}_{as}$  e  $\dot{Q}_{av}$ .

Queste, inoltre, scambiano calore con il gas combustibile nel volume di controllo. Per il calcolo dell'interazione tra masse termiche e volume di controllo viene utilizzato un

coefficiente di scambio termico, basato sull'equazione di Nusselt per la convezione forzata all'interno di un tubo, che permette di calcolare i due flussi di calore  $\dot{Q}_{sf}$  e  $\dot{Q}_{vf}$ . Questi, in generale, influiscono sull'entalpia totale  $H_{fu}$  del gas nella linea del carburante e questo si riflette sulla temperatura del carburante  $T_{fu}$ .

Nel passaggio successivo, come si può notare nella *Figura 10*, il gas combustibile entra nel CHSS con un'entalpia specifica  $h_{fu}$ .

La portata massica  $\dot{m}_{io}$  attraverso la porta ingresso/uscita di ogni bombola è uguale alla portata totale  $\dot{m}_{fs}$  proveniente dalla stazione diviso il numero dei tank alloggiati nel veicolo. Per ogni bombola, tramite le equazioni di bilancio della massa e dell'energia, vengono ricavate la massa di gas ( $m$ ) e l'energia interna ( $U$ ) per ogni istante di tempo.

Si assume, come semplificazione, che il gas all'interno del CHSS sia perfettamente miscelato, cioè che l'idrogeno sia presente in modo uniforme su tutto il tank e che non ci siano gradienti di temperatura o di pressione al suo interno.

In caso di rifornimento del CHSS, la portata  $\dot{m}_{io}$  è considerata positiva ed il gas in entrata porta l'entalpia specifica a  $h_{io} = h_{fu}$ .

Per una simulazione di svuotamento/estrazione, la  $\dot{m}_{io}$  è considerata negativa e l'entalpia specifica del gas all'interno del tank sarà  $h_{io} = h$ .

Tutte le proprietà dell'idrogeno all'interno del tank (ad esempio  $P$ ,  $T$ ,  $h$ ) sono calcolate mediante l'equazione di stato dei gas, con la densità che viene calcolata come la massa di gas diviso il volume della bombola  $\rho = \frac{m}{V}$  e l'energia interna specifica data dall'energia interna totale diviso la massa del gas  $u = \frac{U}{m}$ .

Per la simulazione viene utilizzata un'equazione di stato molto accurata che descrive fedelmente il comportamento reale del gas, per il fatto che, durante il rifornimento, intervengono fenomeni come la comprimibilità e l'effetto Joule-Thomson di cui bisogna necessariamente tener conto.

Per quanto riguarda lo scambio termico del tank, invece, attraverso un insieme di equazioni di Nusselt, che considerano sia la convezione libera e che quella forzata,

viene calcolato il calore  $\dot{Q}_u$  trasferito tra il gas e la superficie interna della bombola (anche detta *liner*).

La superficie interna del tank è discretizzata, anch'essa, in direzione radiale e l'equazione di conduzione del calore viene risolta in una sola dimensione. Questa fornisce il profilo di temperatura  $T_{vw}$  all'interno della bombola per ogni istante di tempo durante il rifornimento.

Parallelamente, sulla superficie esterna, il tank, scambia calore con l'ambiente. Il coefficiente di scambio termico è ancora basato su un insieme di equazioni di Nusselt, ma questa volta solo per la convezione libera.

In definitiva si può affermare che la temperatura dell'idrogeno all'interno del tank aumenta durante il rifornimento per differenti motivi quali:

- Il calore trasferito dalla stazione;
- Il calore trasferito dalle masse termiche;
- Effetto Joule-Thomson del carburante dovuto al passaggio, ad alta pressione, dalla stazione al tank;
- Compressione dell'idrogeno all'interno del tank stesso.

Una cosa da notare e da prendere in considerazione nel processo di ricarica è che differenti materiali e design delle bombole portano ad avere diversi gradi di surriscaldamento per il fatto che variano le caratteristiche di scambio termico, capacità termica e volume disponibile.

In generale, una simulazione di riempimento deve prendere in considerazione, oltre ai parametri fissi del modello (come masse, superfici e volumi), le condizioni iniziali ( $T_{ls}, T_{vw}, m, U$ ) e quelle al contorno ( $T_{amb}, T_{fs}, \dot{m}_{ex}$ ) in base alle quali vengono risolte le equazioni differenziali.



## CAPITOLO 2

### “ANALISI DELLA LINEA DI TEST”

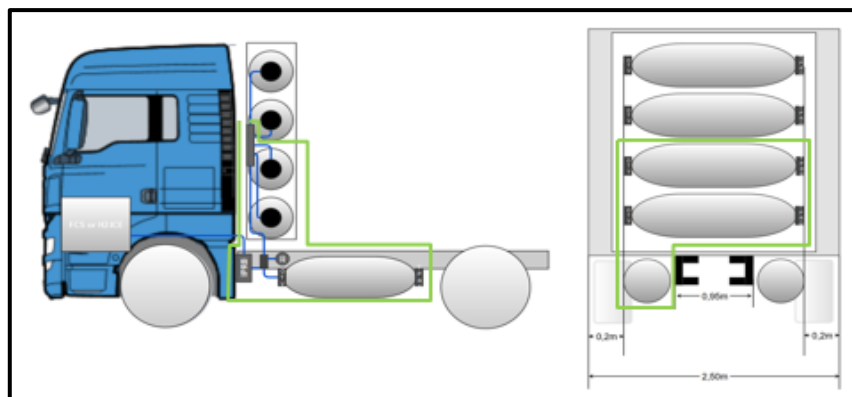
#### 2.1 Introduzione al problema

Come discusso nella parte introduttiva di questo elaborato, a livello mondiale, tante aziende che lavorano nel settore del powertrain, stanno ponendo sempre più attenzione al tema dell'idrogeno poiché, attualmente, rappresenta uno dei trend tecnologici in grande ascesa.

L'attività di ricerca si sta spingendo, in particolar modo, verso lo studio e l'analisi del comportamento dell'idrogeno nei veicoli elettrici, da quando viene immesso all'interno dei tank fino all'utilizzo tramite *fuel cells*.

E' per questo motivo che uno dei clienti dell'impresa Loccioni, qualche mese fa, ha richiesto la produzione e la messa a punto di un banco automatico di test per bombole ad idrogeno, al fine di andare a simulare l'operazione di riempimento compiuta di una stazione di rifornimento, il tutto seguendo la procedura standard normata dalla SAE J2601.

Il sistema, in *Figura 11*, rappresenta il pacco bombole, utilizzato su mezzi pesanti per il trasporto merci, che il cliente ha chiesto di voler testare per stabilire i parametri di riempimento sotto diverse condizioni operative.



*Figura 11 – Raffigurazione del pacco bombole da testare*

Il pacco bombole del cliente, nel suo complessivo, comprende sei tank, due di capacità maggiore, alloggiati longitudinalmente sul telaio del veicolo, e quattro, più piccoli, posti dietro alla cabina di guida.

La massa minima di idrogeno che deve essere fornita ai sei tank deve essere di 52 kg ma, poiché il cliente ha richiesto di testare solamente metà del circuito, costituito da tre bombole (due piccole ed una grande, evidenziate in verde), l'obiettivo del sistema automatico di test è quello di consentire un rifornimento di idrogeno per una quantità minima di 26 kg.

Il motivo per il quale il cliente ha formulato questo tipo di richiesta è data dal fatto che i due circuiti (contenenti ciascuno tre bombole) sono isolati uno dall'altro e devono quindi essere riempiti separatamente.

L'obiettivo primario è che il banco di test permetta di verificare e validare, secondo quanto stabilito dalla SAE J2601, i parametri di riempimento, quali la temperatura e la pressione finale dei tank al termine del processo, il tempo di ricarica e la massa totale di idrogeno introdotta all'interno, sotto differenti condizioni operative che possono variare da rifornimento a rifornimento.

Le diverse condizioni operative, che nel capitolo precedente abbiamo chiamato condizioni al contorno, riguardano principalmente tre aspetti:

- **Temperatura ambiente:** le bombole sono testate all'interno di una camera climatica che permette di variare la temperatura alla quale si trovano i tank. In questo modo sarà necessario impostare una rampa di pressione differente, a seconda della  $T_{amb}$ , per far sì che il tank si trovi all'interno dei limiti operativi al termine del processo;
- **Temperatura di refrigerazione:** rappresenta praticamente la temperatura di ingresso dell'idrogeno all'interno dei tank. Viene raggiunta attraverso opportuni scambiatori di calore, la cui temperatura può essere modificata secondo necessità;
- **Pressione iniziale:** variando la pressione iniziale varia la pressione  $P_{target}$  che deve essere raggiunta dal tank al termine della ricarica.

## 2.2 Descrizione generale del circuito

Prima del mio arrivo in impresa, i progettisti della Loccioni, confrontandosi con il cliente, hanno messo a punto il circuito idraulico che permette di convogliare l'idrogeno dai serbatoi di stoccaggio (a bassa, media ed alta pressione) fino al tank finale. D'ora in poi, infatti, parleremo di tank finale poiché nell'ambito della simulazione del processo di riempimento, in accordo col cliente, i progettisti hanno appurato che risultava più semplice, senza commettere errori di approssimazione, considerare il pacco bombole, contenente le tre bombole viste in precedenza, come un unico tank contenente l'intera massa di idrogeno.

Come primo passo, quindi, sono passati al dimensionamento del tank in modo che contenesse al suo interno la quantità minima di 26 kg di idrogeno richiesta. Utilizzando la legge di stato dei gas reali corretta con il fattore di comprimibilità, hanno calcolato il volume totale del tank, andando a considerare i valori di pressione e temperatura stabiliti da norma al termine del processo di rifornimento.

La legge di stato dei gas reali si presenta nella seguente forma:

$$P = \rho * R * T * Z \quad \rightarrow \quad P = \frac{m}{V} * R * T * Z$$

$$V = \frac{m * R * T * Z}{P}$$

Con:

P = pressione del tank [Pa]

$\rho$  = densità dell'idrogeno ad una data temperatura e pressione  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

R = costante reale del gas  $\left[\frac{J}{Kg * K}\right]$

T = temperatura del tank [K]

Z = fattore di comprimibilità (adimensionale)

m = quantità di idrogeno nel tank [Kg]

V = volume del tank [ $m^3$ ]

Per calcolare il volume totale del tank, sono state considerate le condizioni finali di pressione e temperatura del tank al termine del processo di riempimento, stabilite dalla SAE J2601, e ricavando anche le costanti specifiche dell'idrogeno, si ottengono le seguenti grandezze:

- $P_{finale_{tank}} = 875 \text{ bar} = 87500000 \text{ Pa}$
- $T_{finale_{tank}} = 85 \text{ °C} = 358.15 \text{ K}$
- $m_{finale_{idrogeno}} \geq 26 \text{ kg}$
- $R_{idrogeno} = 4124 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$
- $Z_{idrogeno_{875bar}} = 1,7$

Il tank è stato quindi dimensionato ricavando il suo volume totale effettivo:

$$V \geq \frac{26 \text{ Kg} * 4124 \frac{\text{N} * \text{m}}{\text{Kg} * \text{K}} * 358.15 \text{ K} * 1,7}{87500000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}$$

$$V \geq 0,746 \text{ m}^3 \quad \rightarrow \quad V = 0,75 \text{ m}^3 = 750 \text{ L}$$

Partendo dalle dimensioni del tank, il team di progettisti Loccioni, coadiuvato dal cliente, ha realizzato lo schema del circuito idraulico ipotizzando, in primo luogo, dimensioni e pressioni dei serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno (chiamati anche *interim storage*) dal quale inizia a fluire il carburante per essere convogliato, attraverso il circuito, nel tank finale.

Il circuito della linea di test, oltre alle valvole di controllo del flusso, della pressione e quelle di sicurezza, utilizzate per aprire o chiudere il circuito in caso di manutenzione o emergenza, deve comprendere due componenti fondamentali, la cui presenza è richiesta dalla norma SAE J2601, come:

- Uno o più *riduttori di pressione* che, fungendo da regolatori, permettono di correggere la pressione del tank in base alla rampa stabilita dalla stazione di rifornimento all'inizio della procedura di riempimento;



- Uno o più *scambiatori di calore* in serie che permettono di raffreddare il combustibile fino alla temperatura richiesta dal processo di ricarica, prima di essere introdotto nel tank.

Questi elementi, come detto in precedenza, sono fondamentali per la corretta riuscita del riempimento e devono essere necessariamente presenti nel circuito che, per semplicità di interpretazione e spiegazione, può essere suddiviso in due parti principali:

- Linea di alimentazione: comprende l'insieme dei componenti che permettono di caricare l'idrogeno all'interno dei serbatoi di stoccaggio e di trasferirlo al banco per il test.
- Linea di test: comprende i componenti che permettono di controllare, durante il test, la temperatura e la pressione dell'idrogeno per arrivare in condizioni sicurezze fino al tank sotto test.

### **2.2.1 Linea di alimentazione**

La linea di alimentazione rappresenta la parte iniziale del circuito e comprende tutto ciò che c'è a monte della linea di test vera a propria.

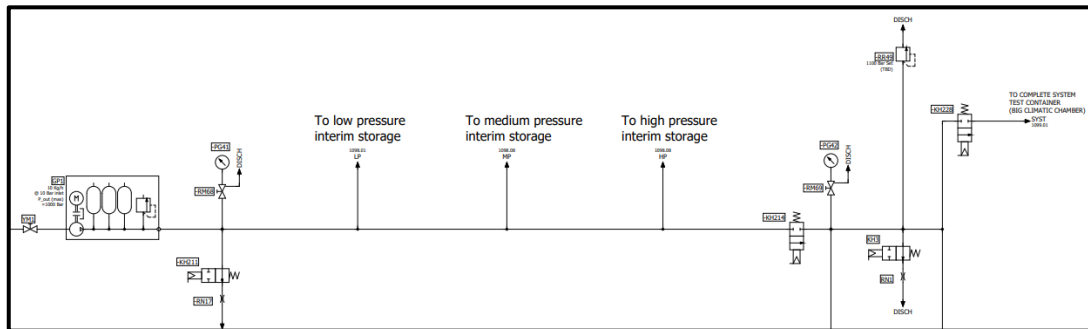
Questa prima parte è responsabile della carica dei serbatoi di stoccaggio, che avviene quando il banco di test non è attivo.

Il banco, in generale, secondo richiesta del cliente, deve essere progettato in modo da eseguire più test nell'arco della giornata, questo spiega la scelta di una grande capienza dei serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno, che devono essere poi riempiti nuovamente durante la notte quando non si eseguono test.

Per questo motivo, in questa parte del circuito sono presenti fondamentalmente due componenti: il gruppo compressori ed i serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno a tre differenti livelli di pressione.

Come appena accennato, durante il periodo di non esecuzione del test, il gruppo compressori preleva l'idrogeno dalla linea del cliente e lo pressurizza (a differenti pressioni) inviandolo agli *interim storage*, dai quali partirà per i successivi test.

Oltre a questi due elementi, sono presenti anche dei sensori di pressione e valvole di sicurezza che permettono, nel caso in cui la pressione superi quella ammissibile, di scaricare la linea di alimentazione.



**Figura 12 – Schema fluidico della linea di alimentazione**

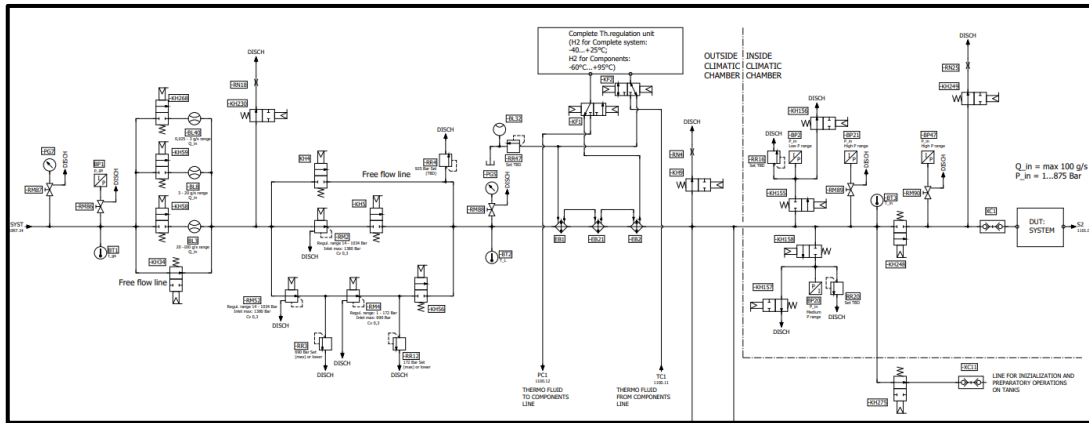
### 2.2.2 Linea di test

La linea di test, come precedentemente detto, ha al suo interno tutti quei componenti che permettono la regolazione della temperatura, della pressione e del flusso.

In particolare, gli elementi presenti in questa seconda parte di circuito sono:

- Valvole proporzionali a 2-vie: servono quasi esclusivamente per il controllo del flusso e consentono di by-passare zone del circuito che non sono soggette all'esecuzione del test in quell'istante;
- Misuratori di portata (flussimetri): consentono di misurare la portata di idrogeno che fluisce all'interno del circuito per essere sicuri che la portata massica  $\dot{m}$  non superi il valore massimo di 60 g/s. Sono posizionati in parallelo per consentire la corretta misurazione in base al range di portata che transita;
- Riduttori di pressione: sono posizionati anch'essi su linee in parallelo per effettuare un corretto controllo della pressione in base al livello di pressione. Permettono di far rispettare la rampa di pressione impostata ad inizio rifornimento;

- Scambiatori di calore: raffreddano l'idrogeno sino alla temperatura caratteristica del riempimento. Sono posizionati in equicorrente per avere un migliore controllo della temperatura.



**Figura 13 – Schema fluidico della linea di test**

### 2.3 Analisi e ricerca dei componenti più idonei

Una volta definito il circuito ed i vari elementi che ne fanno parte, è stato mio compito andare ad analizzare in modo approfondito tutti i componenti, per scegliere quali tipologie avessero le prestazioni migliori e caratteristiche conformi alle specifiche del cliente. Per questo motivo, nella prima parte del mio tirocinio, mi sono occupato della scelta di tutti gli elementi descritti in precedenza, confrontando i prodotti offerti da diversi fornitori.

Quello dell'idrogeno è un mondo molto complesso e spesso la ricerca dei componenti non risulta affatto semplice visti i range di temperatura e pressione che richiede un circuito di questo tipo.

Nei prossimi paragrafi andrò a descrivere brevemente i componenti scelti tra diversi fornitori con l'obiettivo di focalizzare l'attenzione sui parametri che mi consentiranno poi di effettuare le simulazioni in Excel ed Amesim.

### 2.3.1 Tubazioni

Per le tubazioni ed i raccordi non è stata effettuata un vera e propria scelta tra i vari cataloghi dei fornitori in quanto l'impresa ha già un fornitore unico nel campo dell'alta pressione. La scelta tuttavia è stata fatta sul diametro di tubazioni e raccordi in funzione del flusso e della velocità massima raggiungibile dell'idrogeno all'interno di questi elementi. Si è optato quindi per le scelta di tubazioni da 9/16" (ovvero diametro esterno da 14,29 mm) che hanno un diametro interno di 7,8 mm.

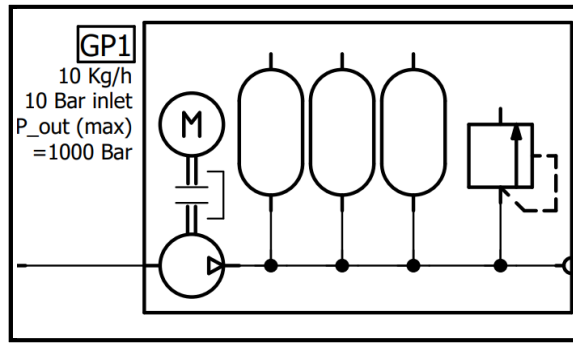


*Figura 14 – Tubazioni e raccordi utilizzati*

### 2.3.2 Sistema di compressione

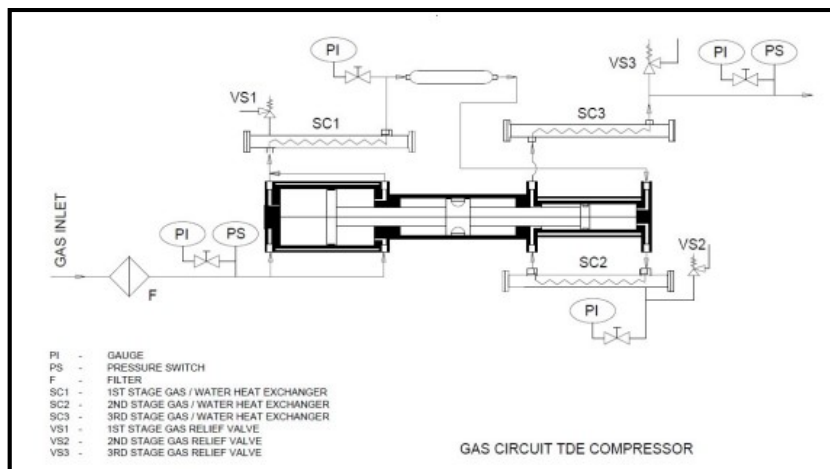
Per il sistema di compressione è stato scelto come fornitore Atlas Copco, per il fatto che permette di comprimere l'idrogeno fino ai 1000 bar richiesti dell'*high pressure storage* e perché la sua affidabilità era già stata riscontrata in precedenti progetti realizzati dalla Loccioni.

Il sistema di compressione, presente a monte della linea di test, rappresenta un elemento fondamentale per il circuito anche se effettivamente non partecipa nell'operazione di ricarica delle bombole. La linea di test, tuttavia, necessita di un sistema di compressori per il riempimento dei sistemi di stoccaggio dell'idrogeno dal quale parte il combustibile durante il rifornimento.



**Figura 15 – Simbolo fluidico del sistema di compressione**

Il compressore Atlas Copco è costituito da una diversi cilindri, posti in serie tra loro, che consentono una compressione progressiva dell'idrogeno grazie ad un pistone a comando oleodinamico. Questa compressione viene distribuita su più cilindri poiché permette di avere un differenziale di pressione più limitato, con minori sforzi sul pistone, ed un dispendio energetico inferiore.



**Figura 16 – Schema compressore Atlas Copco**

### 2.3.3 Serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno

I serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno non sono altro che degli accumulatori, all'interno dei quali è presente idrogeno a pressioni differenti. Nel sistema analizzato, per ciascun *interim storage*, sono presenti quattro accumulatori da 700 L ciascuno (per

un totale di 2800 L per ogni *interim storage*). Le pressioni alle quali si trova l'idrogeno all'interno degli accumulatori sono: 480 bar per il *low pressure storage*, 800 bar per il *medium pressure storage* e 1000 bar per l'*high pressure storage*. Anche i serbatoi di stoccaggio, come i tank, sono fatti in fibra di carbonio con rivestimento in polimero termoplastico. Per quanto riguarda la temperatura dell'idrogeno al loro interno si considera in equilibrio termico con l'ambiente esterno poiché, per il fatto che il loro riempimento avviene in tempi lunghi, non sono soggetti a forti gradienti termici. A valle degli accumulatori sono presenti valvole di sicurezza e di ritegno per il controllo della pressione, del flusso e per lo spurgo.

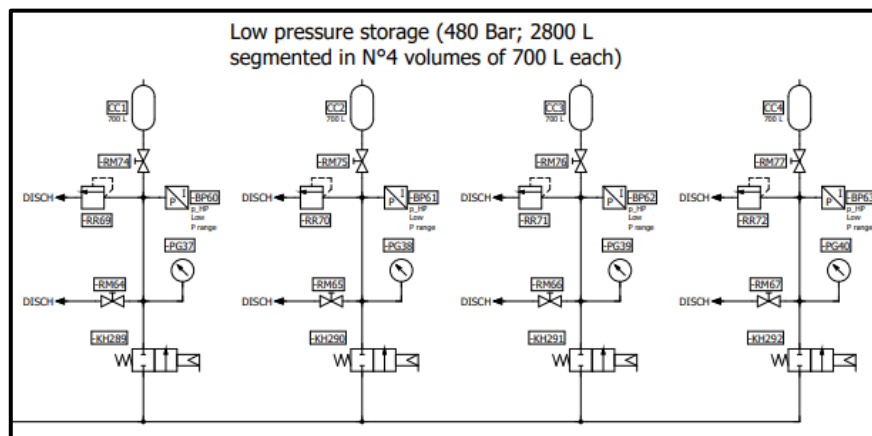


Figura 17 – Schema fluidico del serbatoio di stoccaggio a bassa pressione

### 2.3.4 Riduttore di pressione

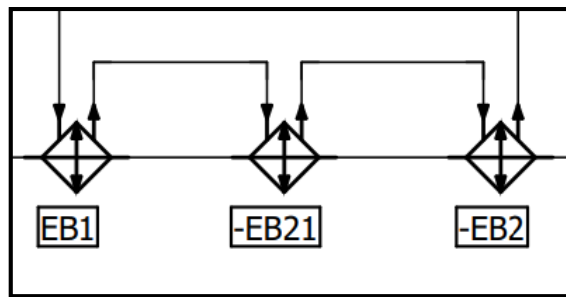
I riduttori di pressione consentono, attraverso un'opportuna logica di controllo per l'apertura e chiusura dell'orifizio, di controllare la pressione di uscita dal componente. Nel caso del circuito in questione, il controllo della pressione viene effettuato sul tank del cliente in base alla rampa di pressione stabilita dalla stazione di rifornimento all'inizio del processo. Sul circuito sono presenti tre linee in parallelo, contenenti ciascuna un riduttore, che permettono, selezionando il ramo che rappresenta il range di pressione corretto, di effettuare un controllo molto più preciso.



### 2.3.5 Scambiatori di calore

Gli scambiatori di calore sono tra gli ultimi elementi della linea di test. Sono dei componenti fondamentali perché consentono di portare l'idrogeno ad una delle temperature stabilite dalla stazione di rifornimento (T40, T30, T20). L'idrogeno in ingresso arriva ad una temperatura che può essere anche di molti gradi superiore a quella ambiente di partenza per via degli effetti di attrito, di compressione ed effetto Joule-Thomson. Anche la pressione di ingresso gioca un ruolo importante poiché varia dai 20 bar fino ai 1000 bar.

Per questi due motivi gli scambiatori devono essere opportunamente dimensionati in modo da resistere a queste sollecitazioni.



*Figura 21 – Schema degli scambiatori di calore in equicorrente*

Per il banco di test si è optato per il K°Bond, scambiatore di calore della Kelvion. E' realizzato con saldatura per diffusione ed è ideale per le applicazioni che richiedono temperature e pressioni di processo estreme. Questo tipo di scambiatore è in grado di resistere a pressioni fino a 1.000 bar e a temperature criogeniche da -200° a 600°C.

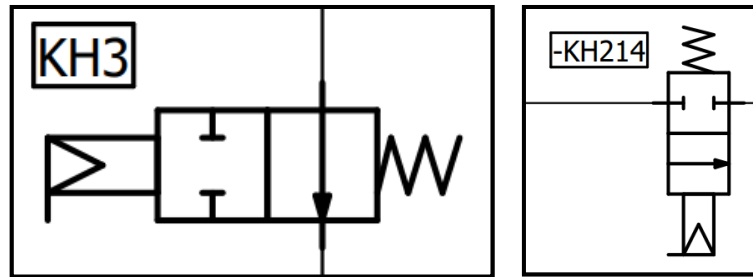


*Figura 22 – Scambiatore di calore K°Bond (Kelvion)*



### 2.3.6 Valvole 2-vie

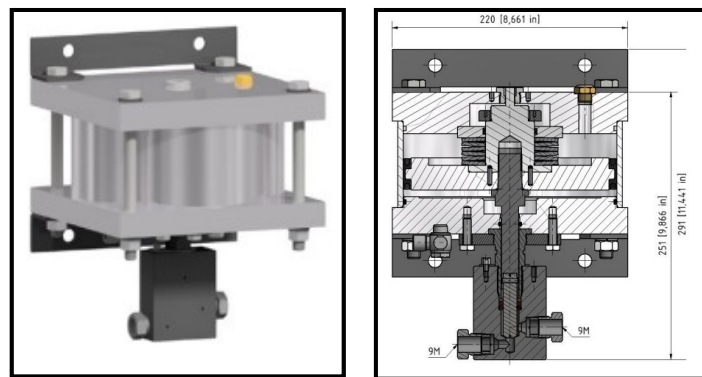
Le valvole 2-vie sono progettate per il controllo di zona on/off di impianti. Vengono utilizzate in parti del circuito in cui può essere necessario chiudere il passaggio del flusso attraverso una linea, come avviene nel circuito di test per i rami posti in parallelo.



*Figure 23/24 – Simbolo valvole 2-vie (normalmente aperta e normalmente chiusa)*

Per il circuito realizzato sono state scelte delle valvole da 9/16” a comando pneumatico della Maximator per il fatto che lavorano molto bene in range di temperatura compresi tra -40°C/80°C.

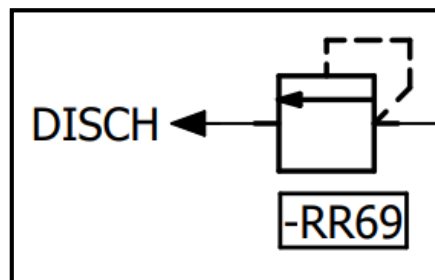
La valvola, essendo a comando pneumatico, grazie al suo otturatore, permette di intercettare il flusso quando la forza esercitata dall'idrogeno bilancia la forza esercitata dall'aria compressa nella parte pneumatica della valvola. Si gioca tutto su un rapporto di aree e l'aria compressa, con una pressione fino a circa 5/6 bar, agirà su un'area molto maggiore rispetto all'area su cui agisce la pressione della linea dell'idrogeno (rapporti anche molto elevati es. 188:1).



*Figure 25/26 – Valvola proporzionale 2-vie della Maximator*

### 2.3.7 Valvole di sicurezza o di massima

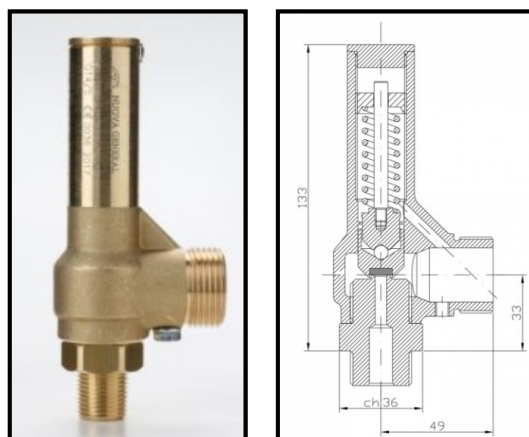
Le valvole di sicurezza sono dei componenti che vengono posizionati in particolari zone del circuito per preservare l'integrità di altri elementi a valle di quest'ultima. A regime sono solitamente chiuse e possono, in un certo senso, essere considerate valvole di controllo della pressione poiché, se viene superato il limite al quale sono state tarate, si aprono e depressurizzano il circuito riportandolo ad una pressione accettabile ed entro i limiti consentiti.



*Figura 27 – Simbolo valvola di sicurezza o di massima*

Per il circuito in esame ho scelto due tipologie di valvole in base al livello di pressione che possono/devono sopportare.

In particolare, la scelta è ricaduta su valvole della Nuova General Instruments per basse e medie pressioni (fino a 600 bar) mentre per le alte pressioni ho optato per valvole della Hofer che resistono fino a 1100 bar.

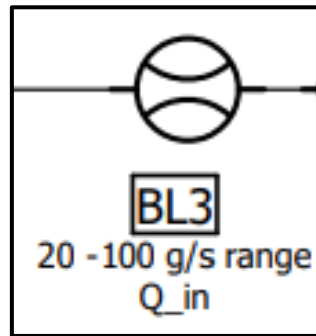


*Figure 28/29 – Valvola di sicurezza per bassa/media pressione della Nuova General Instruments*

### 2.3.8 Flussimetri

I flussimetri sono dei misuratori di portata che vengono utilizzati in molti settori industriali. Per la linea di test per tank ad idrogeno ho scelto di utilizzare flussimetri ad effetto Coriolis perché, nonostante introducono delle perdite di carico non trascurabili, sono molto precisi nella misurazione.

Anche in questo caso sono presenti diversi flussimetri nella linea di impianto ma, per coprire tutto il range di portata con una buona accuratezza di misura, si usano più flussimetri in parallelo in modo da selezionare il corretto ramo su cui effettuare la misura. Ciascun flussimetro sul circuito è solitamente preceduto da una valvola 2-vie che, a seconda della portata della linea, andrà a chiudere i 2 rami che non corrispondono al range di portata mentre rimarrà aperto quello nel range di misura.

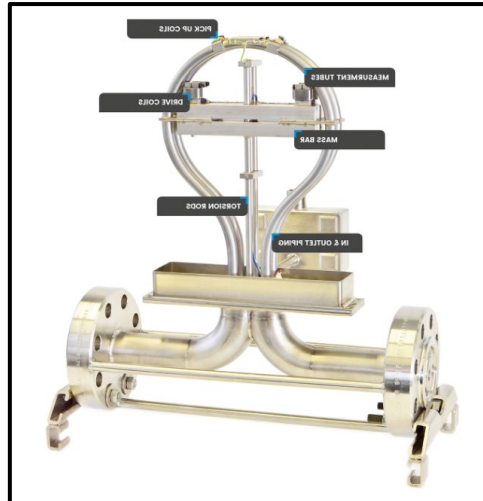


*Figura 30 – Simbolo fluidico di un flussimetro*

Ciascun misuratore di portata Coriolis comprende uno o più tubi di misura che vengono fatti oscillare in modo artificiale da un eccitatore. La massa del fluido in transito genera una spinta (accelerazione di Coriolis) che cambia l'assetto della struttura vibrante, rilevata da due trasduttori posti tra ingresso ed uscita dei tubi. I segnali elettrici generati da questi trasduttori sono fuori fase (differenza di fase) nel momento in cui avviene il passaggio del fluido. L'entità dello scostamento di fase è proporzionale alla portata di massa del fluido in transito.

Può anche essere misurata la densità del fluido in base alla frequenza di oscillazione dei tubi di misura. Viene inoltre registrata la temperatura del tubo di misura per compensare le influenze termiche.

La scelta dei flussimetri è stata diversa a seconda del range di flusso da dover smaltire ma si è comunque scelto un unico fornitore, la RHEONIK, sia per la bassa, che la media ed alta portata.



*Figura 31 – Flussimetro ad effetto Coriolis*

### 2.3.9 Sensori

All'interno del circuito idraulico sono presenti anche numerosi sensori per il controllo della pressione e del flusso.

Questi possono essere catalogati come:

- **Pressostati:** dispositivi a due stati (aperto o chiuso) utilizzati per il rilevamento di un determinato valore di pressione del fluido.



*Figura 32 - Pressostato*

- **Manometri**: strumenti di misura della pressione relativa di un fluido, con la possibilità di avere un livello visivo per la visualizzazione della pressione.



*Figura 33 - Manometro*

- **Flussostati**: dispositivi a due stati (aperto o chiuso) utilizzati per il rilevamento di un determinato valore di portata del fluido.



*Figura 34 - Flussostato*



# CAPITOLO 3

## “ANALISI DEL PROCESSO TRAMITE EXCEL”

### 3.1 Introduzione al modello di analisi tramite Excel

Terminata la ricerca dei componenti più idonei alla realizzazione del banco di test, ho ripreso il circuito idraulico, fornito dalla Loccioni, per individuare quale fosse il percorso seguito dall'idrogeno, a regime, durante la ricarica. Per la simulazione occorre definire quali fossero i tratti di tubazione, le valvole ed i misuratori interposti tra i serbatoi di stoccaggio ed il tank del cliente. Per questo motivo, al fine di agevolare l'impostazione dei fogli Excel, ho evidenziato e considerato esclusivamente i tratti di circuito necessari al rifornimento, prendendo, ad esempio, per i tratti in parallelo, un unico ramo (quello ad alta pressione o ad alta portata) in modo da stimare le perdite di carico per eccesso, in funzione della valvola/sensore con il range di misura più ampio.

Di seguito sono riportati i tratti di circuito già visti nel capitolo precedente con l'aggiunta di sigle che stanno ad indicare le parti fondamentali della linea. In particolare, sono indicate con la lettera “T” le tubazioni, con la lettera “V” le valvole 2-vie, con la “R” il riduttore di pressione e con la “S” lo scambiatore di calore.

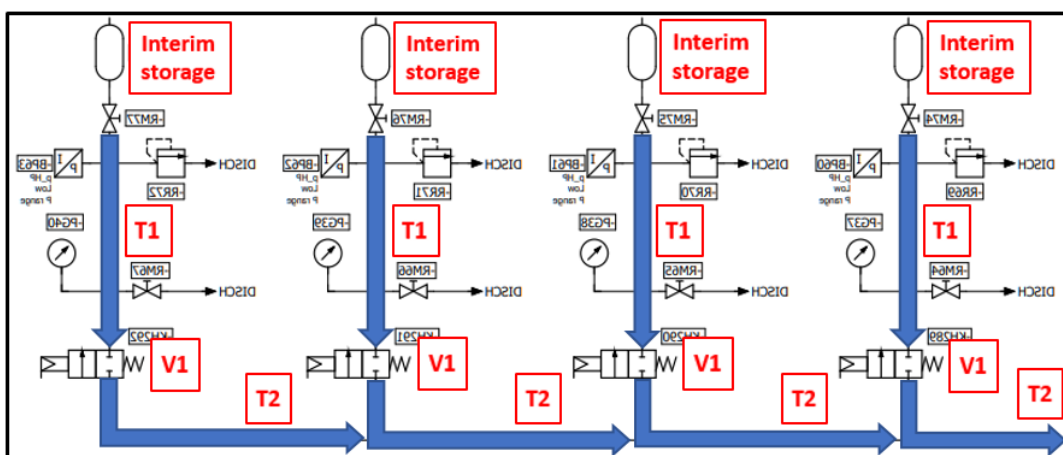
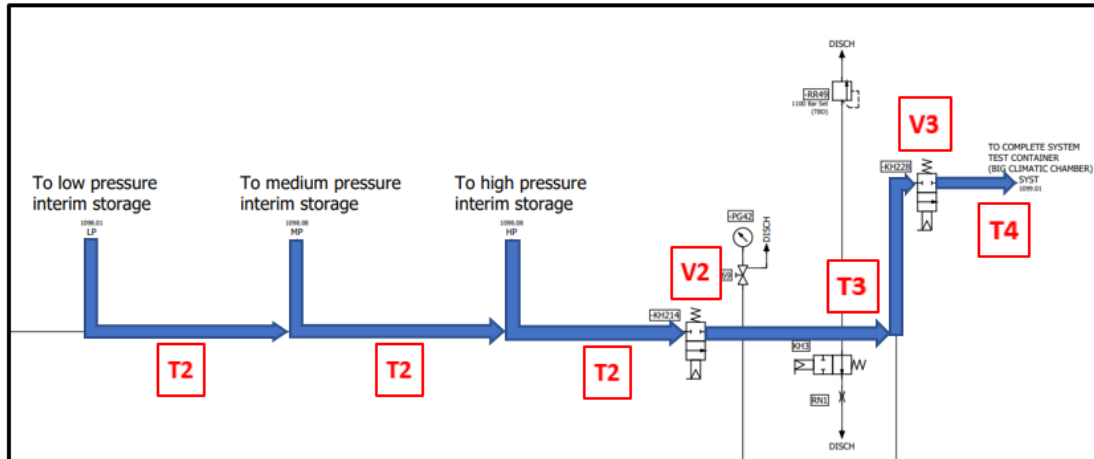
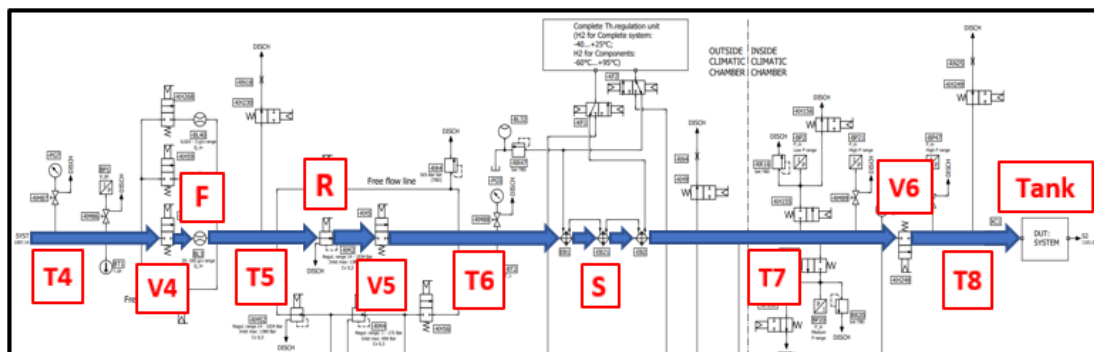


Figura 35 – Schema fluidico degli interim storage aggiornato con le sigle dei componenti



**Figura 36 – Schema fluidico della linea di alimentazione aggiornato con le sigle dei componenti**



**Figura 37 - Schema fluidico della linea di test aggiornato con le sigle dei componenti**

I componenti, visibili negli schemi precedenti, rappresentano gli elementi sul quale occorre basare il calcolo iterativo per l'esecuzione della simulazione.

L'analisi del processo di riempimento in Excel si basa su fogli iniziali per il calcolo dei parametri necessari alla realizzazione delle "tabelle di calcolo". Queste, prelevando i dati dai fogli iniziali, eseguono in modo automatico (o quasi) la simulazione, istante per istante.

In aggiunta, vedremo in seguito, come la scrittura di un file in Visual Basic permetterà, una volta dimensionato il circuito, di ricavare in modo automatico temperatura, pressione, portata massica e quantità di idrogeno immessa nel tank in ogni istante di tempo (per ogni  $\Delta T$  di simulazione) impostato dall'utente.



## 3.2 Calcolo dei parametri iniziali di simulazione

Prima di procedere con la realizzazione delle tabelle Excel, che permettono di effettuare la simulazione del processo di riempimento del tank, mi sono occupato del calcolo dei parametri da porre come input per la simulazione. Per questo motivo, sempre in Excel, attraverso dei fogli di calcolo dedicati, ho ricavato quelle informazioni necessarie da conoscere per il processo di carica quali le perdite di carico concentrate di valvole e misuratori, le perdite di carico distribuite lungo le tubazioni, la rampa di pressione idonea al rifornimento (ricavata tramite metodo delle tabelle) ed il contributo del flusso termico che si instaura tra tank e l'ambiente esterno. Nei seguenti paragrafi sarà illustrato il processo di calcolo di queste grandezze con le rispettive formulazioni.

### 3.2.1 Perdite di carico concentrate

All'interno del circuito sono presenti fondamentalmente quattro tipologie di componenti su cui effettuare il calcolo delle perdite di carico concentrate: le valvole 2-vie (ne sono presenti sei nella linea di test da V1 a V6), il flussimetro (F), il riduttore di pressione (R) e lo scambiatore di calore (S).

Per ciascuno di questi elementi occorre calcolare il coefficiente di portata  $K_v$ , espresso in  $m^3/h$ , in modo da determinare istantaneamente, in funzione del  $\Delta P$  monte-valle, la portata di idrogeno che transita nella linea di test. Il  $K_v$ , in generale, rappresenta il flusso di fluido (gas o liquido) che, in condizioni normali, attraversa una valvola con una caduta di pressione di 1 bar. Per i gas, quale è l'idrogeno, può essere calcolato nel seguente modo:

Se  $p_2 > \frac{p_1}{2}$  (caso di flusso sottocritico)

$$K_v = \frac{Q_N}{514} * \sqrt{\frac{\rho_N * T}{\Delta p * p_2}}$$

Se  $p_2 < \frac{p_1}{2}$  (caso di flusso supercritico)

$$Kv = \frac{Q_N}{257 * p_1} * \sqrt{\rho_N * T}$$

Con:

$p_1$  = pressione d'ingresso valvola [bar]

$p_2$  = pressione d'uscita valvola [bar]

$\Delta p$  = perdita di carico [bar]

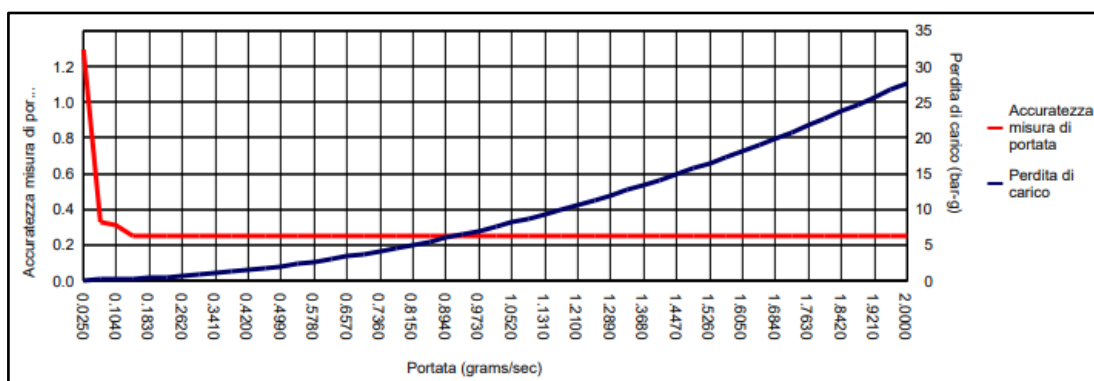
$Q_N$  = portata volumetrica normalizzata [ $m^3/h$ ]

$\rho_N$  = densità normalizzata [ $kg/m^3$ ]

T = temperatura assoluta prima della valvola [K]

N.B. Per i gas, il calcolo normalizzato è effettuato ad 1 atm e 0 °C

Effettuata la scelta dei componenti, sono quindi entrato all'interno dei cataloghi dei fornitori per avere un riscontro sul contributo delle perdite di carico concentrate dei vari misuratori e valvole. Solitamente i fornitori provvedono ad assegnare per ciascun componente o direttamente il valore del Kv, calcolato in condizioni normali, o un grafico delle perdite di carico concentrate della valvola, in funzione della portata di fluido. Stabilito il range di portata di funzionamento del componente, si risale al corrispondente valore delle perdite di carico da introdurre poi nelle formule sopra riportate.



**Figura 38 – Esempio di grafico portata-pressione per la stima delle perdite di carico concentrate**

Per il circuito in esame mi sono trovato di fronte ad un flusso sottocritico (quindi con velocità subsonica) e per il calcolo del  $K_v$  ho utilizzato la prima delle due formulazioni arrivando ai seguenti risultati:

$$K_{v(\text{valvole } 2\text{-vie})} = 1,1245 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$K_{v(\text{flussimetro})} = 0,2243 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$K_{v(\text{riduttore di pressione})} = 0,2595 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$K_{v(3 \text{ scambiatori in linea})} = 1,1751 \text{ m}^3/\text{h}$$

Una volta determinati i valori dei  $K_v$  dei singoli componenti, essendo questi posti tutti in serie lungo la linea di test, ho ricavato il valore del  $K_{eq}$  ( $K_v$  equivalente) in modo da trovare un unico parametro che correlasse tutte le perdite di carico concentrate nel circuito e permettesse un semplice calcolo della portata, dato il differenziale di pressione  $\Delta P_{monte-valle}$ .

*Per elementi in serie si ha:*

$$K_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n N * \frac{1}{K_{v_i}}}$$

Con:

$N$  = numero di elementi per quel tipo di componente

$K_{v_i} = K_v$  di ogni tipo di componente

Si ottiene quindi:

$$K_{eq} = \frac{1}{6 * \left( \frac{1}{K_{v(\text{valv. } 2\text{-vie})}} \right) + 1 * \left( \frac{1}{K_{v(\text{fluss.})}} \right) + 1 * \left( \frac{1}{K_{v(\text{rid.press.})}} \right) + 1 * \left( \frac{1}{K_{v(\text{scamb.})}} \right)}$$

$$K_{eq} = 0,069 \text{ m}^3/\text{h}$$

### 3.2.2 Perdite di carico distribuite lungo le tubazioni

Diverso è il discorso per quanto riguarda le perdite di carico distribuite, per le quali non è possibile ricavare un coefficiente simile al  $Kv$ , ottenuto in condizioni normali, che consenta di stabilire la relazione presente tra la portata e la pressione all'interno di una tubazione.

La consueta formulazione delle perdite di carico distribuite con il fattore di attrito, ricavabile col diagramma di Moody, non risulta adatta per questo tipo di applicazione poiché calcola la variazione della pressione esclusivamente in funzione della velocità del fluido (oltre che alla geometria). Ho avuto invece bisogno di una formulazione che, in funzione di parametri geometrici e di flusso, ma anche della pressione a monte o a valle della tubazione, mi permettesse di calcolare il  $\Delta P$ .

Per questo motivo, dato che la Loccioni non aveva mai fatto analisi di questo tipo sui gas, mi sono messo alla ricerca di una formulazione empirica o semi-empirica che facesse al mio caso, in funzione dei parametri che avevo a disposizione.

Questa ricerca mi ha portato a trovare una formulazione, con unità di misura americane, che viene utilizzata in modo specifico con gas che hanno caratteristiche riconducibili all'idrogeno (basso peso molecolare, effetto Joule-Thomson):

$$P_1^2 - P_2^2 = 25,2 * \left( \frac{S * Q_g^2 * Z * T * f * L}{d^5} \right)$$

Con:

$P_1$  = pressione a monte della tubazione [*psia*]

$P_2$  = pressione a valle della tubazione [*psia*]

$S$  = gravità specifica (o densità relativa) del gas =  $\frac{\rho_{gas}}{\rho_{aria}}$  (adimensionale)

$Q_g$  = portata di gas [*MMScf/D*] (milioni di piedi cubici per giorno)

$Z$  = fattore di comprimibilità del gas (adimensionale)

$T$  = temperatura del flusso [ $^{\circ}R$ ]

$f$  = fattore di attrito di Moody (adimensionale)

$d$  = diametro nominale della tubazione [*in*] (in pollici)

$L$  = lunghezza della tubazione [*ft*] (in piedi)

Questa formulazione permette di calcolare, nota quella a monte o valle, la pressione incognita, in funzione di parametri che in dato intervallo di tempo sono costanti. Vedremo successivamente, analizzando la procedura di simulazione in Excel, come la tabella di calcolo del rifornimento, istante per istante, in funzione della pressione a monte di ogni tubazione, della portata di idrogeno, del fattore di comprimibilità e della temperatura, permette di calcolare la pressione a valle di ogni tratto in modo da ricavare poi le relative perdite di carico.

Queste, appena elencate, sono le grandezze che variano dinamicamente durante il processo di rifornimento ma, riprendendo la formula che calcola le perdite di carico distribuite, ce ne sono altre che rimangono costanti durante la ricarica, tra cui:

$$S (\text{gravità specifica idrogeno}) = 0,0696$$

$$d (\text{diametro tubazioni}) = 0,00793 \text{ m} = 0,3122 \text{ in}$$

$$L_1 = 10 \text{ m} = 32,81 \text{ ft}$$

$$L_2 = 0,5 \text{ m} = 1,64 \text{ ft}$$

N.B. Le lunghezze delle tubazioni sono state suggerite dal mio tutor in modo indicativo, basandosi sulla sua esperienza. La lunghezza  $L_1$  riguarda la linea di alimentazione, denominata con  $T_2$ , e va dai serbatoi di stoccaggio fino alla linea di test. E' per questo motivo che risulta molto più lunga rispetto agli altri tratti che riguardano perlopiù il collegamento tra le varie valvole.

Nella sezione di Visual Basic vedremo se questa configurazione del piping fornisce buoni risultati di processo o se è necessario variare la lunghezza delle tubazioni per ottimizzare le prestazioni della linea di test.

Le grandezze, espresse con unità di misura americane, devono essere opportunamente convertite in accordo con le seguenti formulazioni:

- $1 \text{ psia} = 0,0689476 \text{ bar}$
- $1 \text{ in} = 0,0254 \text{ m}$
- $1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m}$
- $Temp_{\circ R} = \frac{9}{5} * Temp_{\circ C} + 491,67$

- $Q_{\frac{MMscf}{D}} = 3,28^3 * \frac{24}{10^6} * \left(\frac{T_{rif}}{T}\right) * \left(\frac{P}{P_{rif}}\right) * \frac{1}{\rho_{P,T}} * Q_{\frac{kg}{h}}$

Con:

$$T_{rif} = 273,15 K, P_{rif} = 101,325 KPa$$

Ultimo aspetto da considerare per il corretto utilizzo della formula delle perdite di carico è quello che riguarda il fattore di attrito di Moody che viene ricavato, attraverso l'omonimo diagramma, in funzione del numero di Reynolds e della rugosità relativa delle tubazioni:

- $Rugosità\ relativa = \frac{\varepsilon}{d}$
- $Numero\ di\ Reynolds = Re = \frac{\rho * v * L}{\mu}$

Con:

$$\varepsilon = 0,00006\ per\ acciaio$$

$$d = \text{diametro tubazione} = 0,00793\ m$$

$$\rho = \text{densità} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \text{ (varia in funzione della temperatura e della pressione)}$$

$$v = \text{velocità del flusso} [m/s]$$

$$L = \text{lunghezza tubazione} [m]$$

$$\mu = \text{viscosità dinamica}$$

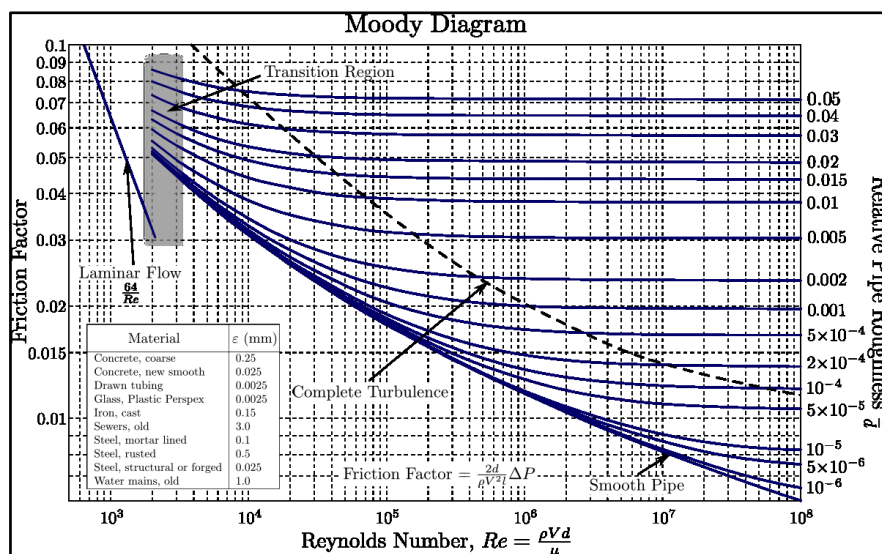


Figura 39 – Diagramma di Moody

Una volta descritti tutti i parametri utilizzati e fatte le opportune conversioni, tramite un foglio Excel dedicato, è stato possibile calcolare il valore delle perdite di carico distribuite lungo qualsiasi tubazione (di diametro e lunghezza nota) per una determinata pressione di ingresso e temperatura del flusso.

Segue la *Tabella 7*, presa da uno dei fogli Excel, che permette il calcolo delle perdite di carico distribuite per assegnati parametri geometrici e di flusso.

Schema di calcolo se procedo da monte a valle						
P1	480	bar		P1	6961,811424	psia
P1	48000000	Pa				
T	-10	°C		T	473,67	°R
T	263,15	°K				
pH2	32,888	kg/m <sup>3</sup>	Utilizzare il link per calcolare la densità alla temperatura e pressione di utilizzo <a href="https://cmb.tech/hydrogen-tools">https://cmb.tech/hydrogen-tools</a>			
PM(H2)	2,016	g/mol				
PM(aria)	28,96443	g/mol		S	0,069602613	
V	2800	L		V	2,8	m <sup>3</sup>
m	92,0864	kg		m	92086,4	g
n	45677,77778	mol				
Vm	0,061298954	L/mol				
R(H2)	8,313984	J/(mol*K)		Z	1,344874449	
Prif	101,325	KPa				
Trif	273,15	°K				
Q	100	g/s				
V(gas)	10,94624179	m <sup>3</sup> /h		V(standard)	4558482,221	ft <sup>3</sup> /day
V(standard)	5382,542807	SM <sup>3</sup> /h		Qg	4,558482221	MMscf/D
d	0,00793	m		d	0,312204893	in
L	0,5	m		L	1,64042	ft
Area sez.	4,93897E-05	m <sup>2</sup>				
v	61,56392214	m/s				
μ	10,362	μPa*s				
Re	1549506,289					
ε	0,00006	m				
e/d	0,007566204			f	0,035	
P2	6929,458999	psia				
ΔP	32,35242529	psia		ΔP	2,230617168	bar

**Tabella 7 – Calcolo delle perdite di carico distribuite lungo una tubazione**

### 3.2.3 Rampa di pressione del rifornimento

In merito alla rampa di pressione da imporre al rifornimento abbiamo già ampiamente parlato nel primo capitolo di quest'elaborato, descrivendo la metodologia di calcolo dei vari parametri e l'utilizzo delle tabelle. Arrivati a questo punto

l'obiettivo è quello di ricavare la rampa di pressione per un dato rifornimento da testare.

Il cliente, con l'utilizzo della camera climatica, può variare le condizioni "ambientali" e quindi la temperatura esterna alla quale si trova il tank, influenzando in maniera significativa sulla rampa da impostare, per verificare le differenze tra più tipi di test.

Il mio compito, inizialmente, è stato quello di effettuare una simulazione di rifornimento in condizioni standard, ovvero quelle suggerite dalla norma, per quanto riguarda le condizioni al contorno, mentre, per i parametri del tank, ho preso semplicemente quelli forniti dal cliente.

Una volta impostato in questo modo il lavoro ed ottenuti i primi risultati, con l'obiettivo di valutare le differenze presenti tra diversi processi di ricarica, ho implementato uno script in Visual Basic che mi ha permesso di variare velocemente le condizioni al contorno per valutare i cambiamenti sul riempimento (questa ultima parte la vedremo solamente negli ultimi paragrafi di questo capitolo).

Partendo quindi da quanto detto in precedenza, le condizioni dal quale sono partito per il calcolo della rampa sono:

- Volume Tank:  $V = 750 L$  (un volume di queste dimensioni classifica il CHSS, ovvero il tank, con la categoria D).
- Pressione iniziale Tank:  $P_0 = 2 MPa = 20 bar$ .
- Rifornimento classe T40-H70: la temperatura di  $-40\text{ }^{\circ}C$ , secondo quanto stabilito da norma, permette di ottenere prestazioni migliori; la pressione finale di  $70 MPa$  ( $700 bar$ ) si è resa necessaria perché il tank analizzato risulta di categoria D.
- Rifornimento con comunicazione
- Temperatura ambiente:  $T = 15\text{ }^{\circ}C = 288,15 K$ .

La conoscenza di questi parametri permette, in modo univoco, di calcolare la rampa di pressione da impostare al rifornimento.





H70-T40D Capacity Category D Comm	APRR [MPa/ min]	Target Pressure $P_{target}$ [MPa]	Target Pressure Top-Off [MPa]	Top-Off- APRR [MPa/ min]	Target Pressure, $P_{target}$ [MPa]												
					Initial Tank Pressure, $P_0$ [MPa]												
					0,5 - 5 (no interpolation)				0,5	2	5	10	15	20	30	40	50
>50	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
50	7,6	77,9	87,5	2,8	see Top-Off	see Top-Off	81,1	86,2	86,9	86,6	85,8	84,9	83,8	82,6	81,0	81,0	no fueling
45	11,0	75,8	87,5	3,8	see Top-Off	see Top-Off	81,4	87,0	86,7	86,2	85,2	84,1	82,8	81,4	79,6	79,6	no fueling
40	14,5	72,8	87,4	4,5	see Top-Off	see Top-Off	81,2	87,0	86,4	85,9	84,6	83,3	81,8	80,2	78,2	78,2	no fueling
35	15,3	72,2	87,4	4,6	see Top-Off	see Top-Off	81,1	87,0	86,4	85,9	84,6	83,2	81,7	80,1	78,2	78,2	no fueling
30	17,9	70,5	87,4	5,0	see Top-Off	see Top-Off	81,1	86,9	86,3	85,6	84,2	82,6	81,0	79,2	77,2	77,2	no fueling
25	19,9	71,1	87,3	5,4	see Top-Off	see Top-Off	83,2	86,8	86,0	85,3	83,7	82,0	80,2	78,3	76,1	76,1	no fueling
20	19,9	77,4	87,3	5,6	see Top-Off	see Top-Off	87,1	86,4	85,5	84,7	83,0	81,2	79,3	77,4	75,0	75,0	no fueling
10	19,9	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	87,3	87,1	86,6	85,7	84,8	83,9	82,0	80,0	78,0	75,9	73,4	73,4	no fueling
0	19,9	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	86,6	86,3	85,7	84,6	83,4	82,3	80,0	77,7	75,4	72,9	72,9	72,9	no fueling
-10	19,9	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	86,4	86,1	85,5	84,4	83,2	82,1	79,8	77,5	75,2	72,8	72,8	72,8	no fueling
-20	19,9	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	86,2	85,9	85,3	84,2	83,0	81,9	79,6	77,3	75,0	72,6	72,6	72,6	no fueling
-30	19,9	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	86,0	85,7	85,0	83,9	82,8	81,7	79,4	77,1	74,8	72,4	72,4	72,4	no fueling
-40	19,9	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	85,8	85,5	84,8	83,7	82,6	81,4	79,2	76,9	74,6	72,3	72,3	72,3	no fueling
<-40	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling

Tabella 9 - Tabella per un rifornimento H70-T40 con comunicazione (categoria D)

N.B. Per la determinazione della  $P_{target}$  e della  $APRR_{actual}$  è stato seguito un processo di interpolazione lineare vista la presenza di una  $T_{amb}$  che, sulle tabelle, risulta o di 10 °C e 20 °C, ottenendo:

$$P_{target} = 87,3 \text{ MPa} = 873 \text{ bar}$$

$$APRR_{actual} = 19,9 \frac{\text{MPa}}{\text{min}} = 3,3167 \frac{\text{bar}}{\text{s}}$$

- 3) Una volta calcolata la  $APRR_{actual}$ , sono passato alla determinazione della  $APRR_{calculated}$  seguendo la formulazione espressa dalla norma:

$$APRR_{calculated} = 28,5 * \frac{V_{stationD}}{V_{CHSS}}$$

Con:

$V_{stationD}$  = rappresenta un valore settato dalla stazione che deve essere compreso tra 137 L e 174 L

$V_{CHSS}$  = volume del CHSS da riempire con idrogeno

Considerando il valore di  $V_{station_p}$  stabilito dalla norma tra 137 L e 174 L, ho calcolato le  $APRR_{calculated}$  massima e minima, utilizzando questi valori in aggiunta al  $V_{CHSS} = 750 L$ :

$$APRR_{calculated_{min}} = 28,5 * \frac{137}{750} = 5,206 \frac{MPa}{min} = 52,06 \frac{bar}{min}$$

$$APRR_{calculated_{max}} = 28,5 * \frac{174}{750} = 6,612 \frac{MPa}{min} = 66,12 \frac{bar}{min}$$

- 4) Il passo successivo è stato quello di determinare la  $APRR_{calculated_{media}}$  tra i valori massimi e minimi precedentemente calcolati:

$$APRR_{calculated_{media}} = \frac{APRR_{calculated_{min}} + APRR_{calculated_{max}}}{2}$$

$$APRR_{calculated_{media}} = \frac{52,06 + 66,12}{2} = 59,09 \frac{bar}{min}$$

- 5) Secondo quanto descritto dalla norma la  $APRR_{target}$  sarà uguale a:

$$APRR_{target} = \min(APRR_{calculated}, APRR_{actual})$$

$$APRR_{target} = 59,09 \frac{bar}{min} = 0,9848 \frac{bar}{s}$$

- 6) Determinata la rampa, l'attenzione si è spostata verso il calcolo di ulteriori parametri utili per il rifornimento quali il tempo di startup e gli intervalli di tolleranza della rampa:

$$t_{startup} \geq \frac{a * V^b * m_{startup}^c}{APRR_{target}}$$

Con:

$APRR_{target}$  = rampa media di pressione stabilita tramite metodo delle tabelle

V = volume del CHSS (tank)

$m_{startup}$  = massa fornita dalla stazione durante il tempo di avvio, solitamente pari a 200 grammi (serve per aprire la valvola di ritegno del tank per consentire la misura della pressione del CHSS)

$a = 1,717$  (costante determinata sperimentalmente)

$b = -0,9773$  (costante determinata sperimentalmente)

$c = 0,9828$  (costante determinata sperimentalmente)

$$t_{startup_{minimo}} = 4,932447 \text{ s}$$

Mentre per gli intervalli di tolleranza della rampa:

$$P_{station} \leq P_{startup} + (APRR_{target} * t_{fueling}) + \Delta P_{upper}$$

$$P_{station} \geq P_{startup} + \text{Max}[(1 \text{ MPa/min} * t_{fueling}) - \Delta P_{lower}; 0]$$

Con:

$t_{fueling}$  = tempo effettivo di riempimento = 8 min (calcolato da inizio immissione idrogeno fino all'istante di tempo considerato per il calcolo dell'intervallo).

$\Delta P_{upper} = 7 \text{ MPa}$  (determinata sperimentalmente)

$\Delta P_{lower} = 2,5 \text{ MPa}$  (determinata sperimentalmente)

$$P_{station_{max}(fine\ rifornimento)} = 89,547 \text{ MPa} = 895,47 \text{ bar}$$

$$P_{station_{min}(fine\ rifornimento)} = 7,5 \text{ MPa} = 75 \text{ bar}$$

### 3.2.4 Flusso termico sul tank

L'ultimo parametro da definire, prima di iniziare ad impostare il foglio di calcolo della simulazione vera e propria, è stato il flusso termico a cui è soggetto il tank durante il rifornimento.

Partendo dai parametri geometrici del tank, mi sono calcolato la superficie totale di scambio termico, considerando il contributo portato sia dai due tank di dimensioni inferiori che da quello più grande.

Il calcolo è stato realizzato sia per la parte interna della bombola, in polimero termoplastico (chiamata liner), sia per quella esterna in materiale composito (chiamata mantello), per riuscire a valutare in modo completo il processo di scambio termico.

Nelle seguenti tabelle, che mostrano i parametri utilizzati per il calcolo delle superfici, sono state volutamente oscurate le caselle che contengono i dati geometrici reali dei tank in quanto sono vincolati da accordi di privacy tra cliente e produttore del banco di test.

I dati che sono visibili non sono altro che il risultato dei calcoli effettuati su quelle grandezze, utilizzando banalmente le formule di calcolo dell'area, e riguardano la superficie interna totale del tank, a contatto con l'idrogeno, e quella esterna a contatto con l'ambiente circostante.

Bombola piccola			Bombola grande		
D_est		m	D_est		m
L		m	L		m
s_liner		m	s_liner		m
s_mantello		m	s_mantello		m
r_int_liner		m	r_int_liner		m
r_est_mantello		m	r_est_mantello		m
S_cilindrica_liner		m <sup>2</sup>	S_cilindrica_liner		m <sup>2</sup>
S_sferica_liner		m <sup>2</sup>	S_sferica_liner		m <sup>2</sup>
S_liner_tot		m <sup>2</sup>	S_liner_tot		m <sup>2</sup>
S_cilindrica_mant		m <sup>2</sup>	S_cilindrica_mant		m <sup>2</sup>
S_sferica_mant		m <sup>2</sup>	S_sferica_mant		m <sup>2</sup>
S_mant_tot		m <sup>2</sup>	S_mant_tot		m <sup>2</sup>
S_liner_tot_bomb	7,54475781	m <sup>2</sup>	S_mant_tot_bomb	9,43582066	m <sup>2</sup>

*Tabella 10 – Calcolo delle superfici di scambio termico per il tank*

I processi di scambio termico ai quali è legato il tank, durante la ricarica di idrogeno, sono fondamentalmente tre:

- 1) Scambio termico per conduzione: l'idrogeno, man mano che il tank viene riempito, subisce un processo di surriscaldamento, dai -40 °C al quale solitamente entra, fino agli 85 °C finali consentiti dalla norma. Per questo motivo, non essendoci equilibrio termico tra tank ed l'ambiente circostante, ci sarà un flusso termico in uscita, sia attraverso il liner che attraverso il mantello, secondo una legge che è quella di Fourier:

$$Q_{\text{cond}} = -\lambda * S * \frac{\Delta T}{d} * \Delta t$$

Con:

$Q_{\text{cond}}$  = calore trasferito (ceduto o assorbito) per conduzione [J]

$\lambda$  = conducibilità termica del materiale  $\left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$

$S$  = superficie di scambio termico [m<sup>2</sup>]

$\Delta T$  = differenza di temperatura tra i due lati [K]

$d$  = spessore [m]

$\Delta t$  = intervallo di tempo [s]

- 2) Scambio termico per convezione: è un processo che avviene sia internamente che esternamente al tank. Nella parte interna, l'idrogeno, in pressione, scambia calore con la superficie interna del liner per convezione forzata mentre, nella parte esterna, avviene uno scambio termico per convezione naturale tra la superficie esterna del mantello e l'aria che lambisce il tank. I due processi di scambio termico, che presuppongono l'utilizzo di un coefficiente  $h$  di trasferimento di calore per convezione differente, sono accomunati dalla stessa formulazione, nota come equazione di Newton:

$$Q_{\text{conv}} = h * S * (T_p - T_l) * \Delta t$$

Con:

$Q_{\text{conv}}$  = calore trasferito per convezione [J]

$h$  = coefficiente di trasferimento di calore per convezione  $\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

$S$  = superficie di scambio termico [m]

$T_p$  = temperatura della parete [K]

$T_l$  = temperatura del fluido [K]

$\Delta t$  = intervallo di tempo [s]

Il contributo dato da questi tre fattori può essere considerato attraverso un unico parametro, in analogia con l'elettrotecnica. Si tratta di un coefficiente  $R_T$ , detto resistenza termica totale, reciproco della trasmittanza termica, definita come la potenza termica scambiata da un corpo o materiale per unità di superficie ed unità di differenza di temperatura.

Questo parametro considera i contributi di scambio termico per convezione forzata (all'interno del tank), per conduzione (attraverso il liner ed il mantello del tank) e per convezione naturale (all'esterno del tank) come se fossero resistenze non "elettriche" ma "termiche" in serie tra loro.

Partendo dall'interno del tank fino alla parte di mantello a contatto con l'ambiente esterno, questo parametro può essere espresso come:

$$R_{T_{tot}} = \frac{1}{G} = \frac{1}{h_{idrogeno}} + \frac{S_{liner}}{\lambda_{liner}} + \frac{S_{mantello}}{\lambda_{mantello}} + \frac{1}{h_{aria}}$$

La *Tabella 11* mostra il contributo di resistenza termica totale del tank, nonostante l'assenza, per i soliti motivi di privacy del cliente, dei valori di conducibilità termica e dei coefficienti di trasferimento di calore per convezione.

Conduzione calore			Convezione termica		
$\lambda_{liner}$		W/(m*K)	$h_{aria}$		W/m <sup>2</sup> *K
$\lambda_{mantello}$		W/(m*K)	$h_{idrogeno}$		W/m <sup>2</sup> *K
$R_{tot}$	0,08867143	(m <sup>2</sup> *K)/W			

*Tabella 11 – Calcolo della resistenza termica totale*

Il valore di  $R_{T_{tot}}$  sarà utilizzato in fase di simulazione, insieme al  $\Delta T$  di temperatura e alla superficie del tank, per il calcolo del flusso termico totale verso l'esterno.

### 3.3 Impostazione del foglio di calcolo Excel

Passiamo ora alla descrizione del foglio di calcolo in Excel, o per meglio dire dei tre fogli di calcolo identici, uno per ogni serbatoio di stoccaggio, collegati tra loro, che permettono di effettuare la simulazione del processo di riempimento dei tank.

Ciascuno di questi tre fogli di calcolo si compone di una tabella iniziale, che contiene le informazioni necessarie al processo di ricarica, di una di calcolo delle perdite di carico della linea di test e di una di simulazione, che esegue il calcolo dei parametri di riempimento ad ogni  $\Delta t$  di simulazione.

Analizziamo ora nel dettaglio gli elementi ed i parametri che fanno parte di ciascuna di queste.

#### 3.3.1 Tabella dei parametri iniziali

La tabella dei parametri iniziali (*Tabella 12*) è caratterizzata dalla presenza di differenti grandezze che consentono alla tabella di simulazione di effettuare i propri calcoli:

- Caratteristiche dell'idrogeno: insieme dei parametri fisici che rappresentano lo stato dell' $H_2$  come la costante reale  $R$  del gas (pari a  $4124 \frac{J}{kg \cdot K}$ ), i valori di coefficiente di comprimibilità  $Z$  (alla pressione di 0, 20, 1000 bar), il valore del calore specifico a pressione costante  $c_p$  ed il coefficiente di dilatazione adiabatica  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ .
- Caratteristiche dello storage: rappresentano lo stato di ciascun serbatoio di stoccaggio dell'idrogeno (a bassa, media ed alta pressione). Sono inclusi



differenti parametri quali: la temperatura iniziale dello *storage*, la pressione iniziale, il volume e la massa iniziale di idrogeno in esso contenuta.

- Caratteristiche del tank: sono rappresentate dai parametri geometrici e fisici delle bombole come la temperatura e la pressione iniziale, il volume e la massa iniziale di idrogeno (il tank non viene mai scaricato completamente), la superficie e la resistenza al flusso termico  $R_{T_{tot}}$ .
- Caratteristiche della simulazione: comprendono i valori di temperatura sia dell'ambiente esterno  $T_{amb}$  che quella in uscita dello scambiatore di calore (nel caso iniziale in esame pari a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , rifornimento T40), il valore della rampa di ricarica  $APRR_{target}$  calcolata attraverso il metodo delle tabelle ed il  $\Delta t$  di analisi da imporre alla simulazione (più piccolo è  $\Delta t$  e più precisa sarà la simulazione).

Grandezze costanti del sistema		
Temperatura iniziale storage	288,15	'K
Pressione iniziale storage	480	bar
Temperatura iniziale tank	288,15	'K
Pressione iniziale tank	20	bar
R (idrogeno)	4124	J/(kg*K)
Z (1000 bar)	1,65	
Z (0 bar)	1	
Z (20 bar)	1,013	
Volume storage	2,8	m <sup>3</sup>
Massa iniziale storage	85,5	kg
Volume bombola	0,75	m <sup>3</sup>
Massa H2 nel tank	1,246076005	Kg
Temperatura minima (scambiatore)	233,15	'K
Temperatura ambiente	288,15	'K
Superficie bombola	9,435820659	m <sup>2</sup>
Resistenza flusso termico	0,088671429	'K/W
Cp_idrogeno	14435	J/(Kg*K)
$\gamma$ idrogeno	1,405	
$\Delta t_{simulazione}$	0,1	s
APRR (rampa pressione)	0,984833333	bar/s

*Tabella 12 – Esempio di tabella dei parametri iniziali di riempimento*

### 3.3.2 Tabella di calcolo delle perdite di carico

Prima di iniziare la descrizione della tabella di calcolo, occorre fare un accenno ad un ulteriore foglio di calcolo, collegato alla tabella di simulazione, con il quale vengono scambiate informazioni e parametri.

Si tratta di un insieme di tabelle che permettono di calcolare le perdite di carico della linea di test e di stabilire, prelevando i valori di pressione monte-valle e di portata massica dalla tabella di simulazione, se c'è ancora un differenziale di pressione disponibile tra lo storage ed il tank, con l'obiettivo di portare avanti il calcolo.

Caratteristiche nominali fluido ed impianto			Calcolo il Keq considerando i Kv delle valvole e dei misuratori ricavati tramite il foglio n°2			Ipotizzo una nuova portata volumetrica Q1 a valle tale per cui Q1 > Q0			Con la nuova portata volumetrica ipotizzata a valle (Q1) risalgo lungo la linea calcolando le perdite di carico del circuito idraulico				
Densità			Kv (2-vie)	1,1245	m <sup>3</sup> /h	Q1	591,4731	Nm <sup>3</sup> /h		P valle [bar]	ΔP [bar]	P monte [bar]	
pn	0,08988	kg/l/m <sup>3</sup>	N valvole 2-vie	6		Q1	14,76711	g/s					
Temperatura			Kv (flussimetro)	0,2243	m <sup>3</sup> /h					Tubazione (T8)	970,5611	0,0379	970,5391
Tmin	233,15	K	N flussimetri	1						Valvola 2-vie (V6)	970,5391	0,0226	970,6217
Tmax	288,15	K	Kv (riduttore di p)	0,2595	m <sup>3</sup> /h					Tubazione (T7)	970,6217	0,0379	970,6596
Tmedia	260,65	K	N riduttori	1						Scambiatore di calore (S)	970,6596	0,0231	970,6827
Pressione			Kv (scambiatore)	1,1751	m <sup>3</sup> /h					Tubazione (T6)	970,6827	0,0477	970,7304
Pf	973,1425	bar	N scambiatori	1						Valvola 2-vie (V5)	970,7304	0,0279	970,7583
Pb	970,5611	bar	Keq	0,069	m <sup>3</sup> /h					Riduttore di pressione (R)	970,7583	0,5246	971,2830
ΔP0	2,581379	bar								Tubazione (T5)	971,2830	0,0477	971,3306
										Flussimetro (F)	971,3306	0,7015	972,0321
										Valvola 2-vie (V4)	972,0321	0,0279	972,0600
										Tubazione (T4)	972,0600	0,0477	972,1077
										Valvola 2-vie (V3)	972,1077	0,0279	972,1356
										Tubazione (T3)	972,1356	0,0477	972,1833
										Valvola 2-vie (V2)	972,1833	0,0279	972,2112
										Tubazione (T2)	972,2112	0,9534	973,1646
										Valvola 2-vie (V1)	973,1646	0,0279	973,1924
										Tubazione (T1)	973,1924	0,0477	973,2401
										Totale		2,6780	973,2401
										ΔP0 > ΔP1?	FALSO		
										ΔP0 - ΔP1	-0,0976	bar	

**Tabella 13 – Calcolo delle perdite di carico totali lungo la linea di test**

In particolare sono presenti 4 piccole tabelle che, prelevando i parametri, consentono di effettuare il calcolo:

- 1) Tabella n°1: preleva, dalla tabella di calcolo, il valore della densità, la temperatura ambiente e di refrigerazione dello scambiatore di calore (con il successivo calcolo di una temperatura media tra le due) ed i valori di pressione dello storage e del tank istante per istante durante la simulazione. Viene anche calcolato il differenziale di pressione disponibile tra monte e valle in grado di determinare un flusso di idrogeno.
- 2) Tabella n°2: riguarda la parte delle valvole e dei misuratori del circuito. Sono presenti i valori dei  $K_v$  dei singoli componenti ed altre caselle che individuano il numero di valvole presenti per ogni tipologia. Tramite questi parametri viene calcolato, secondo quanto detto nei paragrafi precedenti, il  $K_{eq}$ .

- 3) Tabella n°3: viene prelevato il valore di portata massica calcolato nella tabella di simulazione, per essere poi trasformato in  $Nm^3/h$  tramite il valore della densità presente nella prima delle quattro tabelle.
- 4) Tabella n°4: partendo dal valore di pressione del tank (pressione a valle), effettua un calcolo delle perdite di carico (sia concentrate che distribuite) a ritroso, partendo quindi dal tank del cliente.

Nel caso delle perdite concentrate il calcolo viene effettuato direttamente in questo foglio Excel, conoscendo il valore di portata massica ed il  $K_v$  della valvola. Il contributo delle perdite di carico del componente viene sommato alla pressione a valle per trovare quella a monte.

Nel caso delle perdite distribuite (quelle delle tubazioni) il valore della perdita di carico viene calcolato entrando, con il rispettivo valore di pressione a valle e di flusso, nel foglio di calcolo delle perdite distribuite, già visto in uno dei paragrafi precedenti, che, conoscendo i vari parametri geometrici, permette il calcolo della pressione a monte. Il valore ricavato viene copiato di nuovo nella tabella di partenza per completare il calcolo delle perdite di carico.

Il processo, come detto, avviene a ritroso partendo dal tratto di tubazione T8 fino alla T1 passando attraverso tutti i componenti della linea di test. Al termine del processo viene calcolata la perdita di carico totale della linea per quella data portata di idrogeno che, se è inferiore al  $\Delta P$  monte-valle disponibile, assicura il fatto che il flusso di idrogeno continui. Se la differenza  $\Delta P_{disponibile} - \Delta P_{calcolato}$  è negativa vuol dire che per quella data portata non è possibile far fluire idrogeno, poiché il  $\Delta P$  disponibile, e quindi spendibile dal circuito, è minore di quello che effettivamente viene speso.

### 3.3.3 Tabella di simulazione

La tabella di simulazione ha una costruzione molto complessa e non rappresentabile in un'unica figura. Si tratta di una grande tabella composta da 27 colonne, in ognuna delle quali viene effettuato il calcolo di un parametro funzionale alla simulazione.

In ogni riga della tabella vengono ricavati, per ogni istante temporale, i valori di tutte le grandezze che andremo poi a definire, in modo da seguire automaticamente l'andamento della simulazione. Il processo riga per riga andrà avanti sino al momento in cui è disponibile un  $\Delta P$  di pressione monte-valle tale che sia consentito il flusso per quel dato *storage*. Terminata questa sorta di “serbatoio” di pressione disponibile (dato ad esempio per il *low pressure storage*) bisogna passare ad un successivo foglio Excel, equivalente al primo, ma con all'interno i parametri dello *storage* successivo (*medium pressure storage*).

Iniziamo quindi a descrivere, colonna per colonna, le grandezze calcolate all'interno di ogni ciclo di simulazione:

- **Istante di tempo  $t$  [s]:** è il parametro che rappresenta il progredire della simulazione e permette il calcolo di grandezze come, ad esempio, la quantità di idrogeno fornita al tank in un certo intervallo di tempo. Naturalmente più piccolo è l'intervallo di tempo in cui si eseguono i calcoli dei vari parametri e più preciso sarà il livello di approssimazione della simulazione stessa (in Excel si è costretti a sviluppare una simulazione di tipo discreto e non continua). Progredisce automaticamente secondo il  $\Delta t$  di simulazione immesso nella tabella dei parametri iniziali.
- **Portata massica  $Q_m$  [g/s]:** parametro che viene calcolato al termine di ogni istante temporale come risultato del processo di minimizzazione del  $\Delta P$  presente tra la pressione effettiva del tank e quella che in realtà dovrebbe avere secondo la rampa calcolata. Ponendo uguale a zero il differenziale di pressione tra rampa e tank si ottiene la portata che in quel  $\Delta t$  permette di annullare il  $\Delta P$ . Il dato di portata, che è posto nella seconda colonna e permette i calcoli successivi, viene prelevato all'istante di tempo precedente (all'inizio della simulazione, al tempo  $t_0 = 0$  s, viene inizializzato con il valore 0 perché effettivamente non circola portata di idrogeno nel circuito).
- **Variazione della quantità di idrogeno nello storage nell'intervallo considerato  $\Delta m_s$  [kg]:** rappresenta la quantità di idrogeno che in quell'istante di tempo è uscita dal serbatoio di stoccaggio per dirigersi verso il tank. E' calcolata come:

$$\Delta m_{s_i} = \frac{Q_{m_i}}{1000} * (t_i - t_{i-1}) \quad \text{con } Q_{m_i} \left[ \frac{kg}{s} \right] = \frac{Q_{m_i} \left[ \frac{g}{s} \right]}{1000}$$

- **Variazione della massa totale di idrogeno nello storage considerato  $\Delta M_s$  [kg]:** rappresenta la quantità di idrogeno che fino a quell'istante di tempo è stata prelevata dal serbatoio di stoccaggio. E' data da quella totale all'istante precedente più quella nell'intervallo considerato:

$$\Delta M_i = \Delta M_{i-1} + \Delta m_i$$

- **Quantità di idrogeno residua nello storage  $M_{s_{res}}$  [kg]:** non è altro che la differenza tra la massa totale di idrogeno nello *storage* prima dell'inizio simulazione e quella totale fuoriuscita fino a quel momento:

$$M_{s_{res}_i} = M_{iniziale_{storage}} - \Delta M_i$$

- **Quantità di idrogeno presente nel tank  $M_{b_{new}}$  [kg]:** rappresenta la quantità di idrogeno che in quell'istante di tempo è presente nel tank. E' la somma tra la massa di idrogeno presente nel tank prima della simulazione più quella che fino a quell'istante di tempo si è trasferita dallo storage al tank (la quantità di idrogeno che esce dallo storage è esattamente quella che arriva al tank, senza perdite o fuoriuscite):

$$M_{b_{new}_i} = M_{iniziale_{tank}} + \Delta M_i$$

- **Pressione dello storage  $P_s$  [bar] e [Pa]:** rappresenta la pressione dell'idrogeno all'interno dello storage. Al primo istante temporale sarà pari a quella definita nella tabella dei parametri iniziali ma, con il proseguire dalla simulazione, istante per istante, diminuendo la quantità di idrogeno in esso presente, scenderà anch'essa di un valore  $\Delta P_s$ , che definiremo in seguito, calcolato all'istante precedente:

$$P_{s_i} = P_{s_{i-1}} - \Delta P_{s_{i-1}}$$

Istante di tempo	Portata massica	Var. Ms intervallo	Variazione Ms totale.	Ms residua	Mb aggiornata	Pressione storage iniziale	
t [s]	Qm [g/s]	Δms [kg]	ΔMs [kg]	Ms_res [kg]	Mb_new [kg]	Ps [bar]	Ps [Pa]
0	0	0	0	85,5	1,246076005	480	48000000
0,1	50,11658673	0,005011653	0,005011653	85,49498834	1,251087664	480	48000000
0,2	49,95238919	0,004995239	0,010006898	85,4899931	1,256082903	479,9720942	47997209,42
0,3	49,5439011	0,00495433	0,014961288	85,48503871	1,261037293	479,9442802	47994428,02

**Tabella 14 – Tabella di simulazione: colonne dalla 1 alla 8**

- **Coefficiente di comprimibilità dell'idrogeno nello storage  $Z_s$ :** è un parametro fondamentale per l'applicazione della legge di stato dei gas reali. Viene calcolato sia per lo *storage* che, come vedremo successivamente, per il tank. Il suo andamento risulta lineare rispetto alla pressione per cui una volta definiti due valori (a 0 e 1000 bar) si procede al calcolo, per intervalli, a seconda del livello di pressione:

$$Z_{P_{S_i}} = Z_{0bar} + \frac{Z_{1000bar} - Z_{0bar}}{1000} * P_{S_i}$$

- **Densità dell'idrogeno nello storage  $\rho_s \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$ :** è ricavata tramite l'applicazione della legge di stato dei gas reali considerando la temperatura degli storage pari a quella ambiente (una volta caricato dai compressori, l'idrogeno nello storage viene fatto portare in equilibrio termico con l'ambiente prima di procedere con il rifornimento):

$$P_{S_i} = \rho_{S_i} * R_{H_2} * T_s * Z_{S_i}$$

$$\rho_{S_i} = \frac{P_{S_i}}{R * T_s * Z_{S_i}}$$

- **Variazione di pressione dello storage  $\Delta P_s [Pa]$  e  $[bar]$ :** è calcolata applicando sempre la legge di stato dei gas reali considerando, però questa volta, la variazione di massa all'interno dello storage:

$$\Delta P_{S_i} = \frac{\Delta m_{S_i}}{V_s} * R_{H_2} * T_s * Z_{P_s}$$

- **Pressione dello storage aggiornata  $P_{s_{new}}$  [bar]:** è pari alla pressione dello storage all'istante di tempo precedente meno la diminuzione causata della quantità di idrogeno in uscita:

$$P_{s_{new_i}} = P_{s_{i-1}} - \Delta P_{s_i}$$

- **Coefficiente di comprimibilità dell'idrogeno nel tank  $Z_b$ :** è ricavato in modo simile a quello per lo storage con l'introduzione di una piccola approssimazione. Viene infatti calcolato considerando la pressione nel tank, calcolata però all'istante precedente. Questa approssimazione risulta ammissibile per il fatto che la variazione del coefficiente di comprimibilità, tra due istanti successivi, risulta molto piccola:

$$Z_{P_{b_i}} = Z_{0_{bar}} + \frac{Z_{1000_{bar}} - Z_{0_{bar}}}{1000} * P_{b_{i-1}}$$

- **Densità dell'idrogeno nel tank  $\rho_b$  [ $\frac{kg}{m^3}$ ]:** è calcolata semplicemente dividendo la massa di idrogeno presente nel tank con il volume di quest'ultimo:

$$\rho_{b_i} = \frac{M_{b_{new_i}}}{V_b}$$

Coeff. Comprimibilità (H2 storage)	Densità	Variazione Ps		Ps aggiornata	Coeff. Comprimibilità (H2 bombola)	Densità H2 bombola
Zs	ps [kg/m <sup>3</sup> ]	ΔPs [Pa]	ΔPs [bar]	Ps_new [bar]	Zb	pb [kg/m <sup>3</sup> ]
1,312	30,78719496	0	0	480	1,013000000	1,661434673
1,312	30,78719496	2790,580591	0,027905806	479,9720942	1,013000000	1,668116885
1,311981861	30,7858307	2781,399326	0,027813993	479,9442802	1,013063534	1,674777204

**Tabella 15 - Tabella di simulazione: colonne dalla 9 alla 15**

- **Costante K della legge dei gas [ $\frac{Pa}{K}$ ]:** è parametro discendente dalla legge di stato dei gas reali, calcolato per una facilità di applicazione delle successive formulazioni. Non rappresenta altro che una costante, per ogni Δt di simulazione, che ha le dimensioni fisiche di un [ $\frac{Pa}{K}$ ] e correla la pressione alla temperatura:

$$P_{b_i} = \rho_{b_i} * R_{H_2} * T_{b_i} * Z_{b_i}$$

$$P_{b_i} = K_{b_i} * T_{b_i} \quad \text{con } K_{b_i} = \rho_{b_i} * R_{H_2} * Z_{b_i}$$

- **Differenza di temperatura dovuta alla miscelazione  $\Delta T_{misc}$  [K]:** rappresenta uno dei tre contributi che provocano una variazione di temperatura dell'idrogeno all'interno del tank. In particolare il  $\Delta T_{misc}$  è conseguenza del flussaggio di idrogeno freddo (intorno ai -40 °C nel nostro caso) che all'interno del tank si miscela con quello già presente all'interno, sicuramente più caldo. Viene calcolato considerando la massa di idrogeno che entra nel tank all'istante attuale e quella che è già presente all'interno del tank all'istante precedente, ad una certa temperatura (già calcolata nelle precedenti colonne):

$$\Delta T_{misc_i} = \frac{\Delta m_{s_i} * T_{refrigerazione} + M_{b_{new(i-1)}} * T_{b_{i-1}}}{M_{b_{new_i}}} - T_{b_{i-1}}$$

con  $M_{b_{new_i}} = M_{b_{new(i-1)}} + \Delta m_{s_i}$

- **Differenza di temperatura dovuta alla compressione  $\Delta T_{compr}$  [K]:** rappresenta un ulteriore contributo di variazione della temperatura che, a differenza della miscelazione, provoca un riscaldamento dell'idrogeno presente all'interno del tank. Questo contributo, dovuto alla compressione dell'idrogeno, è ricavabile, in prima approssimazione, attraverso la legge adiabatica, confrontando i valori di temperatura e pressione all'istante attuale con quelli all'istante precedente:

Legge adiabatica:  $T_b * P_b^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{costante}$

$$T_{b_i} * P_{b_i}^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_{b_{i-1}} * P_{b_{i-1}}^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad \text{con } P_b = K_b * T_b$$

$$\Delta T_{compr_i} = K_i^{\gamma-1} * \frac{T_{b_{i-1}}^{\gamma}}{P_{b_{i-1}}^{\gamma-1}} - T_{b_{i-1}}$$



- **Flusso termico per unità di tempo  $Q$  [W]:** rappresenta la quantità di calore scambiata in un unità di tempo (1 s). Dipende dalla differenza di temperatura presente tra l'interno e l'esterno del tank, dalla superficie di scambio termico del tank e dalla trasmittanza termica che, come visto in precedenza, non è altro che il reciproco della resistenza termica totale:

$$Q_i = G * S_{tank} * (T_i - T_{amb}) \quad \text{con } G = \text{trasmittanza termica} = \frac{1}{R_{T_{tot}}}$$

$$Q_i = \frac{S_{tank}}{R_{T_{tot}}} * \left( (T_{b_{i-1}} + \Delta T_{misc_i} + \Delta T_{compr_i}) - T_{amb} \right)$$

- **Differenza di temperatura dovuta al flusso termico  $\Delta T_{flux}$  [K]:** è il terzo contributo, insieme alla miscelazione ed alla compressione, che porta ad una variazione di temperatura dell'idrogeno all'interno del tank. Viene ricavato attraverso la formulazione che correla il calore scambiato con la capacità termica di un corpo ( $C = c_p * m$ ), con  $c_p$  calore specifico a pressione costante ed  $m$  massa media di idrogeno presente nel tank nel  $\Delta t$ . E' esprimibile come:

$$Q_i * \Delta t = c_p * m * \Delta T \quad \text{con } m = \frac{M_{b_{new_i}} + M_{b_{new_{i-1}}}}{2}$$

$$\Delta T_{flux_i} = \frac{Q_i}{c_p} * \frac{t_i - t_{i-1}}{\frac{M_{b_{new_i}} + M_{b_{new_{i-1}}}}{2}}$$

- **Temperatura del tank  $T_b$  [K]:** rappresenta la temperatura del tank all'istante considerato, in funzione delle variazioni  $\Delta T$  definite in precedenza. Per il calcolo della temperatura effettiva del tank viene trascurato il contributo dato dall'effetto Joule-Thomson, che comporta un surriscaldamento dell'idrogeno stesso durante la fase di espansione tra lo storage ed il tank. Il  $\Delta T_{effetto\ Joule-Thomson}$  viene trascurato per il fatto che, sulla linea di test, sono presenti degli scambiatori di calore, posti appena prima del tank, che tendono, raffreddando l'idrogeno, ad azzerare la sua storia termica e quindi il

surriscaldamento dello stesso lungo il circuito. La temperatura assume quindi, istante per istante, la seguente formulazione:

$$T_{b_i} = T_{b_{i-1}} + \Delta T_{misc_i} + \Delta T_{compr_i} + \Delta T_{flux_i}$$

Costante legge gas	$\Delta T$ (miscelazione)	$\Delta T_c$ (compressione)	Flusso termico	$\Delta T$ (flusso termico)	Temperatura $T_b$
K [Pa/K]	$\Delta T_{misc}$ [K]	$\Delta T_{compr}$ [K]	Q [w]	$\Delta T_{flux}$ [K]	$T_b$ [K]
6940,829429	0	0	0	0	288,15
6968,745116	-0,220321273	0,468804477	-26,44192146	-0,00014671	288,3983365
6997,00816	-0,219713715	0,473139202	-53,39415575	-0,000295069	288,6514669

**Tabella 16 - Tabella di simulazione: colonne dalla 16 alla 21**

- **Pressione nel tank  $P_b$  [Pa] e [bar]**: viene calcolata utilizzando sempre la legge di stato dei gas reali in funzione delle grandezze determinate nel medesimo intervallo:

$$P_{b_i} = \rho_{b_i} * R_{H_2} * Z_{P_i} * T_{b_i} = K_i * T_{b_i}$$

- **Variazione di pressione nel tank  $\Delta P_b$  [bar]**: calcolata in funzione della pressione attuale del tank e la stessa prima dell'inizio del rifornimento (nel nostro caso pari a 20 bar):

$$\Delta P_{b_i} = P_{b_i} - P_{iniziale_{tank}}$$

- **Pressione stabilita dalla rampa  $P_{brampa}$  [Pa] e [bar]**: è definita, istante per istante, in funzione del valore dell' $APRR_{target}$  [bar/s] stabilito per il rifornimento analizzato (secondo il metodo delle tabelle):

$$P_{brampa_i} = APRR_{target} * t_i$$

- **Differenza di pressione tra il tank e quella definita dalla rampa  $\Delta P_{obiettivo}$  [bar]**: rappresenta il parametro più importante dell'intero processo di calcolo perché consente al tank di seguire la pressione stabilita dalla rampa. Il processo di inseguimento della rampa è ottenuto ponendo pari a zero la differenza tra la pressione del tank e quella della rampa ( $P_{b_i} - P_{brampa_i}$ ), attraverso l'utilizzo dello strumento di ricerca obiettivo di Excel.

Questa funzione permette, ponendo uguale a zero la casella della differenza delle pressioni, di calcolare la portata massica che transita nel circuito e necessaria ad annullare istantaneamente quel differenziale di pressione.

$$\Delta P_{obiettivo} = P_{b_i} - P_{brampa_i} \approx 0$$

Questa analisi di ottimizzazione, fatta per ogni  $\Delta t$  di simulazione (all'inizio manualmente e poi in modo automatico attraverso VBA), permette di simulare il comportamento del riduttore di pressione.

Pressione bombola cliente		Variazione Pb	Pressione bombola (rampa)	Pressione rampa	Differenza pressioni bombola
Pb [Pa]	Pb [bar]	$\Delta Pb$ [bar]	Pb_rampa [Pa]	Pb_rampa [bar]	Pb - Pb_rampa [bar]
2000000	20	0	2000000	20	0,0000
2009774,499	20,09774499	0,09774499	2009848,333	20,09848333	-0,0007
2019696,669	20,19696669	0,196966694	2019696,667	20,19696667	0,0000

**Tabella 17 - Tabella di simulazione: colonne dalla 22 alla 27**

### 3.4 Simulazione del processo di rifornimento

Ho fin qui descritto tutti i parametri che permettono di simulare il processo di riempimento e di verificare se, al termine della ricarica dei tank, temperature, pressioni e quantità di idrogeno immessa nel tank sono all'interno dei confini operativi enunciati nel primo capitolo.

Prima di analizzare le simulazioni effettuate ed i risultati ottenuti, vorrei delineare il caso di rifornimento che è stato testato in funzione dei parametri di input stabiliti dal cliente e della norma SAE J2601.

Il rifornimento, inizialmente testato, è del tipo H70-T40 (quindi con una temperatura di refrigerazione di  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ed una pressione finale del tank di  $70\text{ MPa} = 700\text{ bar}$  a  $T_{amb} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) con pressioni, ad inizio ricarica, per *low pressure storage*, *medium pressure storage* ed *high pressure storage* rispettivamente di 480, 800 e 1000 bar.

Per quanto riguarda la configurazione del piping del circuito mi sono attenuto a quanto definito, nel precedente capitolo, in merito ai diametri e alle lunghezze delle tubazioni.

Per le valvole, i misuratori e gli scambiatori di calore ho utilizzato i coefficienti  $K_v$ , ricavati tramite l'apposita formulazione nel paragrafo delle perdite di carico concentrate, con, in aggiunta, il relativo numero di componenti che fanno parte della linea di alimentazione e di quella di test. La temperatura ambiente  $T_{amb} = 15\text{ }^\circ\text{C}$  rappresenta quella standard definita dalla norma nell'apposita sezione.

Dimensioni tubazioni (lunghezze e diametri)				Valvole e misuratori (numero e $K_v$ )			Temperature			
Tubazione T1	Lunghezza	0,5	m	2-vie proporzionali (V)	$K_v$	1,1245	$\text{m}^3/\text{h}$	Temperatura refrigerazione dello scambiatore	-40	$^\circ\text{C}$
	Diametro	0,00793	m		Quantità	6			233,15	K
Tubazione T2	Lunghezza	10	m	Flussimetri (F)	$K_v$	0,2243432	$\text{m}^3/\text{h}$	Temperatura idrogeno nell'interim storage	15	$^\circ\text{C}$
	Diametro	0,00793	m		Quantità	1			288,15	K
Tubazione T3	Lunghezza	0,5	m	Riduttore di pressione (R)	$K_v$	0,2595	$\text{m}^3/\text{h}$	Temperatura ambiente	15	$^\circ\text{C}$
	Diametro	0,00793	m		Quantità	1			288,15	K
Tubazione T4	Lunghezza	0,5	m	Scambiatore di calore (S)	$K_v$	1,1751488	$\text{m}^3/\text{h}$			
	Diametro	0,00793	m		Quantità	1				
Tubazione T5	Lunghezza	0,5	m							
	Diametro	0,00793	m							
Tubazione T6	Lunghezza	0,5	m							
	Diametro	0,00793	m							
Tubazione T7	Lunghezza	0,5	m							
	Diametro	0,00793	m							
Tubazione T8	Lunghezza	0,5	m							
	Diametro	0,00793	m							

**Tabella 18 – Configurazione del piping, parametri delle valvole e temperature di test per il rifornimento simulato**

Altri parametri riguardano: le caratteristiche dell'idrogeno (ottenute dagli opportuni *datasheets*), il volume e le superfici del tank per il calcolo del flusso termico, le pressioni e le dimensioni degli storage ed i parametri di simulazione (rampa di pressione e  $\Delta t$  di calcolo).

Caratteristiche idrogeno			Caratteristiche tank e flusso termico			Caratteristiche degli storage			Rampa di pressione (APRR) e $\Delta t$ di simulazione			
Densità nominale ( $\rho_n$ )	0,08988	$\text{Kg}/\text{Nm}^3$	Volume totale	0,75	$\text{m}^3$	Low pressure storage	$P_{max}$	480	bar	APRR low pressure storage	59,09	$\text{bar}/\text{min}$
Costante gas (R)	4124	$\text{J}/(\text{Kg}^\circ\text{K})$	Pressione iniziale	20	bar		$\Delta P$	100	bar		0,984833333	$\text{bar}/\text{s}$
Coeff. Compr. Z (1000bar)	1,85		Temperatura iniziale	15	$^\circ\text{C}$		$P_{min}$	380	bar	APRR medium pressure storage	59,09	$\text{bar}/\text{min}$
Coeff. Compr. Z (0bar)	1			288,15	K		Volume	2,8	$\text{m}^3$		0,984833333	$\text{bar}/\text{s}$
$C_p$ (calore specifico P cost.)	14435	$\text{J}/(\text{Kg}^\circ\text{K})$	Tank piccolo (X2)	Diametro esterno	0,265	m	Massa H2	95,5	Kg	APRR high pressure storage	59,09	$\text{bar}/\text{min}$
$\gamma$ (coeff. adiabatica)	1,405			Lunghezza	1,75	m	$P_{max}$	800	bar		0,984833333	$\text{bar}/\text{s}$
				Spessore liner	0,005	m	$\Delta P$	200	bar	$\Delta t_{simulazione}$	0,1	s
			Spessore mantello	0,037	m	Medium pressure storage	$P_{min}$	600	bar			
			Diametro esterno	0,703	m		Volume	2,8	$\text{m}^3$			
			Lunghezza	2,505	m		Massa H2	123,3	Kg			
			Spessore liner	0,005	m	High pressure storage	$P_{max}$	1000	bar			
			Spessore mantello	0,037	m		$\Delta P$	125	bar			
			Conduzione $i_{liner}$	0,5	$\text{W}/(\text{m}^\circ\text{K})$		$P_{min}$	875	bar			
			$i_{mantello}$	0,74	$\text{W}/(\text{m}^\circ\text{K})$		Volume	2,8	$\text{m}^3$			
			Convezione $h_{aria}$	35	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Massa H2	144,7	Kg				
			$h_{idrogeno}$	10000	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$							

**Tabella 19 – Caratteristiche dell'idrogeno, del tank, degli storage e parametri di simulazione per il rifornimento testato**

N.B. Variazioni sulla linea di test e sulla tipologia di rifornimento saranno apportate esclusivamente dopo aver implementato, nei fogli Excel, il codice scritto in Visual Basic, con l'obiettivo di valutare, in modo più veloce, eventuali analogie e differenze sui parametri di riempimento.

Tornando alle simulazioni, ho quindi inizialmente effettuato due tipologie di analisi, equivalenti dal punto di vista del circuito e delle condizioni al contorno, ma differenti nella modalità. La prima è stata condotta senza che la stazione di rifornimento ed il tank seguano una rampa di pressione, mentre la seconda segue la  $APRR_{target}$  ricavata tramite il metodo delle tabelle.

In questo modo sarà possibile constatare, con opportuni grafici, il fatto che la rampa di pressione, da impostare alla carica dei tank, sia un parametro fondamentale e necessario in quanto permette di condurre un rifornimento "controllato" ed in sicurezza, ottenendo pressioni e temperature che non salgano oltre i valori limite consentiti.

### 3.4.1 Ricarica senza rampa di pressione

Iniziamo dalla prima simulazione riguardante un rifornimento senza rampa di pressione, che procederà, quindi, esclusivamente in funzione del salto di pressione disponibile tra i serbatoi di stoccaggio ed il tank del cliente.

La tabella di calcolo, descritta nei precedenti paragrafi, contiene al suo interno tutte le formule necessarie a ricavare i parametri di riempimento.

Naturalmente, trattandosi di un rifornimento che non segue una rampa di pressione, l'ultima colonna della tabella di simulazione, quella che calcola la differenza tra la pressione del tank e quella della rampa, non sarà presente e non sarà quindi possibile impostare la "ricerca obiettivo" di Excel in funzione di questo parametro.

Per eseguire la simulazione ed il calcolo iterativo è stato necessario impostare l'analisi in modo differente, basandosi, questa volta, sulla minimizzazione, istante per istante, della differenza di pressione  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}} - \Delta P_{linea}$ , il tutto per far sì che

venga fatta fluire la massima portata di idrogeno lungo il circuito. Il parametro in questione, il  $(\Delta P_{disponibile_{monte-valle}} - \Delta P_{linea})$ , è calcolato, in funzione delle pressioni e delle perdite di carico, nel relativo foglio di calcolo.

Caratteristiche nominali fluido ed impianto		Calcolo il Keq considerando i Kv delle valvole e dei misuratori ricavati tramite il foglio n°2		Ipotizzo una nuova portata volumetrica Q1 a valle tale per cui Q1 > Q0		Con la nuova portata volumetrica ipotizzata a valle (Q1) risalgo lungo la linea calcolando le perdite di carico del circuito idraulico			
Densità		Kv (2-vie)	1,1245 m <sup>3</sup> /h	Q1	591,4731 Nm <sup>3</sup> /h		P valle [bar]	ΔP [bar]	P monte [bar]
pn	0,08988 kg/m <sup>3</sup>	N valvole 2-vie	6	Q1	14,76711 gl/s	Tubazione (T8)	970,5611	0,0379	970,5391
Temperatura		Kv (flussimetro)	0,2243 m <sup>3</sup> /h			Valvola 2-vie (V6)	970,5391	0,0226	970,6217
Tmin	233,15 K	N flussimetri	1			Tubazione (T7)	970,6217	0,0379	970,6596
Tmax	288,15 K	Kv (riduttore di p)	0,2595 m <sup>3</sup> /h			Scambiatore di calore (S)	970,6596	0,0231	970,6827
Tmedia	260,65 K	N riduttori	1			Tubazione (T6)	970,6827	0,0477	970,7304
Pressione		Kv (scambiatore)	1,1751 m <sup>3</sup> /h			Valvola 2-vie (V5)	970,7304	0,0279	970,7583
Pf	973,1425 bar	N scambiatori	1			Riduttore di pressione (R)	970,7583	0,5246	971,2630
Pb	970,5611 bar	Keq	0,069 m <sup>3</sup> /h			Tubazione (T5)	971,2630	0,0477	971,3306
ΔP0	2,581378 bar					Flussimetro (F)	971,3306	0,7015	972,0321
						Valvola 2-vie (V4)	972,0321	0,0279	972,0600
						Tubazione (T4)	972,0600	0,0477	972,1077
						Valvola 2-vie (V3)	972,1077	0,0279	972,1356
						Tubazione (T3)	972,1356	0,0477	972,1833
						Valvola 2-vie (V2)	972,1833	0,0279	972,2112
						Tubazione (T2)	972,2112	0,9534	973,1646
						Valvola 2-vie (V1)	973,1646	0,0379	973,1924
						Tubazione (T1)	973,1924	0,0377	973,2401
						Totale		2,6790	973,2401
						ΔP0 > ΔP1?			FALSO
						ΔP0 - ΔP1		-0,0376	bar

Tabella 20 – Processo di minimizzazione del salto di pressione monte-valle tra storage e tank del cliente

La procedura che ho seguito e che mi ha permesso di effettuare il corretto calcolo dei parametri di simulazione si compone di più fasi che ho ripetuto, manualmente all'interno di Excel, per ogni Δt di simulazione:

- 1) Partendo dal primo istante di tempo  $t_0$  ( $t = 0$  s), ho trascritto, dalla tabella di simulazione a quella di calcolo delle perdite di carico, i valori di pressione a monte (quella del *low pressure storage*, inizialmente a 480 bar) ed a valle (quella del tank, inizialmente a 20 bar), consentendo poi, per semplice differenza, il calcolo del  $(\Delta P_{disponibile_{monte-valle}})_{t_0}$ .
- 2) Parallelamente, in funzione di una generica portata Q, l'ultima delle quattro tabelle presenti nella Tabella 20 calcola il  $(\Delta P_{linea})_{t_0}$ . Questo calcolo è effettuato, in modo automatico, su ogni tratto di tubazione o valvola in modo da ricavare le perdite di carico totali del circuito.

- 3) Una volta definite le perdite di carico della linea  $(\Delta P_{linea})_{t_0}$  ed il differenziale di pressione disponibile  $(\Delta P_{disponibile_{monte-valle}})_{t_0}$ , l'ultima parte della *Tabella 20* calcola la differenza tra questi due contributi  $(\Delta P_{disponibile_{monte-valle}} - \Delta P_{linea})_{t_0}$ .
- 4) A questo punto si applica la “ricerca obiettivo” proprio su questa casella, impostando, uguale a zero, il valore di  $(\Delta P_{disponibile_{monte-valle}} - \Delta P_{linea})_{t_0}$  ed ammettendo una variazione della portata per ottenerlo.
- 5) Al termine del processo iterativo, Excel calcola la portata necessaria a far in modo che  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}} - \Delta P_{linea} \approx 0$ .
- 6) Il passo successivo è quello di trascrivere, nella seconda colonna della tabella di simulazione, la portata massica calcolata, ovvero la  $Q_{obiettivo_{t_0}}$ , che verrà utilizzata dalla tabella di simulazione per il seguente calcolo dei parametri.
- 7) Tra i parametri calcolati all'istante di tempo successivo  $t_1$  ci saranno nuove pressioni raggiunte sia dallo storage che dal tank, per via del flussaggio di una certa quantità di idrogeno dall'uno all'altro. Queste pressioni devono essere nuovamente trascritte nella tabella delle perdite di carico per ricavare una nuova  $Q_{obiettivo_{t_1}}$  da riportare nella tabella di simulazione.
- 8) Questa procedura, inclusa la ricerca obiettivo, prosegue fino a quando  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}} - \Delta P_{linea} > 0$ . Si arriverà ad un punto in cui il  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}}$  non sarà più sufficiente ad assicurare il flussaggio di idrogeno poiché le perdite di carico della linea saranno maggiori del salto di pressione disponibile ( $\Delta P_{linea} > \Delta P_{disponibile_{monte-valle}}$ ) e sarà in questo momento che la simulazione passerà allo storage successivo (che si trova ad una pressione molto più alta di quella che ha il tank in quell'istante).
- 9) Il foglio di calcolo che rappresenta lo storage successivo, quello ad 800 bar, prenderà in automatico i parametri dell'ultimo  $\Delta t$  di simulazione dello storage precedente e si proseguirà con la stessa procedura fino al termine del  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}}$ .

10) Terminato il processo di calcolo sia per lo storage ad 800 bar che per quello a 1000 bar, si ottengono i dati definitivi di temperatura e pressione del tank, dall'inizio della simulazione fino al termine del processo di rifornimento.

N.B. Questa procedura risulta molto dispendiosa in termini di tempo in quanto ho dovuto personalmente, per ogni  $\Delta t$  di simulazione, trascrivere i valori da una tabella all'altra per ottenere, tramite la ricerca obiettivo, la  $Q_{obiettivo}$ .

Inoltre cambiando anche un singolo parametro, come può essere la lunghezza di un tratto di tubazione, occorre ripetere di nuovo, manualmente, tutta la procedura di calcolo per ogni *storage*.

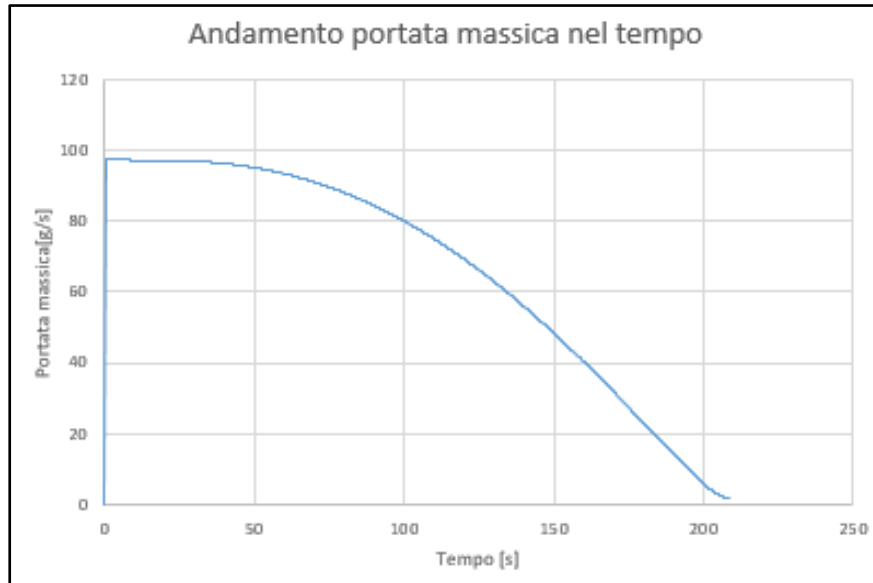
Per questo motivo, nell'ultimo paragrafo del capitolo, introdurremo un piccolo codice in Visual Basic, grazie al quale, impostata una configurazione per il circuito, vengono eseguite automaticamente, in tempi molto minori, le stesse operazioni che in precedenza erano effettuate manualmente.

Definita la procedura di simulazione del processo che viene eseguita per ciascuno *storage*, affrontiamo ora la parte di analisi dei risultati. Per ciascuno *storage*, infatti, al termine del processo di carica, sono stati messi a punto dei grafici che, prelevando i dati dalla tabella di simulazione, permettono di valutare l'andamento delle varie grandezze in funzione del tempo.

I principali parametri analizzati possono essere così elencati e raffigurati, in funzione del tempo di ricarica (a carattere esplicativo ho preso come esempio la ricarica attraverso il *low pressure storage*, con una pressione iniziale di 480 bar):

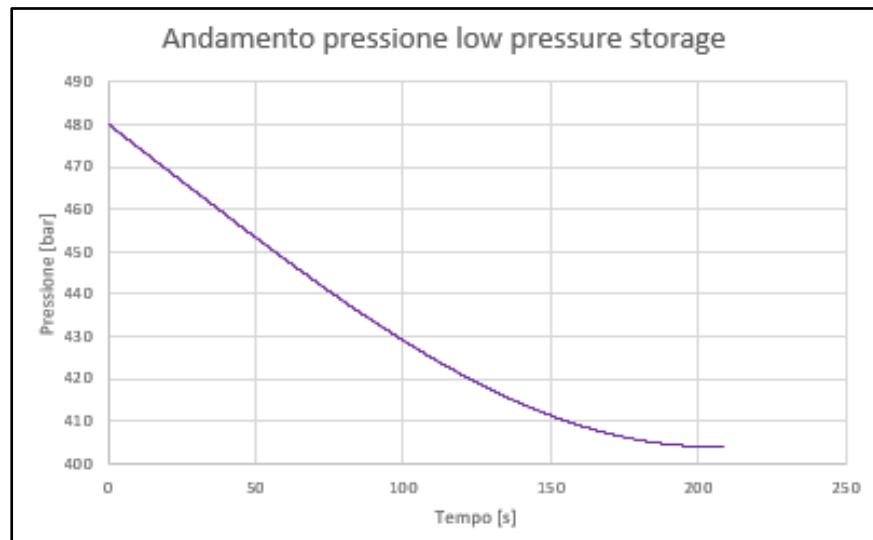
- **Portata massica nel tempo [g/s]:** ha un andamento decrescente determinato dal fatto che, ad inizio simulazione, il differenziale di pressione tra serbatoio di stoccaggio e tank è massimo e permette di far fluire la massima quantità di idrogeno, per poi diminuire man mano che il differenziale di pressione diminuisce. Partendo quindi dalla massima portata fornita al tank, pari a circa 100 g/s, lo *storage* ricarica quest'ultimo fino ad annullare il  $\Delta P_{disponibile}$  tra monte (*storage*) e valle (*tank*).





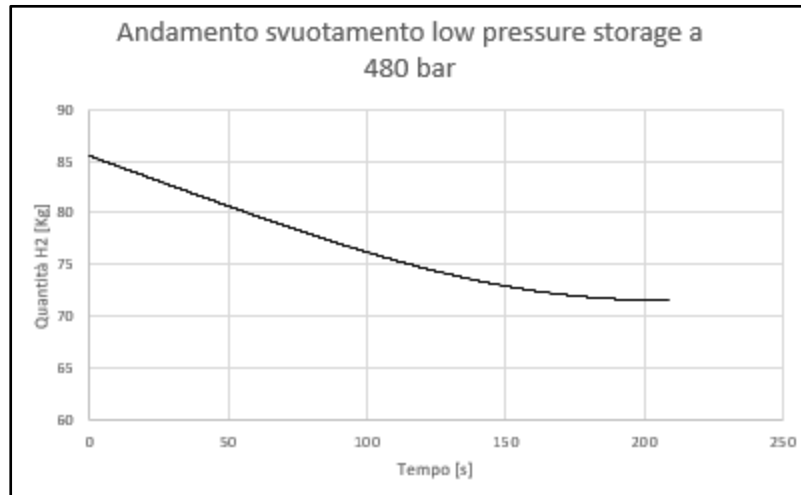
*Figura 40 – Rifornimento senza rampa di pressione: andamento della portata massica nel tempo (carica con storage a 480 bar)*

- **Pressione nel low pressure storage [bar]:** ha un andamento decrescente per via della depressurizzazione del serbatoio di stoccaggio, dovuta alla diminuzione della quantità di idrogeno presente al suo interno durante la carica del tank.



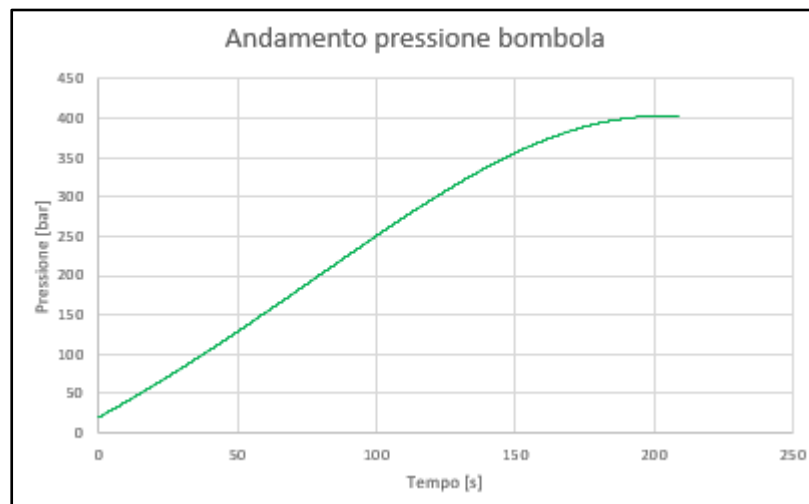
*Figura 41 - Rifornimento senza rampa di pressione: andamento della pressione nel low pressure storage (a 480 bar)*

- **Quantità di idrogeno presente nel low pressure storage [kg]:** ha anch'esso un andamento decrescente per via del fatto che parte dell'idrogeno passa dallo storage al tank del cliente.



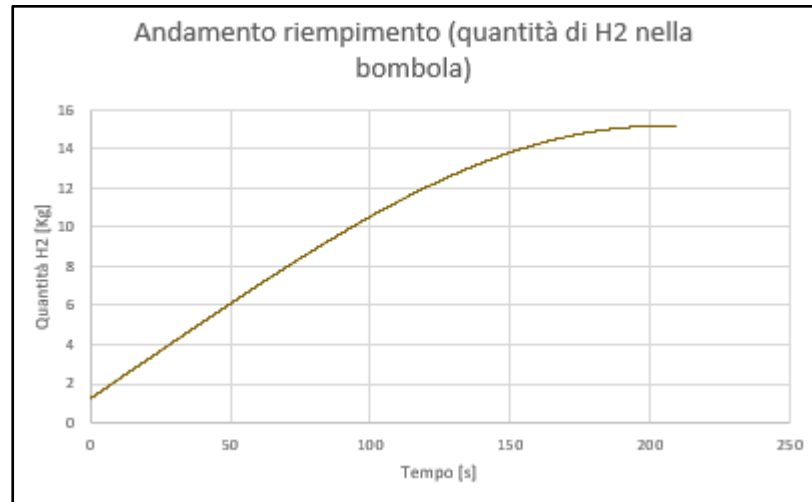
*Figura 42 - Rifornimento senza rampa di pressione: andamento della quantità di idrogeno presente nel low pressure storage (a 480 bar)*

- **Andamento della pressione nel tank [bar]:** aumentando la quantità di idrogeno presente nel tank, durante la ricarica, quest'ultimo si pressurizza (anche per via dell'aumento di temperatura).



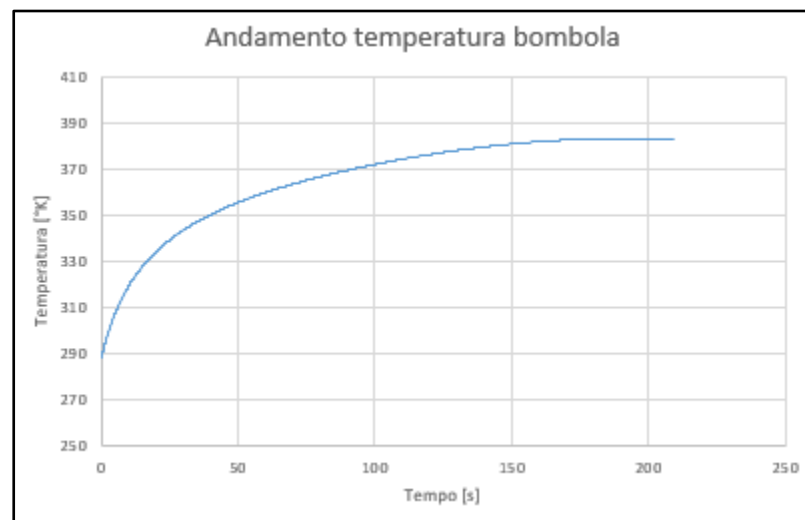
*Figura 43 - Rifornimento senza rampa di pressione: andamento della pressione nel tank (carica con storage a 480 bar)*

- **Quantità di idrogeno presente nel tank [kg]:** ha anch'esso un andamento crescente per via del fatto che parte dell'idrogeno passa dallo storage al tank del cliente.



*Figura 44 - Rifornimento senza rampa di pressione: andamento della quantità di idrogeno presente nel tank (carica con storage a 480 bar)*

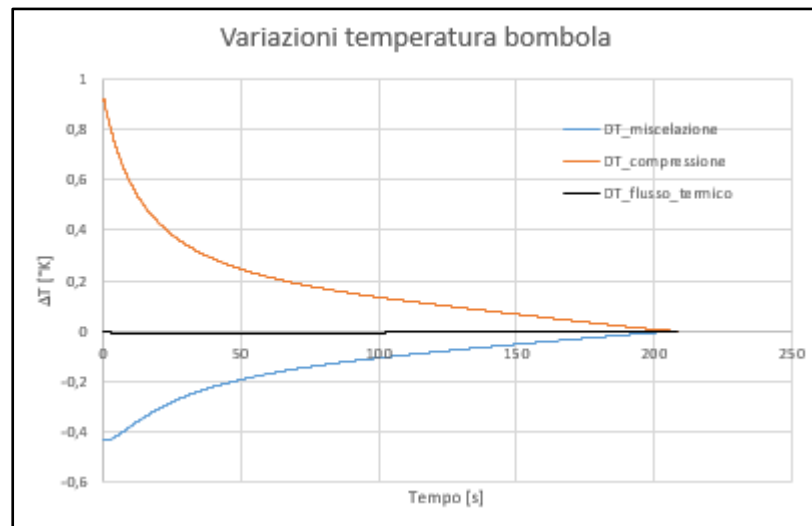
- **Andamento della temperatura nel tank [°K]:** durante il rifornimento, la temperatura rappresenta uno degli effetti da tenere maggiormente sotto controllo, per via del fatto che aumenta progressivamente durante la ricarica.



*Figura 45 - Rifornimento senza rampa di pressione: andamento della temperatura nel tank (carica con storage a 480 bar)*

- **Contributi alla variazione di temperatura nel tank [°K]:** la variazioni di temperatura, come descritto nei paragrafi precedenti, sono rappresentate dagli effetti di miscelazione, compressione e flusso termico verso l'ambiente esterno, che contribuiscono in generale all'aumento della temperatura nel tank. Questo aumento è dovuto al fatto che il contributo di compressione (in arancione), che provoca un surriscaldamento del tank, risulta sempre maggiore della somma di quello di miscelazione e di flusso termico (rispettivamente in azzurro e nero), che fanno sì che la temperatura interna diminuisca.

$$\Delta T_{compressione (+)} > \Delta T_{flusso termico (-)} + \Delta T_{miscelazione (-)} \rightarrow T_{tank} \uparrow$$



**Figura 46 - Rifornimento senza rampa di pressione: andamento delle variazioni di temperatura nel tank (carica con storage a 480 bar)**

I grafici, appena mostrati, raffigurano gli andamenti delle grandezze di interesse, ottenute, per il *low pressure storage*, tramite la tabella di simulazione. Lo stesso discorso, in modo del tutto equivalente, può essere esteso anche agli altri serbatoi di stoccaggio.

Per non dilungarmi troppo nell'analisi dei contributi apportati al riempimento dai singoli *storage*, vorrei focalizzare l'attenzione direttamente su cosa accade al tank nell'arco della simulazione (dal *low pressure storage* all'*high pressure storage*), al fine di ricavare i parametri di processo più importanti. Questi parametri sono quelli

che, secondo la norma SAE J2601, devono essere necessariamente tenuti sotto controllo durante il rifornimento.

Nei grafici che seguono vedremo cosa accade nell'intero processo di riempimento distinguendo, tramite apposita colorazione, le differenti zone di lavoro che riguardano rispettivamente il *low pressure storage*, il *medium pressure storage* e l'*high pressure storage*:

➤ **Andamento della portata massica nel tempo [g/s]:**



**Figura 47 – Simulazione rifornimento completo senza rampa di pressione: andamento della portata massica**

A prima vista, si può subito notare come l'andamento della portata massica di idrogeno che transita nella linea di test non abbia un andamento lineare, ma tenda a decrescere molto rapidamente, per ogni storage, da un valore massimo fino ad un minimo, quasi nullo.

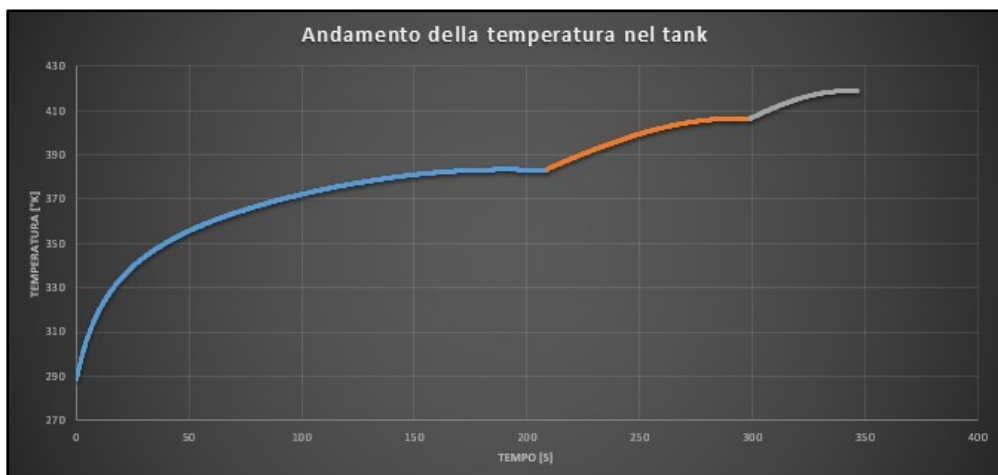
Un importante aspetto, che salta subito all'occhio, è il fatto che, nel passaggio da un serbatoio di stoccaggio a quello successivo, c'è un forte impulso di portata, per via del fatto che si passa da un  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}} \approx 0$  ad uno molto maggiore, a seguito dell'entrata in funzione del successivo storage a pressione più elevata.

La spiegazione di questo fenomeno è molto semplice: trattandosi di un rifornimento senza rampa di pressione (e quindi senza un vero e proprio controllo di quest'ultima), appena il circuito ha a disposizione un certo  $\Delta P$

spendibile, fa fluire la massima quantità di idrogeno possibile per smaltire il differenziale di pressione presente tra storage e tank (questo criterio viene impostato tramite la ricerca obiettivo di Excel).

Come si può notare dal grafico, i valori di portata massica che si ricavano da questa prima simulazione non risultano idonei ad un rifornimento normato dalla SAE in quanto le portate raggiungono valori troppo elevati (intorno ai 150 g/s) per garantire una ricarica in sicurezza ( $Q_{limite} = 60 \text{ g/s}$ ).

➤ **Andamento della temperatura del tank nel tempo [°K]:**



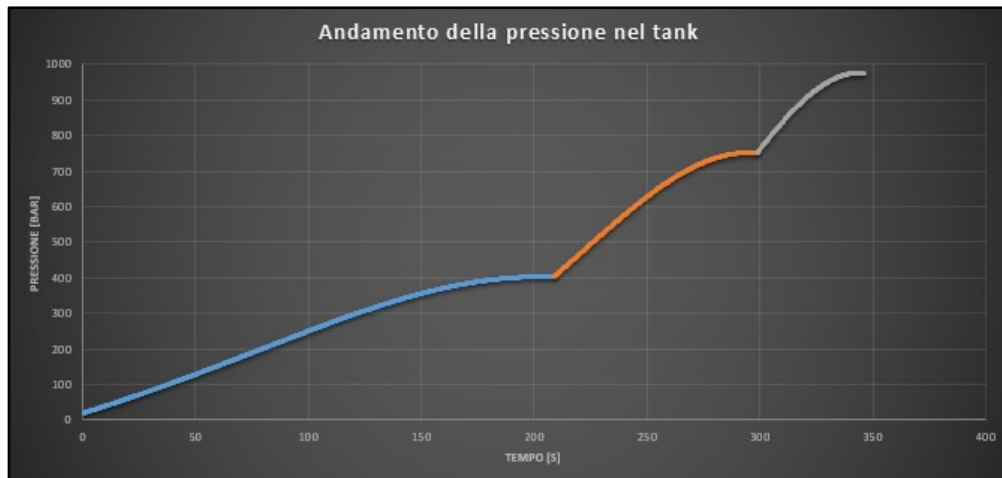
**Figura 48 - Simulazione rifornimento completo senza rampa di pressione:  
andamento della temperatura del tank**

L'andamento della temperatura segue a grandi linee quanto stabilito dalla norma SAE J2601.

L'aumento della temperatura del tank, che contraddistingue l'intero processo di riempimento, è caratterizzato da una prima parte di repentino aumento che tende poi, man mano che il rifornimento progredisce, a stabilizzarsi.

Nella simulazione in questione si può notare come, nel passaggio da uno storage all'altro, per via del forte impulso di portata, l'aumento di temperatura risulta, per qualche istante più pronunciato, per poi proseguire con la sua lenta crescita.

➤ **Andamento della pressione nel tank nel tempo [bar]:**



**Figura 49 - Simulazione rifornimento completo senza rampa di pressione: andamento della pressione nel tank**

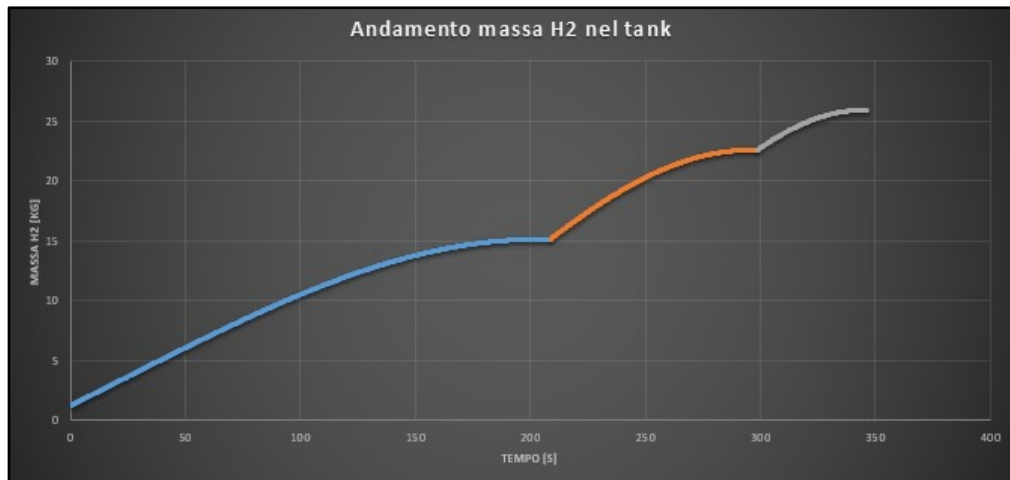
Per quanto riguarda la pressione si ha, a grandi linee, un andamento piuttosto simile alla temperatura.

Il fatto di non seguire una rampa di pressione, che permetterebbe di ottenere un grafico lineare, fa sì che ci siano delle variazioni, localizzate principalmente tra la fine della ricarica di uno storage e l'inizio del successivo.

In particolare, si può notare come, al termine del processo di carica di ciascuno storage, essendo minimo il  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}}$  e, di conseguenza, minima la portata di idrogeno che arriva al tank, quest'ultimo non è soggetto a grandi variazioni di pressione.

Accade esattamente l'opposto all'inizio della carica di ogni storage in quanto la presenza di un grande  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}}$  fa sì che circoli nel circuito una grande portata di idrogeno che, arrivando al tank, provoca un maggiore aumento della pressione.

➤ **Andamento della quantità di idrogeno immessa nel tank nel tempo [kg]:**



*Figura 50 - Simulazione rifornimento completo senza rampa di pressione: andamento della quantità di idrogeno immessa nel tank*

Il grafico della quantità di idrogeno immessa nel tank durante il rifornimento ha naturalmente un andamento crescente, per via del flussaggio continuo di idrogeno in quest'ultimo, e segue fedelmente l'andamento della portata massica.

Nei tratti con un flussaggio maggiore, quelli ad inizio ricarica di ciascuno storage, si avrà naturalmente una maggiore quantità di idrogeno che passa dallo storage al tank mentre, man mano che il valore del  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}}$  decresce, diminuendo la portata, si ridurrà la quantità di idrogeno che arriva alla bombola finale.

Per concludere la parte riguardante il processo di rifornimento senza rampa, vorrei proporre una tabella riassuntiva dei parametri finali al termine della ricarica, in modo da poterli poi confrontare con quelli ottenuti con un rifornimento con rampa di pressione, al fine di valutare le relative differenze.

La *Tabella 21* propone 4 grandezze fondamentali che occorre tenere in considerazione durante il processo di ricarica come: il tempo di riempimento, la quantità di idrogeno immessa nel tank, la temperatura finale del tank e la pressione finale del tank.



Risultati simulazione		
Tempo di rifornimento	346,4	s
Quantità di H2 nel tank	25,94342956	Kg
Temperatura finale tank	418,9028985	°K
Pressione finale tank	976,8059001	bar

**Tabella 21 - Simulazione rifornimento completo senza rampa di pressione: parametri finali di interesse**

La tabella precedente mostra i risultati ottenuti per i differenti parametri:

- Tempo di rifornimento: rappresenta il tempo che intercorre tra inizio ricarica ed il momento in cui la pressione del tank del cliente eguaglia quella dell'*high pressure storage* (una volta annullato il  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}}$  non c'è più flusso di idrogeno nella linea di test).  
In questo particolare caso si ottiene un  $t_{rifornimento} = 346,4 s = 5 \text{ min e } 46 s$  che, considerando i 750 L di volume del tank, sono ben al di sotto dei tempi stimati dalla norma. Il fatto che la ricarica si svolga in tempi così brevi, come vedremo successivamente, dipende dal fatto che non ci sia una rampa di pressione che calibra il riempimento.
- Quantità di idrogeno immessa nel tank: come si può notare dalla tabella, la massa di idrogeno all'interno del tank, al termine del processo, si attesta intorno ai 26 kg. Eseguendo un semplice calcolo, tramite la legge dei gas reali, si può arrivare alla conclusione che il tank, in questo caso, non risulta pieno al 100% ma ha un  $SOC \cong 95\%$ .
- Temperatura finale del tank: risulta molto più elevata rispetto a quella consentita dalla norma, pari ad 85 °C. Ci troviamo infatti con una  $T_{finale} =$

$418,9 K = 145,75 ^\circ C$ , molto al di sopra rispetto alla SAE, ma questo eccessivo surriscaldamento dipende sì dal fatto che il rifornimento è stato simulato senza la presenza della rampa di pressione ma soprattutto dal tipo di modello utilizzato.

In Excel, infatti, non è possibile considerare tutti gli effetti reali che riguardano il processo di carica (a differenza di quello che vedremo con le simulazioni Amesim), a partire dal fatto che, per la determinazione dei  $\Delta T$ , ho considerato gli effetti come se fossero separati tra loro.

Anche le varie semplificazioni ed approssimazioni, necessarie in Excel, fanno sì che arrivi a questi livelli di temperatura.

- Pressione finale nel tank: anche per la pressione vale lo stesso discorso fatto per la temperatura. Le considerazioni fatte in precedenza riguardano sia la temperatura che la pressione ed è per questo motivo che si arriva fino ai 976 bar finali, ben 100 bar al di sopra del limite consentito della norma.

### 3.4.2 Ricarica con rampa di pressione

Come già detto all'inizio di questo capitolo, la seconda simulazione che ho effettuato è stata equivalente alla precedente per quanto riguarda il circuito e le condizioni al contorno, ma differente dal punto di vista del processo per via dell'introduzione della rampa di pressione. Una volta calcolata la rampa tramite il metodo delle tabelle, ho impostato il foglio Excel secondo quanto stabilito nella parte di descrizione dei parametri, ponendo come ultimo di questi la differenza tra la pressione del tank e quella stabilita dalla rampa ( $\Delta P_{tank-rampa}$ ). In questo modo, sempre tramite la ricerca obiettivo, impostando i parametri corretti è possibile far seguire al tank la pressione dettata dalla rampa:

- 1) Partiamo dalla tabella di simulazione, all'istante di tempo  $t_0$  ( $t = 0 s$ ) non è possibile individuare una differenza di pressione tra il tank e la rampa poiché, non essendoci portata in transito, entrambi i contributi di pressione risultano pari a 20 bar.

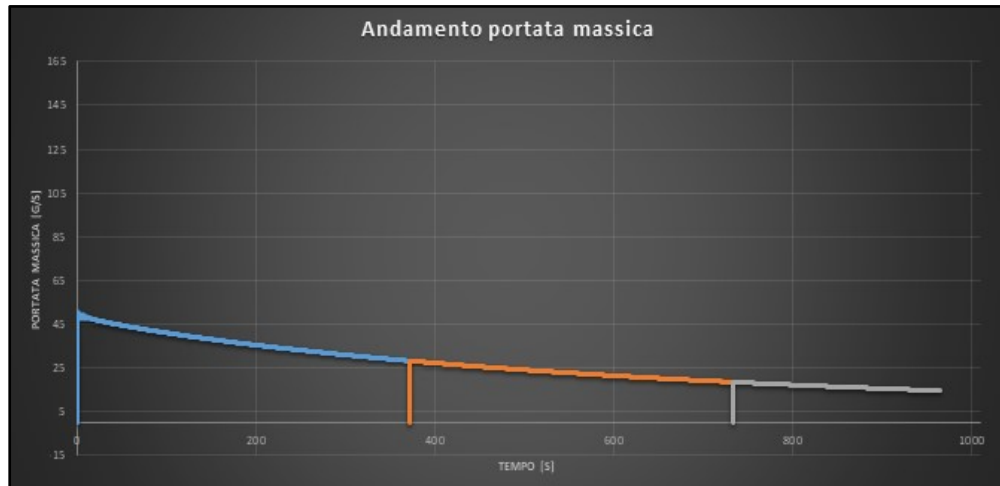
- 2) All'istante di tempo successivo  $t_1$  si ipotizza una portata iniziale di idrogeno. La tabella calcola in automatico tutti i parametri, tra cui la pressione del tank e la pressione della rampa ( $P_{rampa} = APRR_{target} * t$ ) al termine di quell'iterazione.
- 3) Tramite la ricerca obiettivo, si va a porre pari a zero la casella finale della tabella, corrispondente al  $\Delta P_{tank-rampa}$ , variando la portata in transito nel circuito (alla seconda casella della tabella). Si ottiene quindi la portata di idrogeno necessaria a far sì che il  $\Delta P_{tank-rampa} = 0$  e quindi che  $P_{tank} = P_{rampa}$ .
- 4) A questo punto viene trascritto il valore di portata trovato nella casella di  $Q_m$  all'istante  $t_1$ .
- 5) Si passa quindi alla verifica del  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}} - \Delta P_{linea}$  nella tabella delle perdite di carico. Vengono trascritti, dalla tabella di simulazione, i valori di pressione dello storage e del tank per ricavare il  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}}$  all'istante  $t_1$  e, copiando il valore di portata ricavato tramite la ricerca obiettivo, si ottiene, nell'apposita tabella, il valore di  $\Delta P_{linea}$ .
- 6) Si verifica se il  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}} - \Delta P_{linea} > 0$ .
- 7) In caso affermativo si ritorna alla tabella di simulazione e si ripete il procedimento al tempo  $t_2$ , ipotizzando una portata iniziale pari alla  $Q_m$  ottenuta all'istante precedente.
- 8) Nel caso in cui  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}} - \Delta P_{linea} < 0$ , vuol dire che lo storage ha terminato la sua "riserva" di pressione per far fluire l'idrogeno e si passa all'utilizzo dello storage a pressione più alta.

N.B. Anche in questo caso ho portato avanti il processo di simulazione manualmente, impostando, istante per istante, i comandi descritti in precedenza.

Il codice in Visual Basic permetterà anche in questo caso di realizzare il processo in modo automatico, risparmiando in modo considerevole del tempo nella simulazione.

Al termine del processo di simulazione ho costruito, come nella simulazione precedente, i grafici che rappresentano le grandezze di maggior interesse per l'operazione di ricarica:

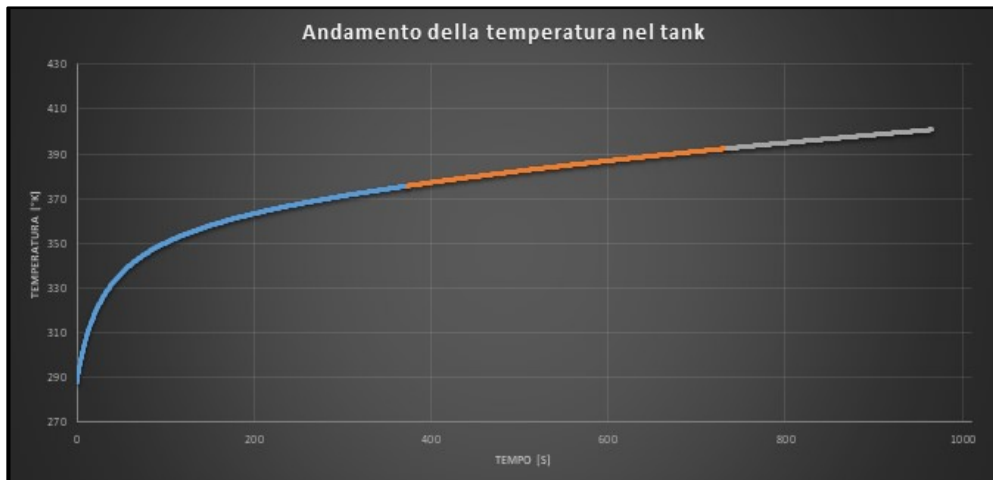
➤ **Andamento della portata massica nel tempo [g/s]:**



**Figura 51 – Simulazione rifornimento completo con rampa di pressione: andamento della portata massica**

A primo impatto si può subito notare la grande differenza che caratterizza l'erogazione di idrogeno tra un rifornimento con e senza rampa di pressione. Dovendo seguire la pressione stabilita dalla rampa, il tank e l'intera linea di test sono sottoposti ad un flusso di idrogeno controllato, in funzione del livello del  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}}$ , per evitare che forti gradienti di portata provochino grandi fluttuazioni di pressione. Il grafico della portata massica ha un andamento quasi lineare; il valore massimo si trova ad inizio rifornimento, quando il  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}}$  tra storage e tank risulta massimo, e prosegue poi in modo graduale fino al termine del rifornimento in cui si ha il valore minimo di  $Q_m$ . Anche il passaggio da uno storage all'altro non risulta problematico per il fatto che non presenta grandi variazioni e segue in linea di massima l'andamento definito dallo storage precedente. Per quanto riguarda i valori di portata massica raggiunti da questa seconda simulazione, a differenza della prima, si arriva ad una  $Q_{m_{max}}$  intorno ai 50 g/s che risulta essere adeguata per garantire una ricarica in sicurezza ( $Q_{limite} = 60$  g/s).

➤ **Andamento della temperatura del tank nel tempo [°K]:**

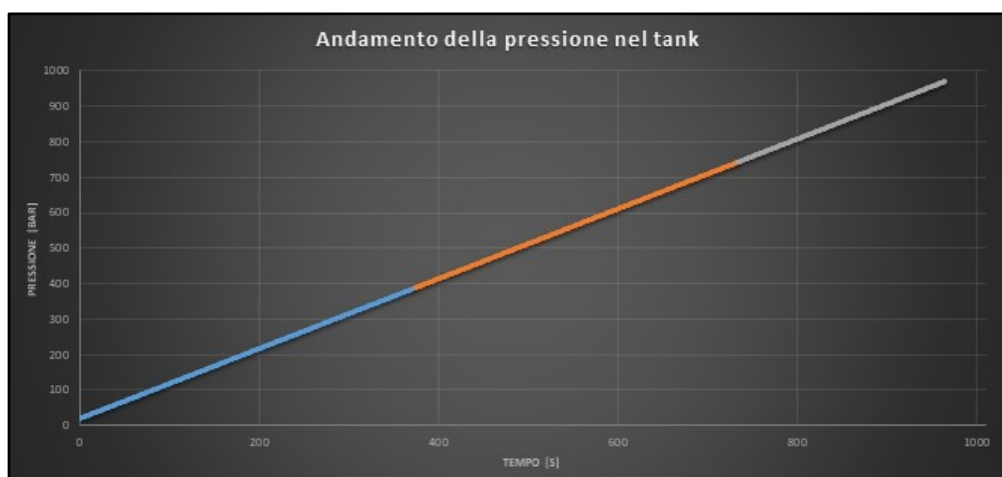


*Figura 52 - Simulazione rifornimento completo con rampa di pressione:  
andamento della temperatura del tank*

Il profilo di temperatura ottenuto risulta perfettamente in linea rispetto a ciò che appare nella SAE J2601.

Si assiste ad una veloce crescita di temperatura nei primi secondi di simulazione, in cui si ha il massimo aumento di pressione dovuto alla massima quantità di idrogeno immessa nel tank, per poi proseguire con una lenta crescita fino alla fine del processo di rifornimento.

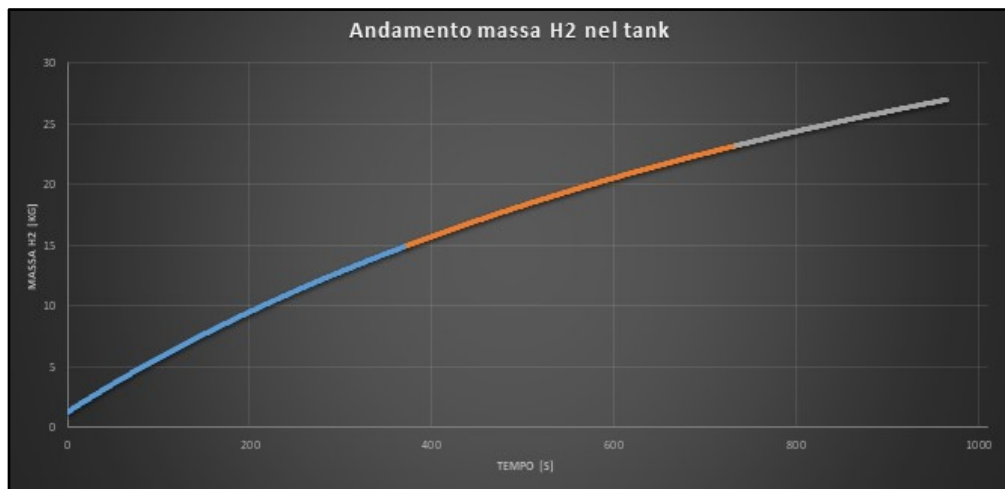
➤ **Andamento della pressione nel tank nel tempo [bar]:**



*Figura 53 - Simulazione rifornimento completo con rampa di pressione:  
andamento della pressione nel tank*

Il profilo di pressione, trattandosi di un rifornimento con rampa di pressione, assume un andamento perfettamente lineare, con una pendenza che dipende dalla  $APRR_{target}$  ricavata, per il caso in esame, tramite il metodo delle tabelle. Il valore di pressione del tank sarà espresso, istante per istante, dalla legge  $P_{tank} = APRR_{target} * t$ , con il valore finale che si ottiene quando la  $P_{tank} = P_{high\ pressure\ storage}$ .

➤ **Andamento della quantità di idrogeno immessa nel tank nel tempo [kg]:**



**Figura 54 - Simulazione rifornimento completo con rampa di pressione: andamento della quantità di idrogeno immessa nel tank**

La quantità di idrogeno immessa nel tank, trattandosi di un rifornimento controllato in pressione e, come abbiamo visto, con una sorta di controllo in portata, assume un andamento quasi lineare.

Gli storage che forniscono una maggiore quantità di idrogeno sono quello a bassa e media pressione per via del fatto che lavorano per un intervallo di tempo maggiore.

A differenza della simulazione precedente non sono presenti quelle discontinuità che riscontravano nel passaggio da uno storage all'altro (sempre per il fatto che la portata massica varia in maniera quasi lineare).

Anche per questa simulazione propongo una tabella riassuntiva dei parametri funzionalmente più importanti in modo da effettuare poi un confronto con i dati ottenuti in precedenza.

<b>Risultati simulazione</b>		
Tempo di rifornimento	965,6	s
Quantità di H2 nel tank	27,00878288	Kg
Temperatura finale tank	400,8368549	°K
Pressione finale tank	970,9550667	bar

**Tabella 22 - Simulazione rifornimento completo con rampa di pressione:  
parametri finali di interesse**

La tabella precedente mostra i risultati ottenuti per i differenti parametri:

- Tempo di rifornimento: come in precedenza rappresenta il tempo che intercorre tra inizio ricarica ed il momento in cui la pressione del tank del cliente eguaglia la pressione dell'*high pressure storage* (una volta annullato il  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}}$  non c'è più flusso di idrogeno nella linea di test). In questo caso si ottiene un  $t_{rifornimento} = 965,6 s = 16 \text{ min e } 5 s$ , che risulta essere di molto maggiore rispetto alla simulazione precedente.

Nel caso ideale in cui il rifornimento termini con una  $P_{tank} = 875 \text{ bar}$ , il tempo di rifornimento dovrebbe attestarsi intorno ai  $t_{rifornimento} = \frac{875-20}{APRR_{target}} = 868 s = 14 \text{ min e } 28 s$ , ma terminando ad una pressione maggiore di quella definita da norma, il rifornimento si prolunga fino al raggiungimento della condizione  $P_{tank} = P_{high \text{ pressure storage}}$ .

- Quantità di idrogeno immessa nel tank: come si può notare dalla tabella, la massa di idrogeno all'interno del tank, al termine del processo, risulta maggiore

rispetto al caso precedente attestandosi intorno ai 27 Kg con un SOC del 99,58% (a differenza dal caso precedente con  $m_{H_2_{tank}} = 25,9 \text{ kg}$ ).

- Temperatura finale del tank: anche in questa simulazione, risulta molto più elevata rispetto a quella consentita dalla norma, pari ad 85 °C. Ci troviamo infatti con una  $T_{finale} = 400 \text{ K} = 127,68 \text{ °C}$ , ancora molto al di sopra rispetto a quanto consentito dalla SAE (anche se in misura minore, prima era di circa 145 °C).
- Pressione finale nel tank: non subisce grandi variazioni rispetto al caso senza rampa, portandosi ad un valore pari a 970 bar (nel caso senza rampa era pari a 976 bar).

### 3.4.3 Differenze tra i due processi

Analizziamo ora in questo paragrafo le principali differenze che riguardano i processi di rifornimento con rampa di pressione e senza rampa di pressione per valutare quali siano le motivazioni e gli aspetti che fanno preferire il primo al secondo nell'implementazione del processo sulle stazioni di ricarica.

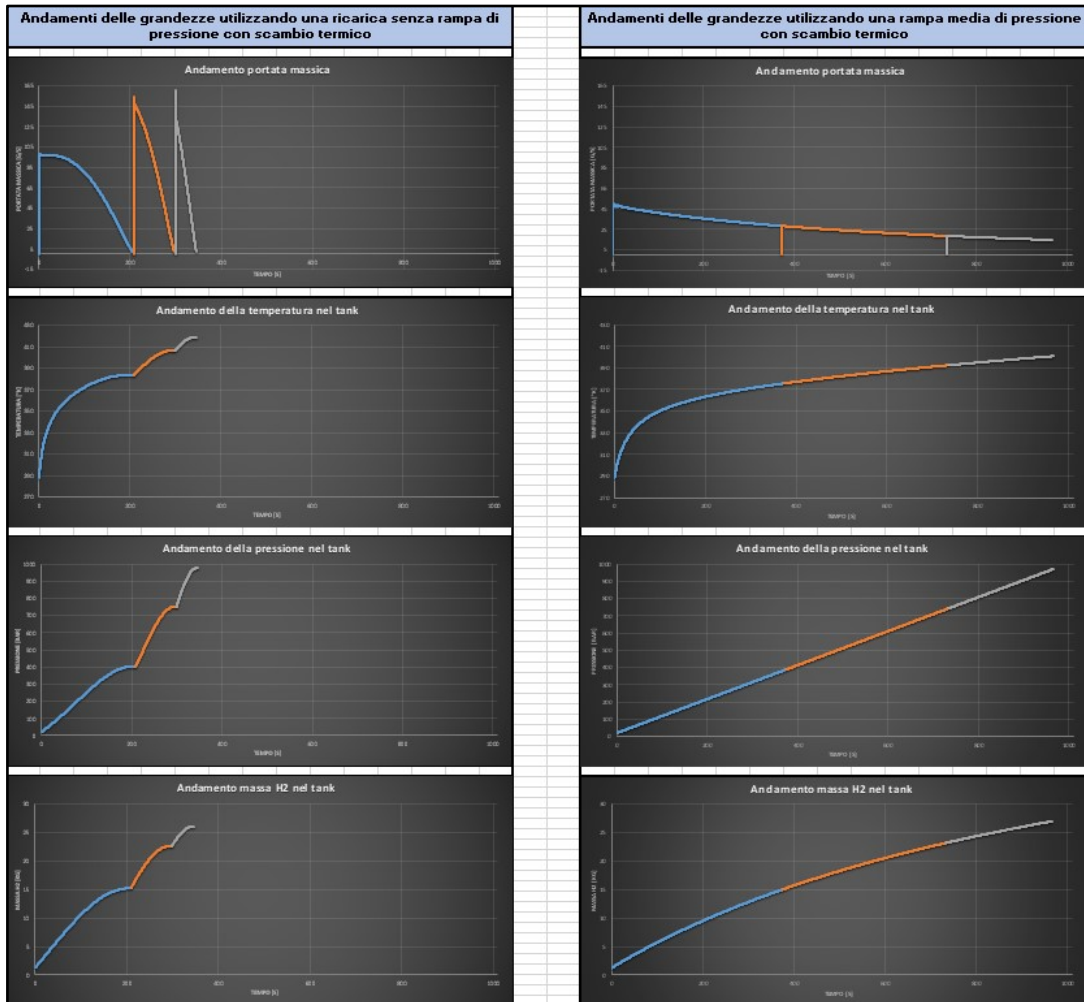
Per chiarezza di rappresentazione e per evidenziare maggiormente le differenze tra i due processi, i grafici che saranno mostrati in seguito sono riportati sulla stessa scala temporale (prendendo naturalmente come riferimento il rifornimento che impiega più tempo, ovvero quello con rampa di pressione).

A prescindere dei risultati ottenuti in termini numerici, che occorre comunque tenere bene in mente per valutare la bontà del processo di rifornimento, in questo paragrafo, vorrei concentrare maggiormente l'attenzione sull'andamento qualitativo dei grafici che fanno ben capire il perché la ricarica delle bombole ad idrogeno venga eseguita rispettando una rampa di pressione.

Nelle tabelle che seguono vengono mostrati i grafici dei parametri finali di entrambi i processi di riempimento (gli stessi già visti in precedenza). Per alcuni di questi sono



visibili notevoli differenze mentre per altri valori molto simili, dovuti principalmente al fatto che si tratta comunque di simulazioni realizzate tramite Excel, con le relative semplificazioni del caso.



*Figura 55 – Confronto grafici finali tra rifornimento con o senza rampa di pressione*

In termini di andamenti qualitativi sono riscontrabili notevoli differenze tra i processi di riempimento del tank.

Il primo aspetto da considerare è il differente tempo di rifornimento, con quello senza rampa di pressione che risulta circa tre volte più veloce dell'altro. Di per sé potrebbe essere un aspetto molto positivo, in quanto consentirebbe di effettuare un rifornimento

molto più rapido, ma, come vedremo a breve, questa tipologia di rifornimento conduce a parametri finali che non rientrano nei limiti definiti da norma.

La principale differenza è dovuta all'andamento della portata massica di idrogeno che circola nella linea di test. A prescindere dal fatto che la portata limite ammissibile risulta pari a 60 g/s, rispettata solo dal secondo caso analizzato (quello con rampa di pressione), il problema principale nel processo senza rampa riguarda le discontinuità sul trasferimento di idrogeno, per il fatto che provocano grandi sollecitazioni e vibrazioni nel circuito idraulico.

L'andamento della portata massica influenza quello di tutte le altre grandezze.

In particolare, si può notare come, nel caso di rifornimento con rampa di pressione, sia la temperatura che la quantità di idrogeno immessa nel tank non presentino discontinuità nel passaggio da uno storage all'altro cosa che accade invece nell'altra simulazione.

Altra differenza molto rilevante risiede nella pressione del tank. Con la rampa, la pressione ha naturalmente un andamento rettilineo, il che consente di controllare in modo più adeguato il processo di riempimento, per interromperlo eventualmente nel caso in cui la stazione si accorga che la pressione finale potrebbe raggiungere valori non idonei.

Più difficile sarebbe il controllo della pressione nel caso senza rampa di pressione in quanto quest'ultima è fortemente dipendente dalla portata massica di idrogeno che circola nella linea di test che, a sua volta, dipende dal circuito e dalle pressioni iniziali dei serbatoi di stoccaggio.

In definitiva, nonostante il rifornimento con rampa risulti molto più dispendioso in termini di tempo, l'andamento dei grafici fa ben notare come si riesca ad ottenere un processo molto più controllato e, come vedremo a breve, consenta di arrivare al termine della ricarica con parametri molto più vicini a quelli stabiliti da norma.

Le principali differenze sono riscontrabili dalle *Tabelle 23/24* messe a confronto:

Risultati simulazione (senza rampa)			Risultati simulazione (con rampa)		
Tempo di rifornimento	346,4	s	Tempo di rifornimento	965,6	s
Quantità di H2 nel tank	25,94342956	Kg	Quantità di H2 nel tank	27,00878288	Kg
Temperatura finale tank	418,9028985	°K	Temperatura finale tank	400,8368549	°K
Pressione finale tank	976,8059001	bar	Pressione finale tank	970,9550667	bar

***Tabelle 23/24 - Confronto parametri finali tra rifornimento con o senza rampa di pressione***

Le tabelle mostrate sono le stesse viste in precedenza quando abbiamo analizzato separatamente i due casi. L'obiettivo è ora quello di confrontare tali parametri per capire quali siano gli effetti finali dei due differenti processi di riempimento.

Passiamo in esame ciascun parametro per valutare le rispettive differenze:

- Tempo di rifornimento: come già detto in fase di analisi dei grafici, il processo di riempimento senza rampa di pressione conduce a tempi di ricarica molto inferiori rispetto a quello con rampa di pressione. I tempi sono rispettivamente  $t_{rifornimento_{senza\ rampa}} = 346,4\ s = 5\ min\ e\ 46\ s$  e  $t_{rifornimento_{con\ rampa}} = 965,6\ s = 16\ min\ e\ 5\ s$ , quindi notevolmente maggiori nel secondo caso. Questo è dovuto al differente approccio che viene seguito nella simulazione: il caso con rampa effettua un controllo di pressione ed in base a quello fa variare le altre grandezze, il caso senza rampa massimizza il flusso di idrogeno in transito nella linea per “smaltire” tutto il  $\Delta P$  disponibile.

- Quantità di idrogeno immessa nel tank: non rappresenta uno dei parametri più critici da tenere in considerazione. E', però, uno dei più importanti ed anche in base a questo viene valutata la bontà del processo di rifornimento.

La norma infatti presuppone il raggiungimento del 100% del SOC al termine del processo di riempimento ed anche la differenza di circa 1 kg di idrogeno immesso nelle simulazione assume molto rilievo. Il processo senza rampa si

ferma ad una quantità pari a 25,94 kg (corrispondente al 95% del SOC) mentre quello con rampa arriva a 27 kg (99,5% del SOC). Il differente livello di riempimento è dovuto al migliore controllo che si ha della temperatura e della pressione.

- Temperatura finale del tank: la differenza tra i due casi risulta abbastanza evidente (400 K con rampa e confronto dei 418 K senza rampa). Entrambe le simulazioni non rientrano nei limiti prescritti dalla norma di  $85\text{ °C} = 358,15\text{ K}$  per il fatto che nell'approccio al problema sono state attuate piccole, ma necessarie, semplificazioni al modello.
- Pressione finale nel tank: la differenza di pressione risulta quasi trascurabile (976 bar senza rampa e 970 bar con rampa). L'aspetto positivo, per il rifornimento con rampa, oltre alla pressione leggermente inferiore, è rappresentato dal controllo del processo.

### **3.5 Estensione del modello in Visual Basic (VBA)**

Nei paragrafi precedenti abbiamo parlato delle difficoltà di implementazione della routine di minimizzazione della pressione tramite la ricerca obiettivo. L'inconveniente era infatti quello di effettuare ogni singolo passaggio, descritto in precedenza, manualmente, per ogni istante di tempo (potete ben capire quale sia stato il tempo necessario ad effettuare una simulazione, come quella con rampa di pressione, della durata di 965 s con un *time step* di 0,1 s, ovvero con 9650 iterazioni).

Per questo motivo, visto anche il fatto che la modifica di un solo parametro (come ad esempio la lunghezza di un tubo) sanciva il fatto di dover ricominciare tutto il processo da capo, ho approfondito l'utilizzo del linguaggio di programmazione Visual Basic presente in Excel, al fine di eseguire tutto il processo in modo automatico.

Ho quindi costruito un foglio iniziale, all'interno del file Excel per la simulazione, che raccogliesse tutti i parametri del circuito, in modo che, per valutare diverse configurazioni, fosse permesso all'utente di variare i parametri del circuito stesso.

Il foglio, anche se di difficile lettura per via delle dimensioni ridotte, appare come mostrato di seguito.

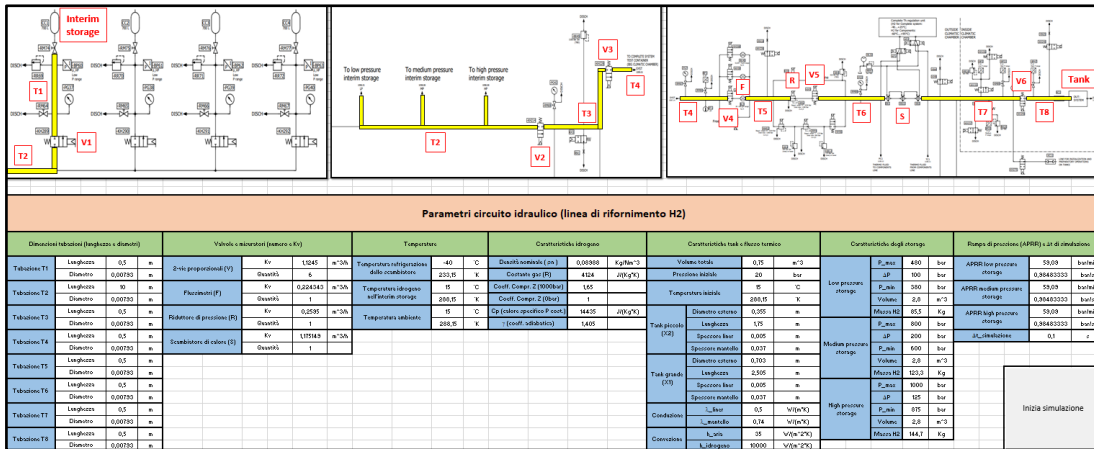


Tabella 25 – Foglio di impostazione dei parametri iniziali della simulazione

Nella parte superiore, il foglio include uno schema del circuito idraulico, come quelli mostrati nel secondo capitolo, in modo che l'utente abbia la possibilità di verificare quali parti del circuito ha intenzione di modificare.

Nella parte sottostante sono presenti le caselle per la modifica dei parametri del circuito che, partendo dalla sinistra, possono essere così riassunte:

- Parametri tubazioni (lunghezza e diametro);
- Parametri valvole, misuratori e scambiatori (valore del Kv e quantità nel circuito);
- Temperature di esercizio (di refrigerazione, ambiente, iniziale del tank);
- Caratteristiche dell'idrogeno (densità, costante dei gas R, coefficiente di comprimibilità Z, calore specifico  $c_p$ , coefficiente dell'adiabatica  $\gamma$ );
- Caratteristiche del tank e flusso termico (dimensioni e parametri di conduzione e convezione);
- Caratteristiche degli storage (pressioni e capacità);
- Rampa di pressione e  $\Delta t$  di simulazione.

Questi sono i parametri che l'utente, prima dell'inizio della simulazione, può deliberatamente cambiare per valutare eventuali differenze nel processo di riempimento del tank.

Tutte queste grandezze sono state collegate con i fogli Excel descritti in precedenza, come tabelle di simulazione e tabella di calcolo delle perdite di carico, in modo da riportare eventuali variazioni dei parametri su tutti i fogli necessari alla simulazione. Sempre nella stessa tabella di impostazione dei parametri, posizionato in basso a destra, è presente il tasto "inizia simulazione" che permette, data la configurazione scelta, di far partire la routine di Visual Basic che andremo adesso a descrivere.

```

Sub Minimizza_delta_pressione()
|
|
| ' Minimizza_delta_pressione Macro
|
Sheets("Carica con rampa (stor. 480bar)").Select
Range("F6:AF6").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
For x = 5 To 5000
    y = x + 1
    Range("=Carica con rampa (stor. 480bar)!AF" & x).GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("G" & x)
    Range("=Calcolo Kv,p,Q (simulazione)!K7").FormulaLocal = "=Carica con rampa (stor. 480bar)!G" & x
    Range("=Calcolo Kv,p,Q (simulazione)!C13").FormulaLocal = "=Carica con rampa (stor. 480bar)!R" & x
    Range("=Calcolo Kv,p,Q (simulazione)!C14").FormulaLocal = "=Carica con rampa (stor. 480bar)!AB" & x
    If Range("=Calcolo Kv,p,Q (simulazione)!P27").Value < 0 Then
        Sheets("Carica con rampa (stor. 800bar)").Select
        Range("F6:AF6").Select
        Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
        Selection.ClearContents
        For k = 5 To 5000
            Z = k + 1
            Range("=Carica con rampa (stor. 800bar)!AF" & k).GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("G" & k)
            Range("=Calcolo Kv,p,Q (simulazione)!K7").FormulaLocal = "=Carica con rampa (stor. 800bar)!G" & k
            Range("=Calcolo Kv,p,Q (simulazione)!C13").FormulaLocal = "=Carica con rampa (stor. 800bar)!R" & k
            Range("=Calcolo Kv,p,Q (simulazione)!C14").FormulaLocal = "=Carica con rampa (stor. 800bar)!AB" & k
            If Range("=Calcolo Kv,p,Q (simulazione)!P27").Value < 0 Then
                Sheets("Carica con rampa (stor.1000bar)").Select
                Range("F6:AF6").Select
                Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
                Selection.ClearContents
                For h = 5 To 5000
                    l = h + 1
                    Range("=Carica con rampa (stor.1000bar)!AF" & h).GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("G" & h)
                    Range("=Calcolo Kv,p,Q (simulazione)!K7").FormulaLocal = "=Carica con rampa (stor.1000bar)!G" & h
                    Range("=Calcolo Kv,p,Q (simulazione)!C13").FormulaLocal = "=Carica con rampa (stor.1000bar)!R" & h
                    Range("=Calcolo Kv,p,Q (simulazione)!C14").FormulaLocal = "=Carica con rampa (stor.1000bar)!AB" & h
                    If Range("=Calcolo Kv,p,Q (simulazione)!P27").Value < 0 Then
                        Sheets("Risultati simulazione").Select
                        Exit Sub
                    End If
                End If
                Sheets("Carica con rampa (stor.1000bar)").Select
                Range("F" & h, "AF" & h).Select
                Selection.AutoFill Destination:=Range("F" & h, "AF" & l), Type:=xlFillDefault
                Next h
            End If
            Sheets("Carica con rampa (stor. 800bar)").Select
            Range("F" & k, "AF" & k).Select
            Selection.AutoFill Destination:=Range("F" & k, "AF" & Z), Type:=xlFillDefault
            Next k
        End If
        Sheets("Carica con rampa (stor. 480bar)").Select
        Range("F" & x, "AF" & x).Select
        Selection.AutoFill Destination:=Range("F" & x, "AF" & y), Type:=xlFillDefault
    Next x
End Sub

```

**Figura 56 – Script in Visual Basic per l'implementazione della routine di calcolo**

Lo script, realizzato tramite Visual Basic, fornisce al programma Excel le istruzioni necessarie per eseguire la routine di simulazione per ogni istante di tempo.

Si compone di tre cicli *for* annidati tra loro (uno per ogni serbatoio di stoccaggio dell'idrogeno) che permettono, iterando sulle righe della tabella di simulazione, di selezionare le giuste caselle su cui effettuare la ricerca obiettivo e di copiare i valori di pressione e di portata da questa tabella a quella di calcolo delle perdite di carico e viceversa.

La parte di controllo e di verifica del  $\Delta P$  di pressione disponibile è affidata ad altrettanti cicli *if* che verificano che il valore risultante sia maggiore di zero. Se questo avviene il programma continua ad iterare sullo stesso ciclo *for* altrimenti passa al successivo che rappresenta lo storage a più alta pressione.

Il tasto “inizia simulazione” è collegato a questa routine che, una volta impostati i parametri, fa partire la simulazione.

L'intero processo di calcolo verrà realizzato molto più velocemente rispetto al caso manuale (meno di 5 minuti rispetto a più di 2 ore) con la successiva rappresentazione dei grafici e delle tabelle finali di processo.

### 3.5.1 Variazione dei parametri della linea di test

A questo punto, grazie all'implementazione del codice in Visual Basic, è stato possibile valutare quanto le diverse configurazioni dei parametri del circuito possono influire sull'intero processo di riempimento.

Le variazioni sul tema sono state eseguite sui seguenti componenti:

- **Diametro delle tubazioni**: variando il diametro sia per eccesso che per difetto si ottengono risultati negativi, a testimonianza del fatto che la scelta del tubo, fatta in fase di progettazione, permette di ottenere performance migliori. In particolare si nota che la diminuzione di diametro provoca nel circuito eccessive perdite di carico con effetti negativi su temperatura e pressione finale del tank; al contrario un aumento di diametro provoca un flusso troppo accentuato, in termini di portata massica, che fa sì che vengano superati i valori consentiti dalla norma.

- **Valvole:** anche per le valvole una variazione di diametro (sezione) provoca gli stessi effetti negativi detti in precedenza, così come accade variando il coefficiente Kv della valvola.
- **Scambiatore di calore:** la variazione di temperatura dello scambiatore è ciò che consente di ottenere risultati molto differenti tra loro. La simulazione “tipo” che ho effettuato presuppone una refrigerazione dell’idrogeno a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , che rappresenta la temperatura ottimale anche secondo la norma.  
Aumentando la temperatura a  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  si osserva progressivamente un peggioramento del riempimento del tank. Portando l’idrogeno ad una temperatura sempre più “elevata” si nota un aumento della temperatura finale del tank che porta ad un innalzamento automatico della pressione che a sua volta fa sì che la quantità di idrogeno immessa nel tank alla fine della simulazione sia notevolmente inferiore (il SOC diminuisce). Al contrario, scendere a temperature inferiori ( $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) fa ottenere risultati leggermente migliori (nell’ordine della decina di grammi ogni  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ma che non giustificano la spesa energetica necessaria a portare l’idrogeno a quella temperatura.
- **Variazione pressione e dimensione degli storage:** in merito a questo aspetto non si notano particolari differenze visto che la quantità di idrogeno in essi presente è molto superiore rispetto a quella contenuta nel tank. La variazione delle pressioni non porta altro che ad un differente sviluppo della curva di riempimento ma che, al termine della simulazione, porta agli stessi risultati.
- **Riduttore e rampa di pressione:** fermo restando che la rampa di pressione calcolata da norma in base alle dimensioni del tank, alla temperatura ambientale e alla pressione di precarica debba rimanere la stessa se queste condizioni rimangono inalterate, ho provato ad aumentare o diminuire la sua pendenza per apprezzare possibili differenze.  
Una diminuzione di pendenza della rampa porta ovviamente ad un rifornimento più lento, anche di qualche minuto, che fa sì che si ottengono in generale risultati migliori. Innanzitutto fa sì che il tank al termine del rifornimento si trovi ad una temperatura inferiore, per il fatto che questo è



esposto allo scambio termico con l'ambiente esterno per più tempo e anche perché i gradienti termici che deve subire sono di minore entità.

Anche la pressione segue di pari passo la temperatura con una minima diminuzione. Minimo è anche l'aumento della quantità di idrogeno immessa nel tank al termine del processo ed è questo il motivo per cui, a mio parere, non conviene diminuire più di tanto la rampa di pressione: porta a risultati praticamente identici (forse leggermente migliori) a fronte di tempi di rifornimento molto più lunghi.

Al contrario penso che si possa investire nel cercare di ottenere ottimi parametri di riempimento con una rampa di pressione più accentuata.

Nonostante la norma non permetta di eseguire rifornimenti più veloci (anche se futuri aggiornamenti lo permetteranno essendo questa datata 2020), ho potuto appurare che, con una corretta progettazione del circuito, si possono ottenere gli stessi parametri di riempimento con una rampa con il doppio della pendenza (e che completa quindi il processo nella metà del tempo).



## CAPITOLO 4

### “ANALISI DEL PROCESSO TRAMITE AMESIM”

#### **4.1 Introduzione ad Amesim Simcenter**

Amesim Simcenter è un software di simulazione per la modellazione e l'analisi di sistemi multidominio. Permette di modellare, analizzare e prevedere le prestazioni di sistemi mecatronici. I modelli sono descritti utilizzando equazioni analitiche non lineari dipendenti dal tempo che rappresentano il comportamento idraulico, pneumatico, termico, elettrico o meccanico del sistema. Rispetto ai software di modellazione CAE 3D, questo offre la possibilità di simulare il comportamento dei sistemi prima che la geometria CAD dettagliata sia disponibile, quindi viene utilizzato nel ciclo di progettazione del sistema.

##### **4.1.1 Caratteristiche del software e librerie**

Il software ha un'impostazione molto intuitiva e di semplice lettura a primo impatto. Per creare un modello di simulazione all'interno di Amesim viene utilizzata una serie di librerie con all'interno componenti predefiniti per i diversi domini fisici. Le librerie che ho personalmente utilizzato per simulare il processo di carica dei tank sono state principalmente quattro:

- Pneumatica: utilizzata per simulare la parte di circuito nella quale transita l'idrogeno;
- Termica e termo-idraulica: utilizzate per la modellazione dello scambiatore di calore e dei flussi termici in uscita sia dagli storage che dal tank;
- Segnale/controllo: utilizzata per effettuare le misurazioni nei punti di interesse e per regolare, attraverso un comando PID, il riduttore di pressione, al fine di far seguire al tank la rampa di pressione calcolata.

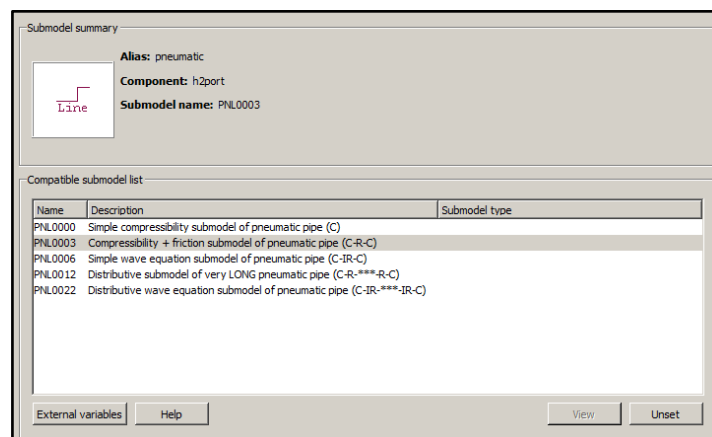


Le icone presenti nelle librerie possono essere semplicemente trascinate con il mouse all'interno dell'area di lavoro del sistema per essere poi collegate tra di loro. Per il collegamento, ogni icona dispone di porte che hanno diversi ingressi ed uscite. Prendendo sempre come esempio la pneumatica, i collegamenti tra le varie icone, e quindi tra i vari componenti, non rappresentano altro che i tratti di tubazione all'interno dei quali transita l'idrogeno.

#### 4.1.2 Descrizione degli step di sviluppo di una simulazione

Per la costruzione di un modello completo e per la successiva simulazione, all'interno di Amesim, ci sono quattro diverse fasi che il progettista deve seguire. Queste sono indicate da *tools* presenti al lato della zona riguardante il progetto e possono essere così descritte:

- 1) Sketch mode: rappresenta la modalità che permette di disegnare il circuito all'interno dell'area di progetto. Occorre posizionare correttamente sia le icone dei componenti, prese dalle rispettive librerie, che i tratti di collegamento tra le varie icone.
- 2) Submodel mode: consente di selezionare quale tipologia di componente si vuole utilizzare nel circuito, tra le diverse che vengono proposte e che sono rappresentate dalla stessa icona. Ad esempio per le tubazioni si possono scegliere diversi modelli di analisi come quelli mostrati in *Figura 59*:



**Figura 59 – Scelta tra le possibili configurazioni di una tubazione**

- 3) Parameter mode: all'interno di questa sezione vengono impostati i parametri numerici che riguardano le caratteristiche dei componenti. Variano a seconda del componente da settare: ad esempio, per una tubazione verranno richiesti il diametro, la lunghezza e la rugosità mentre per uno scambiatore di calore verrà richiesta la superficie di scambio termico ed il relativo coefficiente.
- 4) Simulation mode: rappresenta la sezione in cui è possibile impostare i parametri di simulazione e far partire quest'ultima. I parametri, che servono al software per il calcolo, sono lo *start time* (tempo di inizio calcolo), il *final time* (tempo di fine calcolo) ed il *time step* di simulazione (intervallo di tempo su cui il software effettua il calcolo dei parametri).

Seguendo questa procedura appena descritta, al termine della simulazione, tramite il post processing, è possibile realizzare i grafici che permettono di visualizzare gli andamenti temporali delle varie grandezze durante la simulazione.

## 4.2 Implementazione del circuito idraulico nel software

Dopo aver descritto, a grandi linee, il funzionamento del software e le sue caratteristiche principali, passiamo ora a definire come ho realizzato il circuito idraulico all'interno di Amesim, seguendo la procedura delineata nel paragrafo precedente. Prima di passare alla scelta dei componenti, sempre nella *Sketch mode*, sono andato a definire le caratteristiche dei fluidi che sono coinvolti, all'interno della linea di test, nel processo di riempimento. Questi sono semplicemente due: l'idrogeno, che è l'elemento protagonista del processo di riempimento, ed il liquido refrigerante, utilizzato lato fluido dello scambiatore di calore.

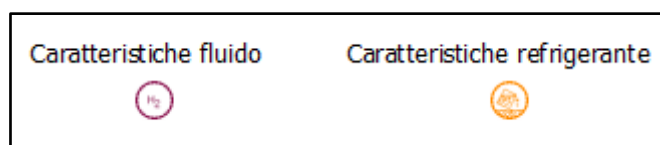


Figura 60 – Caratteristiche dei fluidi coinvolti nel processo

Per quanto riguarda l'idrogeno, entrando all'interno della libreria pneumatica, scegliendo l'icona *pneumatic gas properties*, si può selezionare, tra i tanti presenti nel software, il tipo di elemento che transita all'interno del circuito. In Amesim, infatti, è presente un *database* contenente le principali tipologie di gas esistenti, tra le quali c'è l'idrogeno. Ogni gas porta con sé i suoi parametri più rilevanti come la costante R dei gas, la densità in funzione di pressione e temperatura, il coefficiente di comprimibilità e tanti altri.

Per il fluido refrigerante si segue un procedimento del tutto analogo ma, trattandosi di un liquido con delle specifiche proprietà termiche, la libreria di interesse è quella termo-idraulica. Il liquido scelto dalla Loccioni per raffreddare l'idrogeno, in accordo con i fornitori dello scambiatore di calore (Kelvion), è stato il “*Termofluid DW-Therm M90.200.02*”, una miscela di trietossisilani isometrici sviluppata per sistemi a tenuta idraulica. Il fluido presenta caratteristiche conformi ad un circuito di questo genere come: intervallo di temperatura da  $-90^{\circ}\text{C}$  a  $+200^{\circ}\text{C}$ , eccellente stabilità alle alte temperature, bassa viscosità a basse temperature, bassa volatilità e buona compatibilità con oli siliconici.

#### **4.2.1 Scelta dei componenti ed impostazione dei parametri**

Definite le caratteristiche dei fluidi coinvolti nel processo, sono passato alla vera e propria costruzione del circuito all'interno del software. Sono partito da quello che mi era stato fornito dalla Loccioni all'inizio dell'esperienza di tirocinio e di cui abbiamo abbondantemente parlato nei capitoli precedenti.

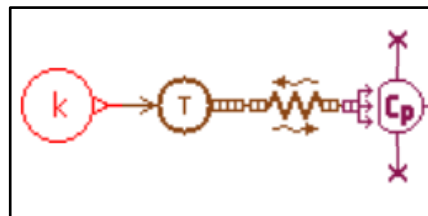
La riproduzione dei singoli componenti è stata molto semplice per molti di questi, in quanto era già presente l'icona che lo rappresentava, mentre per altri, come ad esempio lo scambiatore di calore, è stato necessario costruire un modello più complesso.

Partendo dai serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno, dal quale inizia il processo di rifornimento, ho scelto e posizionato i seguenti elementi:

- Accumulatori (*storage*): fanno parte della libreria pneumatica ed identificano i serbatoi di stoccaggio a bassa, media ed alta pressione, ciascuno della capacità

di 2800 L. I parametri richiesti dal software per la simulazione sono la pressione e le temperatura ad inizio simulazione, la capacità (che è appunto di 2800 L) ed il tipo di fluido in essi contenuto. Le linee di alimentazione sono collegate in parallelo tra loro ed il meccanismo di entrata in funzione è regolato tramite l'utilizzo di valvole 2-vie comandate elettricamente.

- Modello di conduzione: viene applicato ad un elemento che è soggetto ad un flusso termico per conduzione. In questo primo caso è stato applicato agli storage in quanto, durante il rifornimento, man mano che l'idrogeno al loro interno diminuisce, si ha una variazione di temperatura che fa sì che questi non si trovino più in equilibrio termico con l'ambiente esterno. Il blocchetto che rappresenta il modello di conduzione necessita di un parametro fondamentale che è la temperatura ambiente (in questo caso pari a 15 °C), esprimibile attraverso la relativa icona T (permette di trasformare un valore costante k, pari alla temperatura ambiente, in un input al modello di conduzione). All'interno del modello di conduzione è necessario impostare anche altri due ulteriori valori quali la superficie di scambio termico (superficie dello storage, calcolata in precedenza per la determinazione del flusso termico) e la conduttanza termica (espressa come reciproco della resistenza termica  $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$ ).



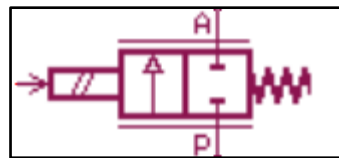
**Figura 61 – Particolare della realizzazione dello storage in Amesim**

- Pressostati: posizionati in punti del circuito in cui occorre seguire l'andamento della pressione. Il segnale in uscita permette, nel corso della simulazione, di controllare valvole o elementi di cui si rende necessaria una verifica.
- Valvola di non ritorno: è posta in uscita da ciascun serbatoio di stoccaggio per evitare che l'idrogeno, soprattutto in fase di passaggio da uno storage all'altro, ritorni indietro dalla linea di test.



- Valvola 2-vie: utilizzata in ogni storage per controllare il flusso di idrogeno in uscita. Anche queste valvole hanno la relativa icona presente nella libreria di Amesim ma, a differenza di quelle presenti nel circuito Loccioni, che sono a comando pneumatico, queste sono a comando elettrico. L'apertura e la chiusura è determinata in base alla corrente di input che viene inviata alla valvola stessa. Essendo l'alimentazione di idrogeno fornita in maniera sequenziale da ciascuno storage (da quello a bassa a quello ad alta pressione), la valvola risulterà completamente aperta quando il relativo storage ricarica il tank, mentre si chiuderà nel momento in cui il  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}}$  risulterà pari a zero.

I parametri da indicare nel software sono l'area di passaggio (determinata grazie al diametro presente nel catalogo Maximator) ed il coefficiente  $K_v$ , oltre alla corrente che consente la massima apertura della valvola.



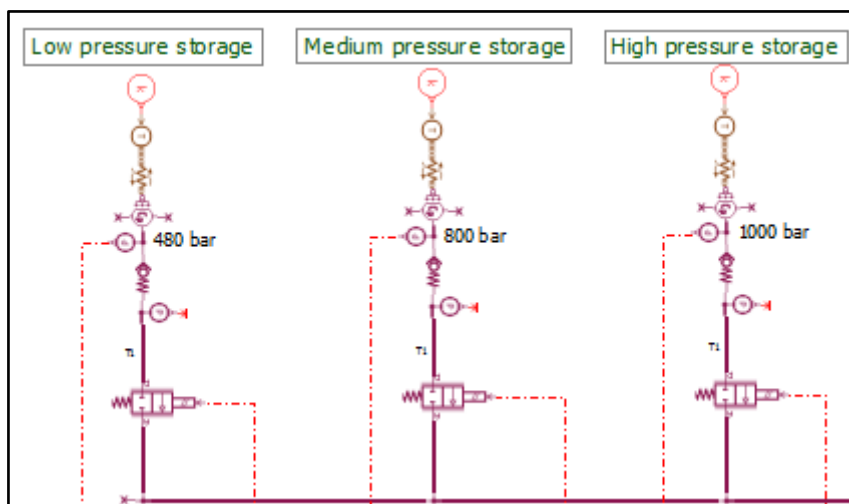
**Figura 62 – Particolare della valvola proporzionale 2-vie**

- Tubazioni: nel modello Amesim rappresentano i tratti di collegamento tra i vari elementi appena descritti. Prima di impostare i parametri occorre selezionare il modello di analisi e di simulazione da applicare al singolo tratto di tubo e per il circuito in esame si è optato per un modello con comprimibilità, attrito e scambio termico lungo le superfici (indicato con C-R nel software). Le grandezze richieste per la simulazione sono: temperature e pressioni iniziali su entrambi i lati di ingresso e uscita tubo (con le pressioni impostate in funzione delle perdite di carico calcolate con i fogli Excel della precedente simulazione), diametro e lunghezza del tubo, rugosità relativa, coefficiente di scambio termico e temperatura esterna.

Lo scambio termico verso l'esterno sarà comunque di piccola entità (per questo motivo ho impostato un basso valore del coefficiente di scambio termico) in

quanto le tubazioni, in fase di realizzazione, saranno coibentate con opportuni materiali.

L'intera linea di alimentazione, comprendente gli elementi appena descritti per ciascuno storage, sarà rappresentabile in Amesim come in *Figura 63*.

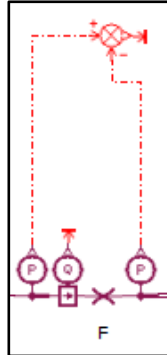


*Figura 63 – Realizzazione della linea di alimentazione in Amesim*

La successiva linea di test, che permette di far fluire l'idrogeno dalla linea di alimentazione, appena descritta, fino al tank del cliente, si compone degli stessi elementi descritti in fase di analisi del circuito:

- Valvola 2-vie: ne sono presenti sei in serie intervallate da altri componenti come riduttore di pressione, scambiatori di calore e flussimetri ad effetto Coriolis. Le caratteristiche sono le stesse per tutte le valvole 2-vie, il fornitore è sempre la Maximator e le aree di passaggio ed il  $K_v$  sono gli stessi della valvola presente nella linea di alimentazione.
- Flussimetro: non esiste all'interno di Amesim un componente idoneo che possa simulare il comportamento di un flussimetro ad effetto Coriolis. Il motivo è dato dal fatto che, di per sé, questo componente è un misuratore di flusso ma per via della sua costruzione introduce grandi perdite di carico all'interno del circuito. Per questo motivo, al fine di disegnare un componente equivalente, ho implementato in Amesim un flussostato, che misura il livello di portata

istante per istante, ed uno strozzatore in serie che va ad introdurre le relative perdite di carico.



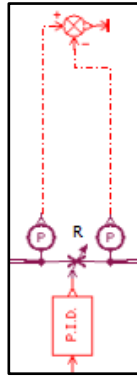
*Figura 64 – Modello equivalente di flussimetro ad effetto Coriolis*

- Riduttore di pressione: come già detto nei capitoli precedenti, rappresenta l'elemento che regola la pressione del tank secondo la rampa prestabilita. In Amesim è presente l'icona del riduttore di pressione ma questo non consente di calibrare la pressione dinamicamente man mano che va avanti la simulazione.

Richiede infatti una pressione fissa da impostare ed il componente lavorerà, aprendosi o chiudendosi, per fare in modo che non venga mai superato quel livello di pressione.

Detto questo, appare evidente che il componente da utilizzare nella linea di test non possa essere effettivamente quello appena descritto, in quanto il riduttore di pressione del circuito analizzato deve far in modo che la pressione del tank segua la rampa prestabilita (varia il livello di pressione istante per istante).

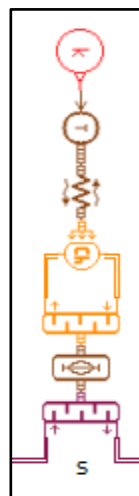
Per modellare il componente ho quindi scelto di utilizzare uno strozzatore con orifizio variabile, che ricevendo come input un segnale controllato da un PID, modifica la sezione di passaggio (con aperture e chiusure istantanee), regolando la pressione.



**Figura 65 – Modello di riduttore di pressione comandato tramite PID**

Il segnale, controllato dal PID, non è altro che la differenza tra la pressione definita dalla rampa e quella misurata sul tank e lo strozzatore, regolando la sezione di passaggio, dovrà fare in modo che questo contributo risulti per tutta la simulazione circa pari a zero.

- Scambiatore di calore: la sua modellazione è stata la più complessa in quanto risultava difficile trovare una soluzione che facesse al mio caso. All'interno delle librerie di Amesim sono presenti dei modelli di scambiatore di calore, con strutture anche molto diverse tra loro, ma presuppongono la conoscenza di parametri geometrici e costruttivi che non avevo a disposizione. Per questo motivo, ricercando nell'help di Amesim, ho trovato una sezione in cui veniva spiegato come costruire in modo semplice uno scambiatore con le caratteristiche di cui avevo bisogno.

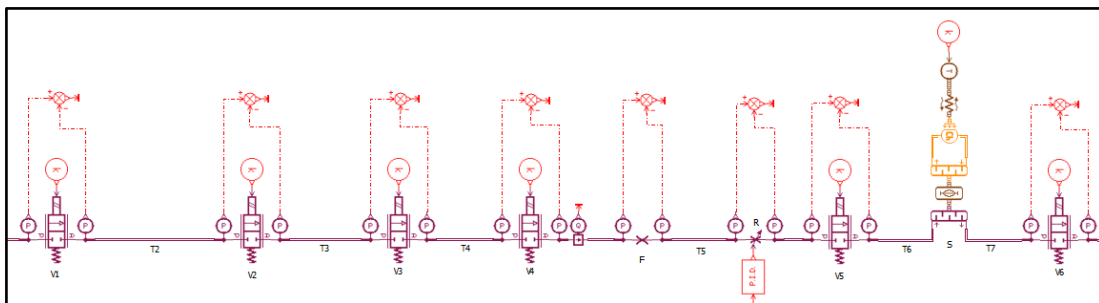


**Figura 66 – Modello di scambiatore di calore in equicorrente**

Lo scambiatore di calore in figura presenta fondamentalmente tre componenti: un primo *half heater exchanger* lato idrogeno, un secondo lato fluido refrigerante (*Termofluid DW-Therm M90.200.02*) ed un elemento della libreria termica (di colore marrone) che fa da collegamento tra i due. La zona dello scambiatore lato refrigerante si compone anche di un serbatoio di accumulo del fluido che, tramite il modulo di conduzione, viene portato ad una temperatura più bassa di quella di prova (intorno ai  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) in modo che l'idrogeno, una volta attraversato lo scambiatore, abbia una temperatura di  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In questo modo è possibile raffreddare in modo ottimale il combustibile e fare in modo che, all'ingresso del tank, abbia quella temperatura che viene mantenuta costante per tutta la simulazione.

Gli unici parametri da impostare negli *half heater exchanger* sono la superficie e il coefficiente di scambio termico. Entrambi i parametri sono ricavabili dal catalogo fornitore della Kelvion.

L'intera linea di test, comprendente gli elementi appena descritti, sarà rappresentata in Amesim come *Figura 67*.



**Figura 67 - Realizzazione della linea di test in Amesim**

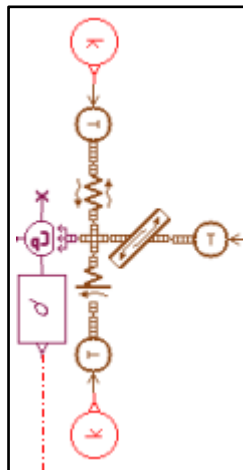
L'ultima parte da modellare nel circuito è stato il tank del cliente. Abbiamo già parlato, nella parte di spiegazione dei parametri utilizzati in Excel, dei contributi di scambio termico ai quali è soggetto il tank finale. Per questo motivo non ho fatto altro che riportare ciò che abbiamo precedentemente discusso.

In primo luogo sono partito considerando il tank come un accumulatore con determinate dimensioni ed una capacità di 750 L. Collegato ad esso sono presenti delle

porte termiche che consentono di aggiungere i contributi dei vari fenomeni di scambio termico:

- 1) **Conduzione:** realizzata sempre attraverso l'opportuno modulo di conduzione. La temperatura esterna impostata è pari a quella ambiente (di 15 °C);
- 2) **Convezione naturale:** anch'essa, all'interno di Amesim, ha un opportuno modulo e per impostare i parametri non servono altro che: le dimensioni del tank, il tipo di fluido esterno ad esso (in questo caso aria) e la sua pressione assoluta (1 atmosfera).
- 3) **Convezione forzata:** tramite l'apposito modulo è possibile introdurre questo tipo di fenomeno. I parametri da conoscere sono: dimensioni e area del tank, tipologia di fluido presente all'interno (idrogeno), la temperatura e la pressione di quest'ultimo all'interno. I valori di temperatura e pressione vengono prelevati direttamente dai sensori presenti nel tank.

Il tank, con i contributi di scambio termico appena affrontati, sarà rappresentato in Amesim nel seguente modo:



*Figura 68 – Modellazione del tank del cliente*

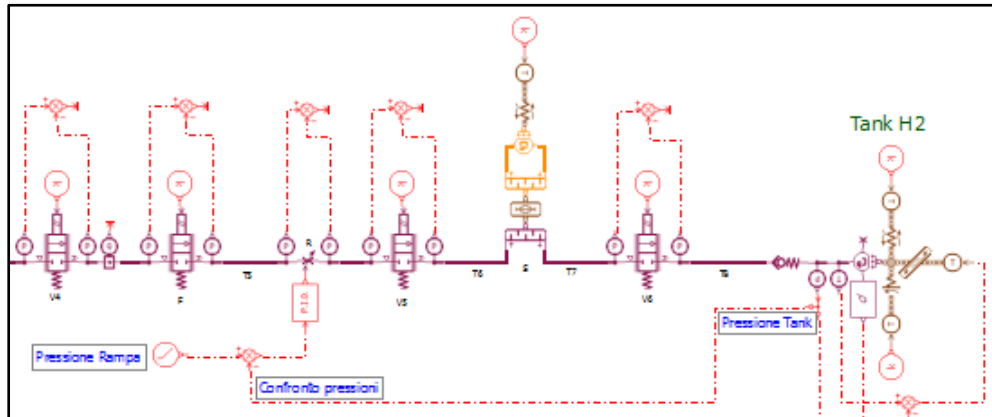
## 4.2.2 Analisi dei segnali per il controllo del processo

Definita la parte riguardante i componenti, rimane da formulare e mettere in pratica l'insieme delle logiche in modo tale che, durante la simulazione, vengano rispettati vari aspetti del processo.

La prima logica di controllo che ho implementato all'interno del circuito in Amesim è stata quella riguardante l'inseguimento della rampa di pressione. Gli elementi fondamentali per far sì che lo strozzatore con orifizio variabile faccia seguire al tank la rampa di pressione stabilita sono quattro:

- **Pressostato:** posizionato sul tank, permette di misurare istante per istante la pressione di quest'ultimo. Il segnale proveniente dal sensore (pressione tank) viene poi utilizzato per il confronto con il valore di pressione della rampa.
- **Funzione rampa:** permette di impostare una funzione di tipo lineare in funzione del tempo. I valori di cui ha bisogno sono il *value before ramp* (rappresenta il valore di inizio della rampa, nel nostro caso pari a 20 bar, ovvero la pressione iniziale del tank), la pendenza della rampa (pari al valore dell' $APRR_{target}$ ) e lo *start time* (istante iniziale di tempo per l'inizio della rampa). Tramite questi tre parametri è possibile costruire una rampa in funzione del tempo. Il rispettivo segnale (pressione rampa) va confrontato poi con quello proveniente dal tank.
- **Blocchetto di confronto tramite differenza:** rappresenta lo strumento di confronto delle pressioni. Riceve in ingresso i segnali di pressione provenienti dalla rampa e dal tank e ne esegue semplicemente la differenza (valore di uscita).
- **Controllo PID:** detto anche controllo proporzionale-integrativo-derivativo, rappresenta, in breve, un sistema di retroazione impiegato nei sistemi di controllo automatico. Grazie ad un input, nel nostro caso rappresentato dalla differenza dei valori di pressione, è in grado di reagire ad un eventuale errore positivo o negativo facendo tendere il valore in uscita a zero. Il PID regola l'uscita in base a: valore del segnale di errore (azione proporzionale), valori passati del segnale di errore (azione integrale), quanto velocemente il segnale di errore varia (azione derivativa). Il valore in uscita, che come detto tende a

zero, viene dato in ingresso allo strozzatore con orifizio variabile che, in corrispondenza di valori istantaneamente diversi da zero, agisce aprendosi o chiudendosi per far sì che la pressione del tank segua di pari passo quella della rampa.



**Figura 69 – Logica di inseguimento della rampa di pressione**

La seconda logica di controllo che ho realizzato è stata quella riguardante i punti di lavoro dei singoli storage ed il controllo delle valvole 2-vie poste appena in uscita dalla linea di alimentazione. Il segnale proveniente dal pressostato, situato sul tank, gioca anche in questo caso un ruolo fondamentale e viene utilizzato in combinazione con ulteriori pressostati posti sugli storage per agire sul funzionamento delle valvole.

Iniziamo la descrizione della logica di controllo dal *low pressure storage* e *medium pressure storage*:

- 1) Il segnale di pressione proveniente dal tank viene confrontato istante per istante, tramite un blocchetto di controllo per differenza, con quello proveniente dal serbatoio di stoccaggio a bassa pressione.
- 2) Il segnale in uscita dal blocchetto di differenza delle pressioni viene inviato a due controllori on/off che restituiscono il valore 0, se il parametro di uscita è al di sotto di una certa soglia, mentre 1 se è al di sopra o viceversa.
- 3) Il blocchetto on/off diretto alla valvola proporzionale 2-vie del *low pressure storage* è tarato in modo che, se la differenza tra le pressioni dello storage e del tank è positiva (è disponibile un  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}}$  per far fluire idrogeno da quel serbatoio di stoccaggio), restituisce il valore 1 che permette, attraverso



un'opportuna conversione del segnale in corrente, di mantenere completamente aperta la valvola 2-vie per quel serbatoio. Se la differenza tra i valori di pressione risulta pari a zero, il valore in uscita dal blocchetto on/off sarà 0 e la valvola si chiuderà.

- 4) Descritto il controllo della valvola 2-vie del *low pressure storage*, passiamo a descrivere cosa accade, in contemporanea, a quella del *medium pressure storage*. Il funzionamento del blocchetto on/off di questa valvola è esattamente il contrario di quella descritta in precedenza: restituirà il valore 0, mantenendo chiusa la 2-vie, se il  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}}$  per il *low pressure storage* è positivo, restituirà il valore 1, aprendo la valvola, una volta che la pressione del tank ha eguagliato quella del *low pressure storage*.

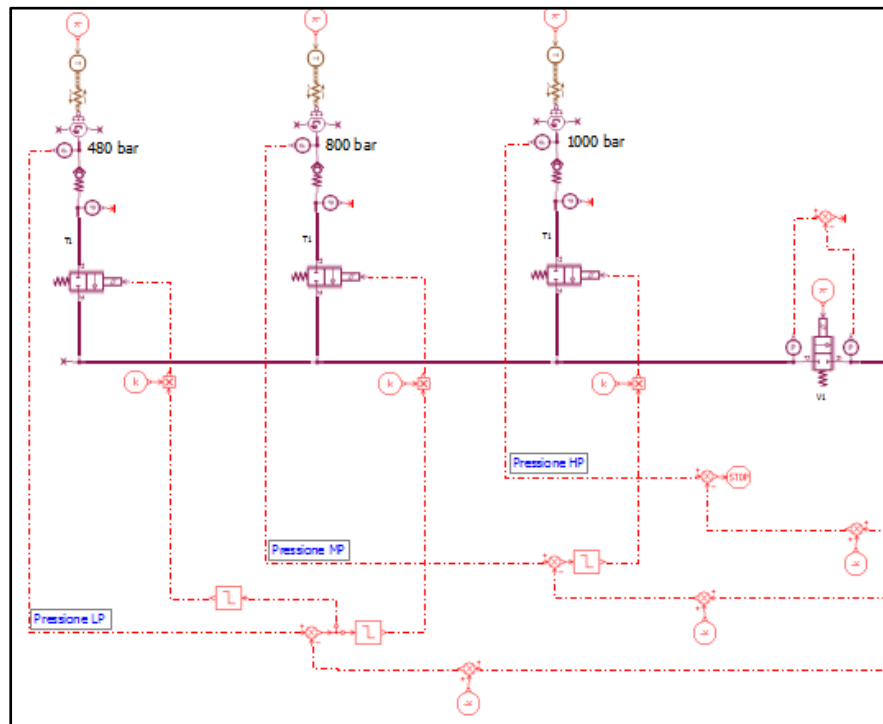
In definitiva si può affermare che fino a quando la pressione del tank non raggiunge quella del *low pressure storage* sarà quest'ultimo ad alimentare il tank finale; nel momento in cui verificherà che  $P_{low\ pressure\ storage} = P_{tank}$ , la valvola 2-vie del *low pressure storage* si chiuderà e si aprirà quella del *medium pressure storage*.

La stessa cosa accade per quanto riguarda il passaggio tra il *medium pressure storage* e *high pressure storage*; è presente un altro blocchetto di confronto delle pressioni che, tramite un blocco on/off, va ad agire sull'apertura della rispettiva valvola 2-vie, che avverrà una volta che la  $P_{medium\ pressure\ storage} = P_{tank}$ . In corrispondenza dell'*high pressure storage* è presente un ulteriore ramo di controllo in base al quale, una volta che la  $P_{high\ pressure\ storage} = P_{tank}$ , farà interrompere la simulazione (comando stop).

Nella *Figura 70*, che rappresenta la logica di controllo di quanto appena trattato, sono presenti altri due elementi:

- 1) In uscita dai blocchetti on/off sono presenti delle costanti k che, moltiplicate per il valore in uscita dall'on/off (0 o 1), permettono di ricavare la corrente necessaria alla regolazione della valvola 2-vie:
  - Valore 0 di uscita on/off:  $0 * 40 = 0\ mA = valvola\ chiusa$
  - Valore 1 di uscita on/off:  $1 * 40 = 40\ mA = valvola\ aperta$

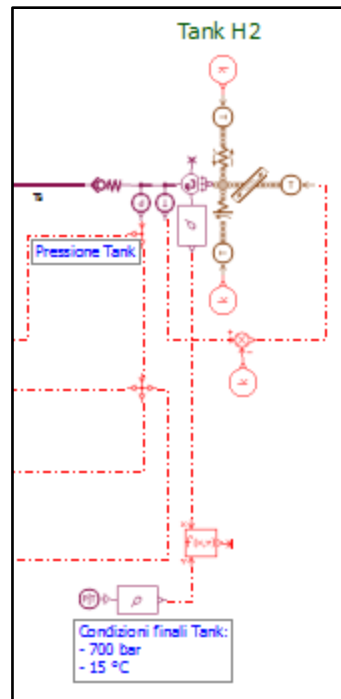
- 2) Prima del blocchetto di confronto delle pressioni, lato pressione tank, è presente una costante  $k$  che consente, in un certo senso, di aumentare la rispettiva pressione. Il fatto di fornire un offset aggiuntivo alla pressione del tank consente di effettuare un passaggio da un serbatoio di stoccaggio all'altro in modo più funzionale, garantendo una continua portata di idrogeno. Se così non fosse, si arriverebbe, in prossimità del passaggio da uno storage all'altro, ad un  $\Delta P_{disponibile_{monte-valle}}$  vicino al valore zero ma mai uguale, per via del fatto che, in questa condizione, lo storage a più bassa pressione fornisce una piccolissima quantità di idrogeno. Per ovviare a questo inconveniente viene suggerito il fatto di impostare un offset così da rendere netto il passaggio da uno storage all'altro.



**Figura 70 – Logica di lavoro dei serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno**

Ultima parte di controllo da descrivere è quella relativa alla misura del SOC (state of charge), che rappresenta la percentuale di riempimento del tank del cliente. La norma definisce che, in condizioni di riposo, l'idrogeno si trovi all'interno del tank ad una temperatura di 15 °C e ad una pressione di 700 bar. Tramite il blocchetto "calculation

*of pneumatic gas properties*”, fornendo in input i valori di pressione e temperatura appena citati, il software calcola, conoscendo il tipo di gas, la densità di quest’ultimo all’interno del tank. Moltiplicando tale valore per il volume del tank, si ottiene la massima quantità di idrogeno in esso caricabile. Confrontando il valore di massa calcolato con quello trasferito dagli storage al tank, durante la simulazione, si ottiene il SOC durante il processo di carica.



**Figura 71 – Logica di calcolo del SOC (state of charge)**

### **4.3 Simulazione del processo di riempimento**

Ho fin qui descritto per intero da quanti e quali elementi è formato il circuito idraulico all’interno di Amesim. Dopo la lunga fase di impostazione dei parametri dei componenti e della logica di funzionamento, il circuito risulta completo e pronto per la simulazione, come testimonia la *Figura 72*.

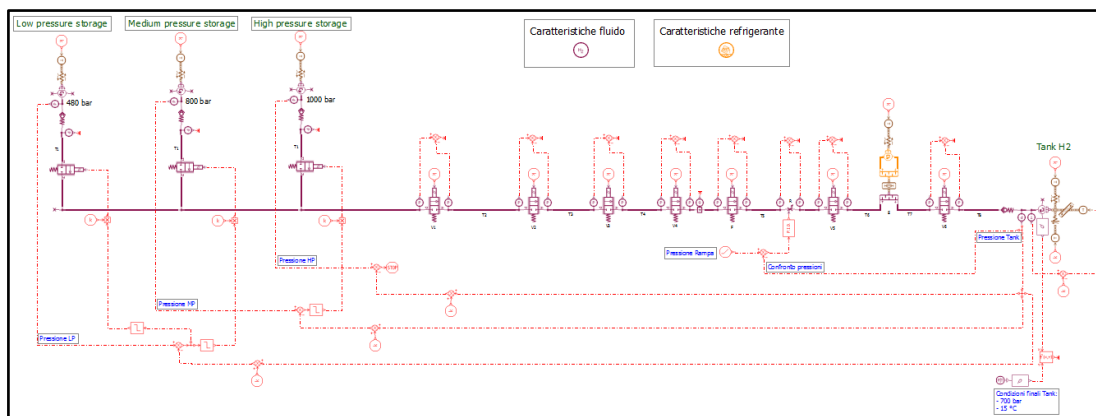


Figura 72 – Schema completo del circuito in Amesim

### 4.3.1 Parametri di simulazione

La definizione dei parametri di simulazione risulta di semplice impostazione in quanto occorre definire esclusivamente 3 parametri:

- *Start time*: tempo di inizio simulazione che sarà naturalmente di 0 s;
- *Final time*: tempo di fine simulazione. Ho calcolato questo parametro ipotizzando indicativamente un tempo entro il quale la simulazione si dovrebbe concludere. Il calcolo è stato indicativamente effettuato in base alle pressioni (di inizio e fine simulazione) e alla rampa di pressione impostata:

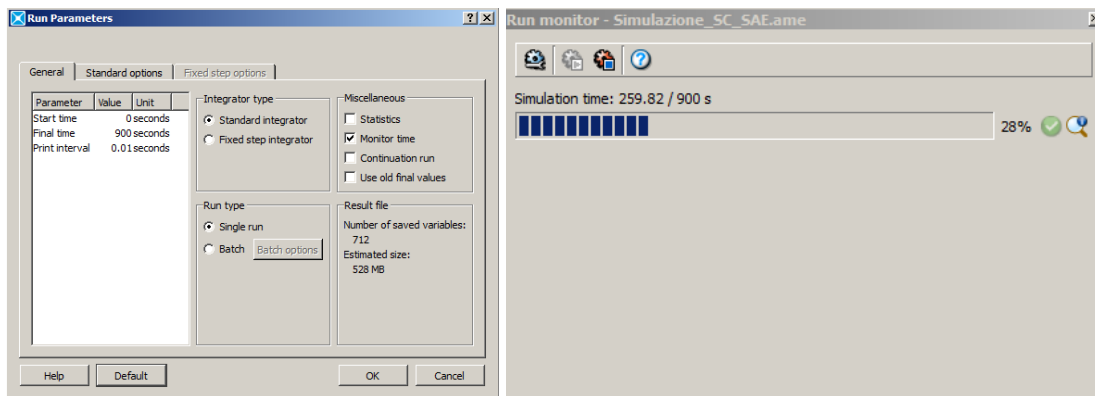
$$t_{fine\ rifornimento} = \frac{P_f - P_i}{APRR_{target}} = \frac{875 - 20}{0,984833333} \cong 868\ s$$

Il tempo di fine rifornimento è quindi stato fissato pari a 900 s, in modo tale che, se viene raggiunta l'uguaglianza delle pressioni  $P_{high\ pressure\ storage} = P_{tank}$ , la simulazione si interrompe prima del raggiungimento del *final time*, altrimenti continuerà fino al tempo impostato.

- *Print interval*: rappresenta ogni quanto tempo il software effettua i relativi calcoli. Come abbiamo detto, il *time step* è uno dei parametri fondamentali che consente di ottenere una simulazione con diversi gradi di precisione a seconda dell'ampiezza dell'intervallo scelto. E' necessario infatti che questo sia il più

piccolo possibile affinché i calcoli vengano effettuati in maniera più precisa. All'interno di Amesim non era possibile scegliere un *time step* più piccolo di 0,01 s poiché il file di simulazione avrebbe occupato troppa memoria, da qui la scelta di considerare questo determinato valore.

Terminata l'impostazione dei parametri non resta altro che far partire, tramite il testo play, la simulazione.



**Figure 73/74 – Impostazione parametri e avvio della simulazione**

### 4.3.2 Analisi dei risultati

Una volta terminato il processo di simulazione, il software ha calcolato automaticamente tutti i parametri necessari all'analisi del processo e, attraverso il post-processor, è possibile verificare come variano le grandezze di interesse all'interno del circuito.

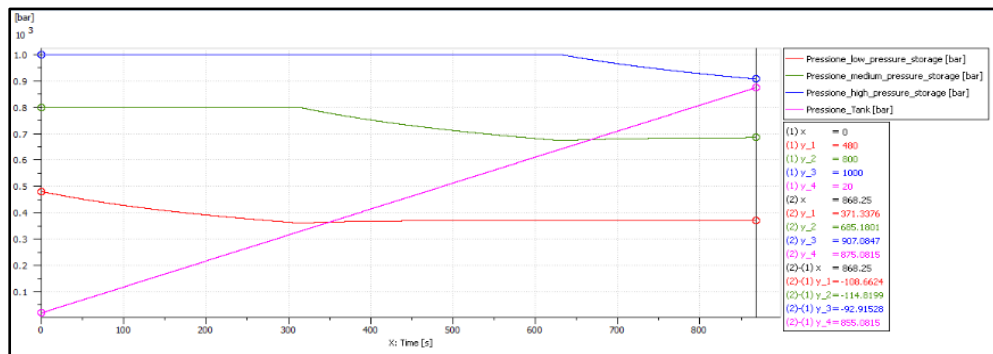
Per questo motivo mi sono dedicato alla costruzione e all'analisi dei grafici riguardanti i parametri di maggior rilievo per il processo di riempimento, con l'ottica poi di valutare le relative differenze. Queste grandezze riguardano:

- Andamento della pressione negli storage e nel tank: sull'andamento della pressione del tank ci sono ormai pochi dubbi a riguardo. Il suo sviluppo seguirà la rampa stabilita nelle fasi preliminari.

Mettendo tutte le grandezze all'interno dello stesso grafico si può notare come la diminuzione della pressione di ciascuno storage riguardi, ovviamente,

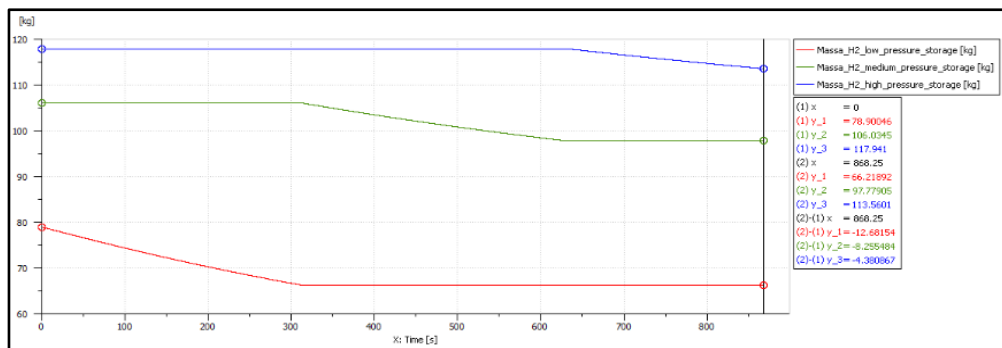
esclusivamente il lasso di tempo in cui questi lavorano ed il passaggio dall'uno all'altro avviene, a meno dell'offset scelto, nel momento in cui i grafici (di pressione della rampa e dello storage) si intersecano tra di loro ( $P_{storage} = P_{tank}$ ).

Altro aspetto da sottolineare è che la pressione finale del tank al termine del processo di ricarica risulta pari a 875,08 bar, che è esattamente la pressione finale stabilita dalla norma.



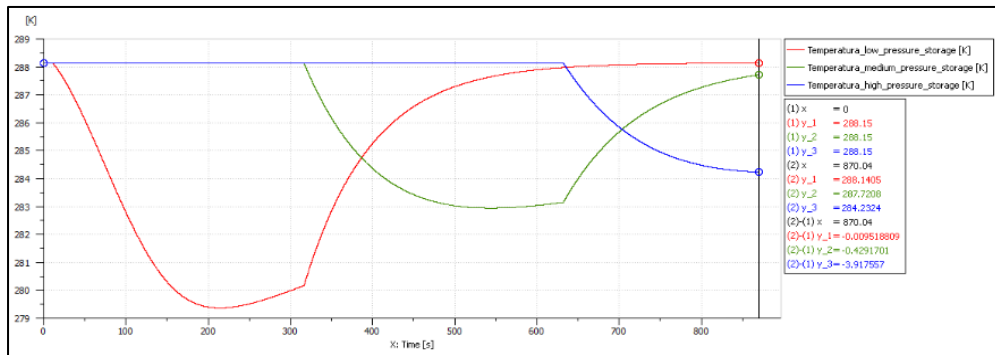
**Figura 75 – Andamento della pressione degli storage e del tank**

- Andamento della quantità di  $H_2$  presente negli storage: come è normale che sia, durante il processo di riempimento del tank, tutti e tre gli storage subiscono la perdita di una massa di idrogeno. Da notare è il fatto che la quantità di  $H_2$  in uscita dai serbatoi non sia la stessa: il *low pressure storage* fornisce al tank una maggiore quantità di idrogeno (circa 12,5 kg) ed è dato principalmente dal fatto che il differenziale di pressione iniziale è maggiore rispetto agli altri storage.



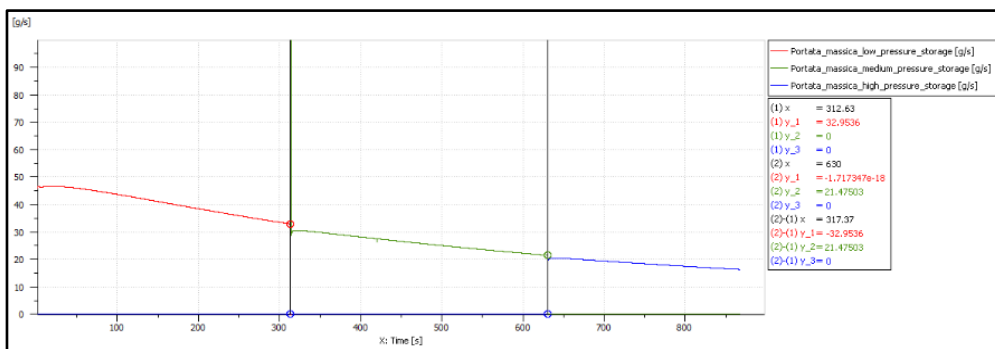
**Figura 76 – Andamento della quantità di idrogeno presente negli storage**

- Andamento della temperatura degli storage: la temperatura all'interno di ciascuno storage ha un andamento molto particolare ma che può essere spiegato semplicemente. Prima della loro zona di lavoro, essendo questi in equilibrio termico con l'ambiente esterno, non subiscono variazioni di temperatura cosa che accade una volta che iniziano a ricaricare il tank. La diminuzione della quantità di idrogeno negli storage, provocando una depressurizzazione di quest'ultimi, fa diminuire la temperatura all'interno che tende poi ad aumentare una volta chiusa la valvola 2-vie per via dello scambio termico con l'esterno.



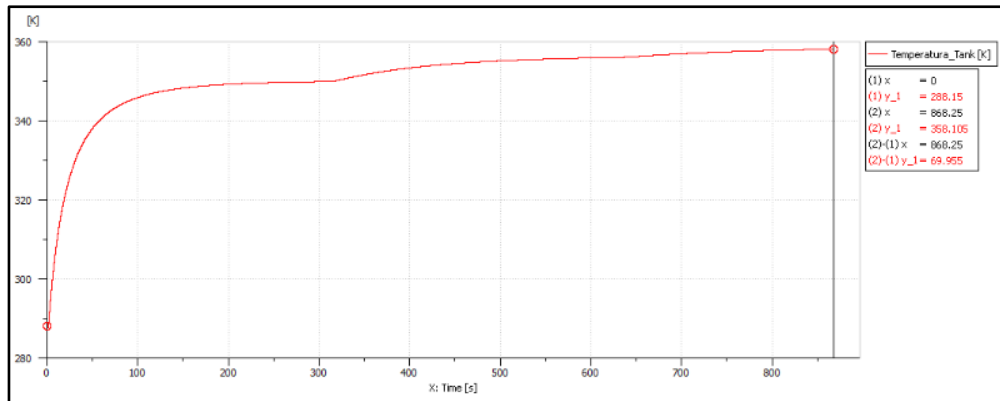
**Figura 77 - Andamento della temperatura degli storage**

- Andamento della portata massica in uscita dagli storage: il grafico della portata massica in uscita dagli storage ha un andamento molto simile a quello ottenuto in Excel. Nel passaggio da uno storage all'altro (sottolineato con la diversa colorazione) mantiene una certa continuità. Il valore massimo che si attesta sui 48 g/s, ad inizio ricarica.



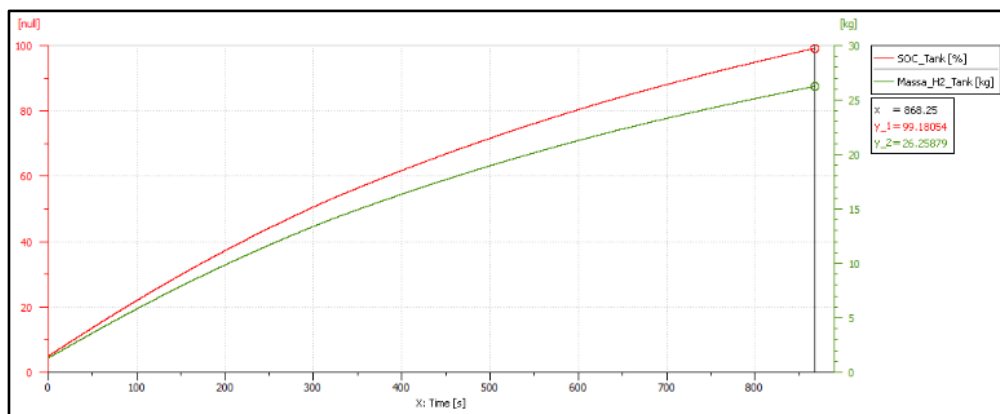
**Figura 78 – Andamento della portata massica in uscita dagli storage**

- Andamento della temperatura nel tank: la temperatura segue quanto dichiarato nella norma. Ha una prima parte, ad inizio riempimento, con una forte crescita che tende poi ad assestarsi col progredire della simulazione. Il valore massimo che viene raggiunto è di 358,10 °K pari ad 84,95 °C che sono praticamente uguali agli 85 °C dichiarati dalla norma.



**Figura 79 – Andamento della temperatura del tank**

- Andamento della quantità di idrogeno nel tank e SOC: la quantità di idrogeno fornita al tank non è uniforme nell’arco della simulazione ma, come visto nel grafico della portata massica, diminuisce con l’andare avanti del processo. La quantità finale di idrogeno immessa all’interno del tank risulta uguale a 26,25 kg con un SOC pari al 99,18%. Il tank non risulta quindi perfettamente pieno ma, dato che la  $P_{high\ pressure\ storage} = P_{tank}$ , il rifornimento si interrompe.



**Figura 80 – Andamento della massa di idrogeno nel tank e SOC**



### 4.3.3 Confronto con i risultati Excel

Una volta ricavati i grafici in Amesim, l'aspetto interessante è stato quello di andare a valutare le similitudini e differenze tra simulazioni che seguono strade completamente diverse, ma che hanno in comune la struttura del circuito idraulico. Vorrei di seguito presentare di nuovo i grafici mostrati in questo capitolo e nel precedente per evidenziare come, a prescindere dai valori trovati, che sono necessariamente diversi per il fatto che nelle simulazioni Excel ho effettuato varie semplificazioni al modello, gli andamenti temporali siano molto simili tra loro. Per questo motivo propongo il confronto riguardante tutte le grandezze ricavate in Excel al termine del processo di riempimento ad eccezione della misura della pressione del tank che, essendo definita dalla rampa, risulta lineare in entrambi i casi:

- **Confronto grafici portata massica:** i risultati ottenuti nelle due simulazioni sono molto simili tra loro. Entrambe mostrano un andamento che, partendo da un valore massimo (intorno ai 48 g/s), decresce con continuità tra gli storage.

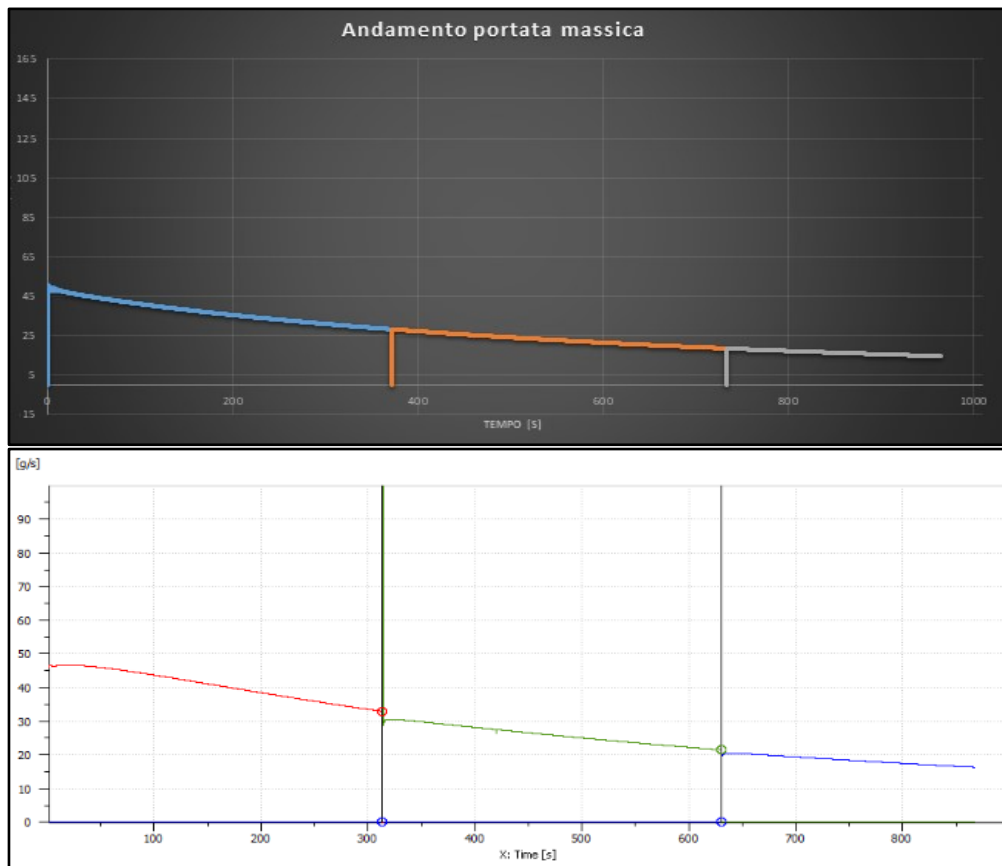
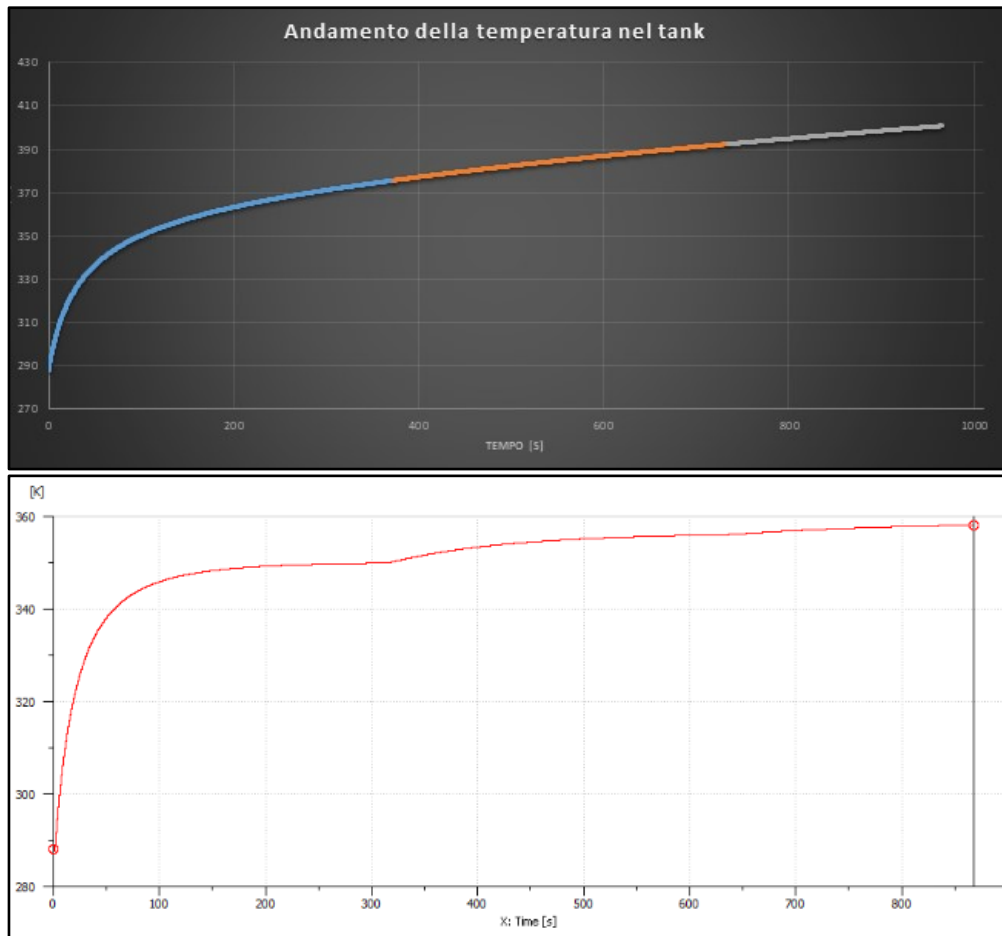


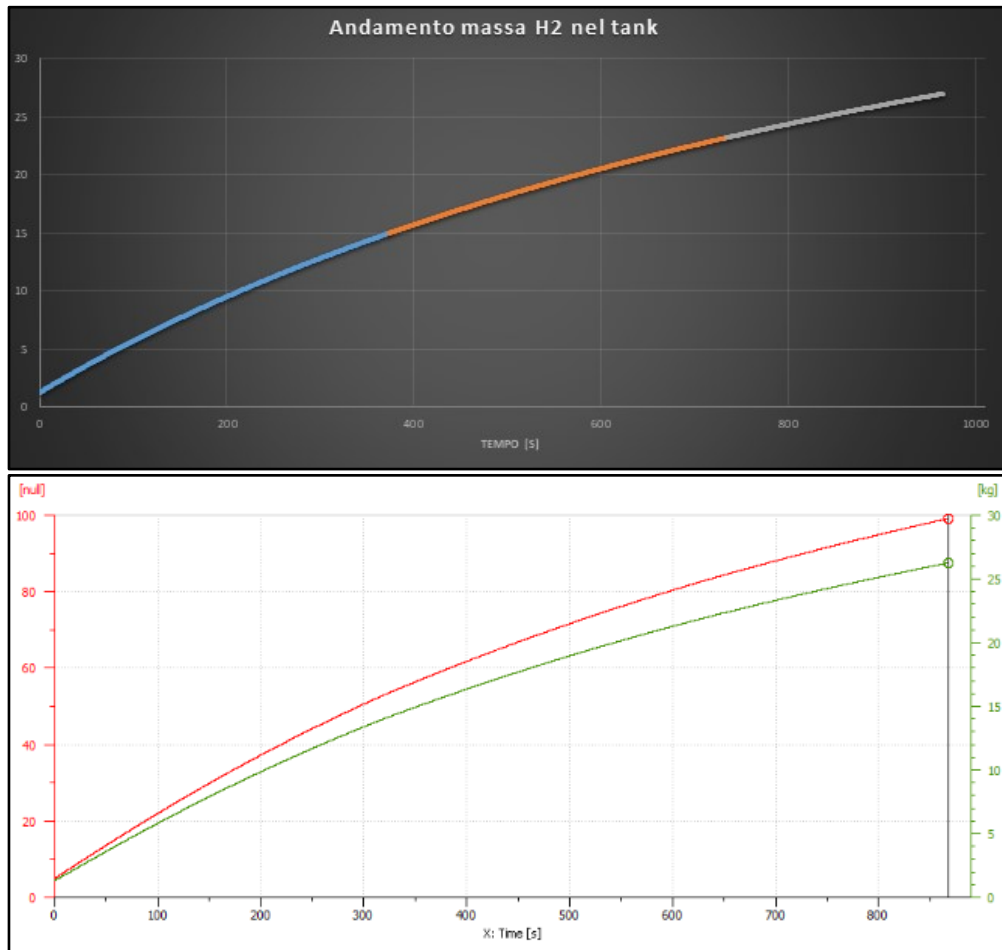
Figure 81/82 – Confronto grafici portata massica (Excel-Amesim)

- **Confronto grafici temperatura tank:** anche la temperatura mostra un andamento molto simile tra i due casi di interesse. Sono caratterizzati da un forte aumento della temperatura nella fase iniziale che tende poi a rimanere quasi costante nel corso della restante parte della simulazione. I valori finali sono naturalmente differenti per il fatto che la simulazione Excel mostra una temperatura decisamente più alta rispetto a quella consentita mentre quella in Amesim determina una  $T_{finale} \cong 85^{\circ}\text{C}$ .



**Figure 83/84 - Confronto grafici temperatura tank (Excel-Amesim)**

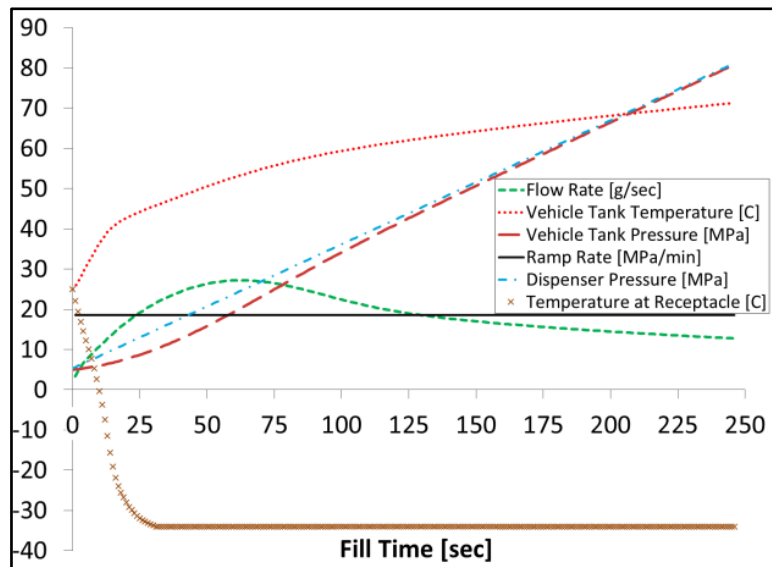
- **Confronto grafici massa di H<sub>2</sub> introdotta nel tank:** la quantità di idrogeno immessa nel tank durante la simulazione ha un andamento pressoché identico anche per il fatto che i grafici della portata massica sono molto simili. Anche i valori finali di riempimento risultano molto vicini (circa 27 kg in Excel e 26,3 Kg in Amesim). Il valore da tenere come riferimento è quello in Amesim, in quanto la capacità totale del tank si attesta intorno ai 26,4 kg. La massa totale introdotta con le simulazioni Excel risulta al di sopra del massimo consentito per via delle solite semplificazioni al modello di cui abbiamo già parlato in precedenza.



**Figure 85/86 - Confronto grafici massa di H<sub>2</sub> nel tank (Excel-Amesim)**

## 4.4 Simulazione del processo con HTV nel circuito

Arrivato a questo punto ho iniziato a documentarmi ulteriormente sul contenuto della norma per ricercare se, all'interno degli allegati e degli approfondimenti, si potessero trovare alcuni grafici che rappresentassero l'andamento dei vari parametri durante il processo di rifornimento. All'interno dell'allegato riguardante il protocollo di rifornimento tramite metodo delle tabelle ho trovato un grafico che, per un rifornimento di tipo standard (quello descritto nel primo capitolo ovvero di categoria H70-T40, con  $T_{amb} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , capacità del CHSS = 49,7 L e pressione iniziale del CHSS = 10 MPa), forniva la seguente figura:



*Figura 87 – Curve tipiche del processo di rifornimento (norma SAE J2601)*

Osservando la *Figura 87* ho subito notato che ci sono due differenze nell'andamento dei grafici rispetto alla mia simulazione:

- 1) La prima differenza riguarda l'andamento della portata massica, espressa in g/s, in quanto nella mia simulazione si ottiene un profilo quasi lineare con il massimo in corrispondenza dell'inizio del processo ed il minimo al termine. Nel grafico della norma si può notare come la curva in verde, che rappresenta la portata massica, ha un profilo crescente nella prima parte, fino ad arrivare ad un valore massimo, che tende poi a scendere nella seconda parte.

- 2) Il secondo aspetto, che si nota facilmente, è il fatto che la pressione del tank (curva rossa tratteggiata) non segue fedelmente quella della rampa (curva azzurra tratto-punto), soprattutto nella prima parte della simulazione. Quest'ultima tende infatti inizialmente a discostarsi, per difetto, per poi avvicinarsi asintoticamente al valore stabilito dalla rampa.

Confrontandomi con il cliente e documentandomi in rete, ho appurato che per sistemi del genere, come quello dei tank ad idrogeno, che permettono di accumulare gas ad elevatissime pressioni, sono presenti in ingresso bombola delle particolari valvole, dette HTV (Hydrogen Tank Valve), che permettono di mantenere l'idrogeno a quella data pressione, evitando fuoriuscite di fluido.



*Figura 88 – Hydrogen Tank Valve (HTV)*

La costruzione di questo tipo di valvole risulta molto complessa: sono dotate di sistemi che, in caso di sovrappressione, permettono di depressurizzare in modo sicuro il tank attraverso una piccola valvola di sfiato ed hanno, inoltre, ulteriori piccole valvole che permettono di controllare il flusso all'interno nel tank, con l'obiettivo di evitare l'aumento incontrollato di pressione e temperatura.

Ricercando nella documentazione del cliente, ho trovato anche uno schema costruttivo di questa valvola HTV ma per i soliti motivi di privacy non mi è permesso mostrarlo ed entrare ancor di più nello specifico.

In generale, però, posso dire che, per via della sua costruzione e del suo funzionamento all'interno del circuito, si comporta come un gruppo di due strozzatori in serie che, ovviamente, introducono delle perdite di carico aggiuntive nel circuito.

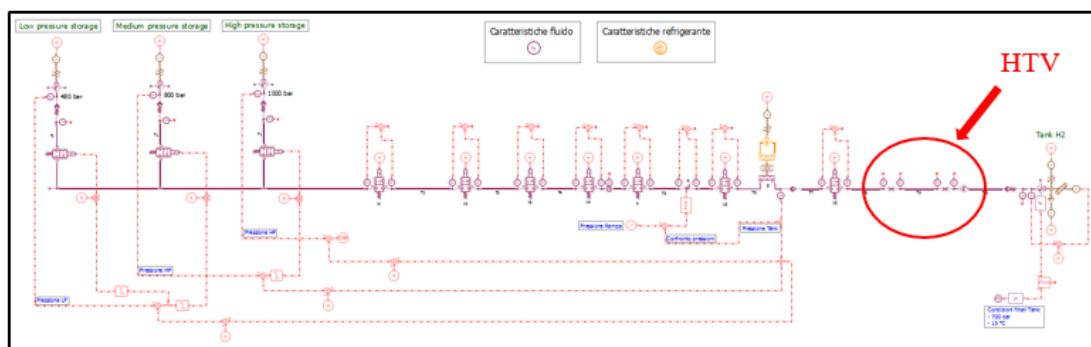
Per effettuare quindi una simulazione che fosse il più possibile fedele alla realtà ho pensato di modificare il circuito idraulico, presente in Amesim, per verificare se questa modifica potesse portare a cambiamenti sull'andamento dei parametri di simulazione.

#### 4.4.1 Modifica del circuito idraulico

Il primo passo per realizzare la nuova simulazione in Amesim, è stato dunque quello di modificare il circuito, con l'obiettivo di simulare la presenza della valvola HTV. Attraverso lo schema della valvola fornitomi dal cliente, ho potuto notare che il comportamento di quest'ultima può essere correlato, in Amesim, a quello di due strozzatori in serie, con un determinato valore della sezione di passaggio e di  $K_v$ .

Ho quindi riportato questa modifica all'interno del circuito idraulico ed oltre a questo, su suggerimento del cliente, ho spostato il punto di lettura della pressione, utilizzato per far rispettare la relativa rampa, dal tank ad una zona che si trova a monte dell'HTV. Per questo motivo ho modificato nuovamente il circuito, prelevando la pressione appena dopo lo scambiatore di calore, che si trova a monte della valvola HTV.

Il circuito risulta quindi riadattato per la nuova configurazione e pronto per essere simulato.

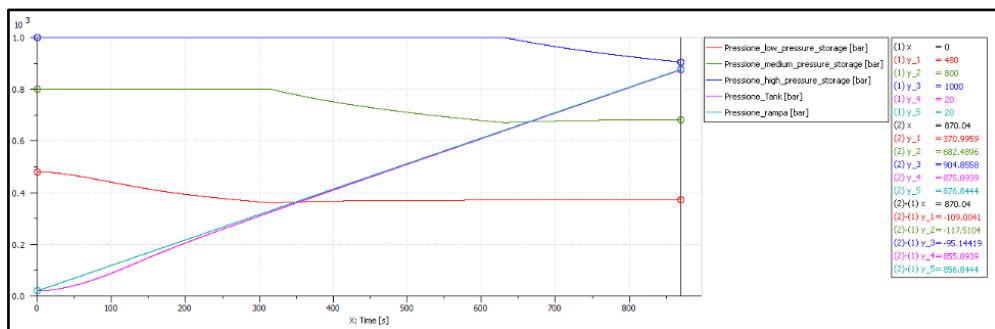


*Figura 89 – Schema del circuito modificato in Amesim*

#### 4.4.2 Analisi dei risultati della nuova configurazione

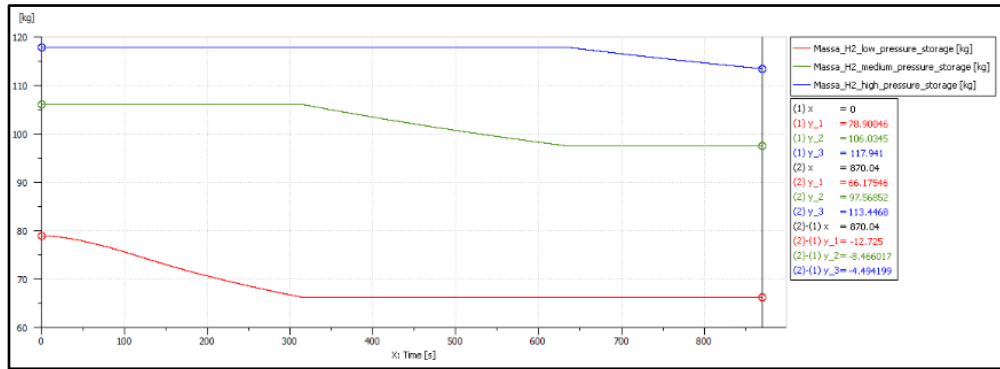
Terminato il processo di simulazione, ho nuovamente analizzato i grafici nel post-processor per valutare le eventuali differenze con il modello precedente. Le grandezze analizzate sono state le stesse, tra cui:

- Andamento della pressione negli storage e nel tank: per quanto riguarda le pressioni degli storage non si notano particolari differenze, né per quanto riguarda l'andamento grafico, né sui valori. La variazione rispetto all'analisi del modello precedente è dovuta al fatto che tank e rampa hanno due pressioni differenti, almeno ad inizio simulazione. Il controllo della pressione non viene effettuato all'interno della bombola, anche perché è realmente difficile farlo, ma prima dell'HTV; ciò comporta che inizialmente la pressione del tank sia inferiore a quella della rampa. Questo è dato dal fatto che, dopo il pressostato di misura della pressione, sono presenti i due strozzatori in serie che provocano una perdita di carico.



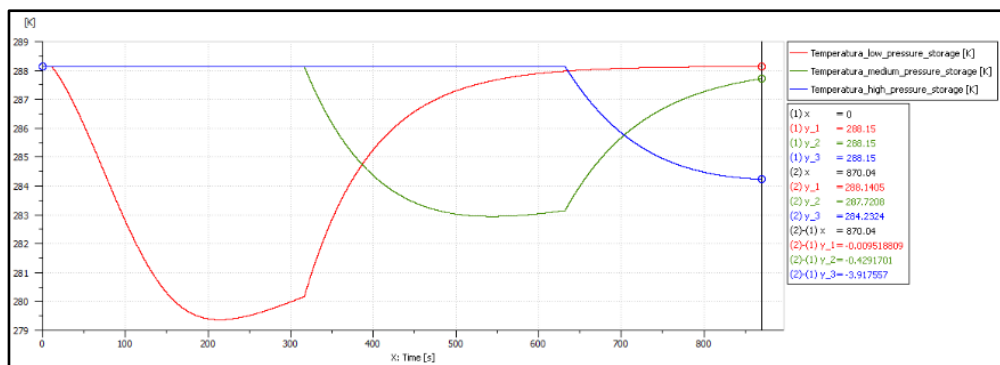
**Figura 90 – Andamento della pressione degli storage e del tank (nuova configurazione)**

- Andamento della quantità di  $H_2$  presente negli storage: la quantità di idrogeno in uscita dagli storage è pressoché la stessa della simulazione precedente, senza apprezzabili differenze.



**Figura 91 – Andamento della quantità di idrogeno presente negli storage (nuova configurazione)**

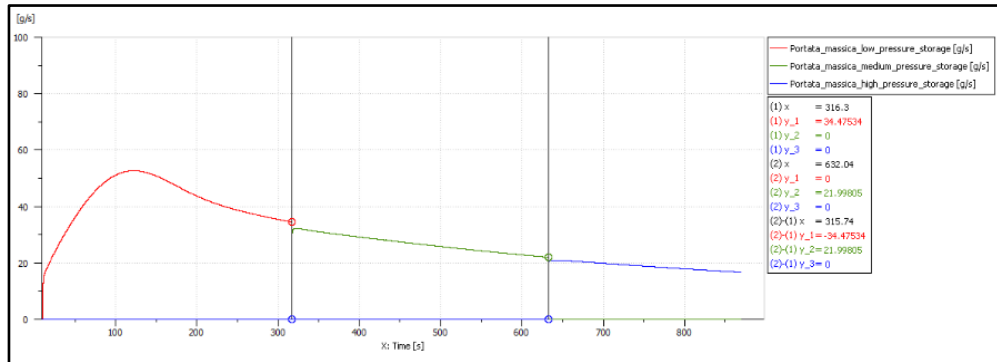
- Andamento della temperatura degli storage: accade lo stesso discorso fatto per la quantità di idrogeno in uscita dagli storage con i grafici che sono equivalenti a quelli della simulazione precedente.



**Figura 92 - Andamento della temperatura degli storage (nuova configurazione)**

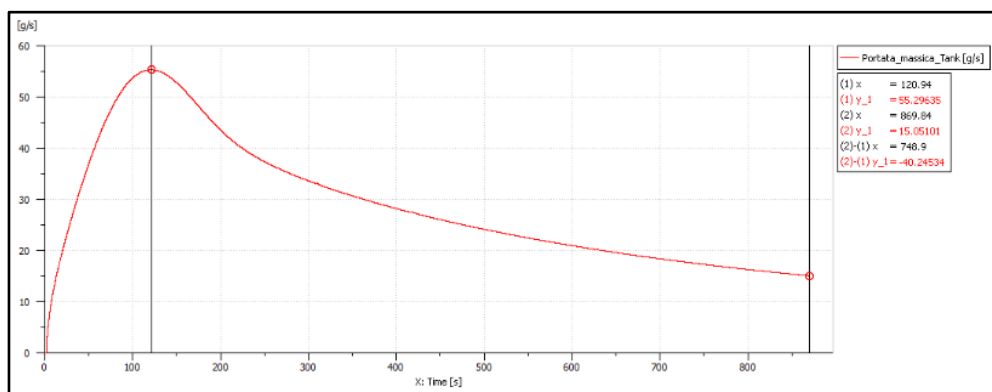
- Andamento della portata massica in uscita dagli storage: rappresenta il vero elemento che differenzia i due tipi di modelli analizzati. Nel precedente avevamo una portata che decresceva in modo lineare; in questa nuova simulazione, come poi accade in quella descritta dalla norma, la portata ha un andamento crescente nel primo tratto fino ad un massimo, intorno ai 53 g/s (quindi al di sotto del limite di 60 g/s imposto dalla norma), per poi decrescere in modo graduale, ma non lineare, fino al termine della simulazione. Anche in questo caso la portata fornita dagli storage risulta continua nel passaggio dall'uno all'altro.





**Figura 93 – Andamento della portata massica in uscita dagli storage (nuova configurazione)**

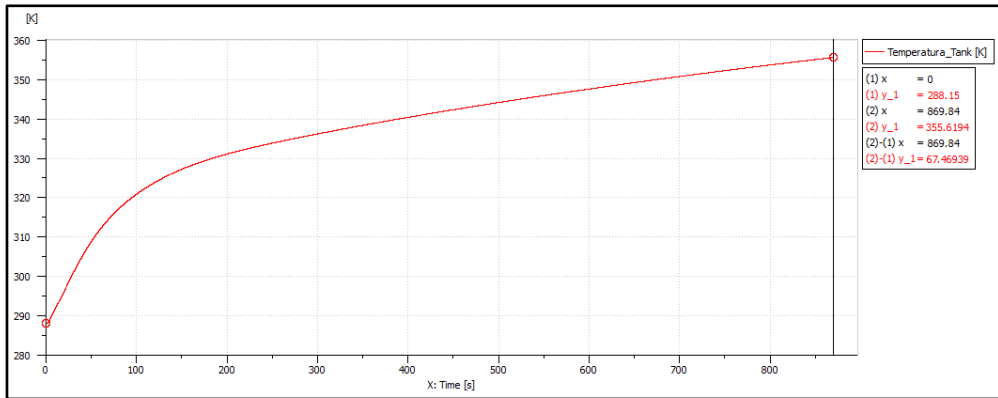
- Andamento della portata massica nel tank: in questo grafico ho riportato invece cosa accade, sempre per la portata massica, ma lato tank. L'andamento segue a grandi linee quello del precedente, anche se in questo caso naturalmente non si nota il passaggio da uno storage all'altro. Il picco massimo di portata si attesta intorno ai 55,3 g/s.



**Figura 94 - Andamento della portata massica di idrogeno in ingresso al tank (nuova configurazione)**

- Andamento della temperatura nel tank: anche la temperatura segue a grandi linee ciò che accadeva nel precedente modello. Il grafico risulta però più continuo, in quanto prima era presente una piccola discontinuità in corrispondenza del passaggio tra primo e secondo storage. Il livello di

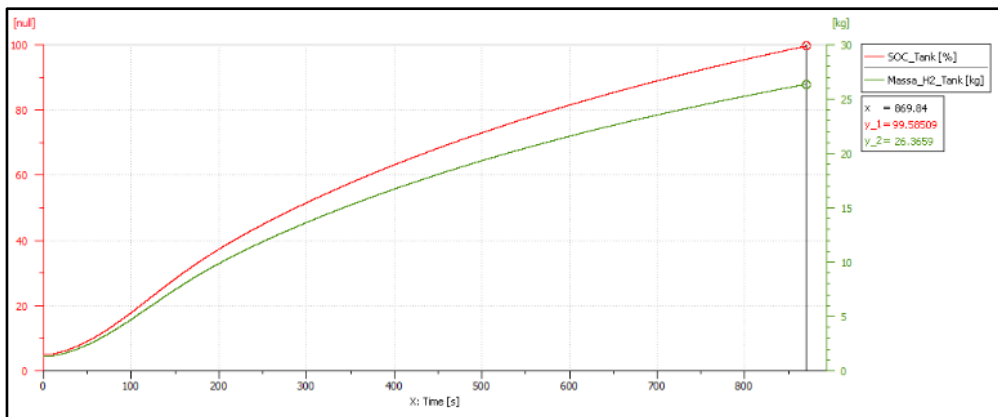
temperatura che viene raggiunto a fine simulazione risulta inferiore rispetto all'analisi precedente e pari a 355,62 °K, pari a 82,47 °C.



**Figura 95 - Andamento della temperatura del tank (nuova configurazione)**

- Andamento della quantità di idrogeno nel tank e SOC: il profilo differisce rispetto al modello precedente anche per il fatto che il grafico della portata massica risulta differente. La diversità è più evidente guardando alla prima parte del grafico.

Con questo nuovo modello di simulazione si ottengono anche migliori prestazioni di riempimento, testimoniate dal fatto che la massa di idrogeno finale nel tank è pari a 26,36 kg, con un SOC pari al 99,59%.



**Figura 96 – Andamento della massa di idrogeno nel tank e SOC (nuova configurazione)**

### 4.4.3 Confronto con i grafici ricavati da studi del cliente

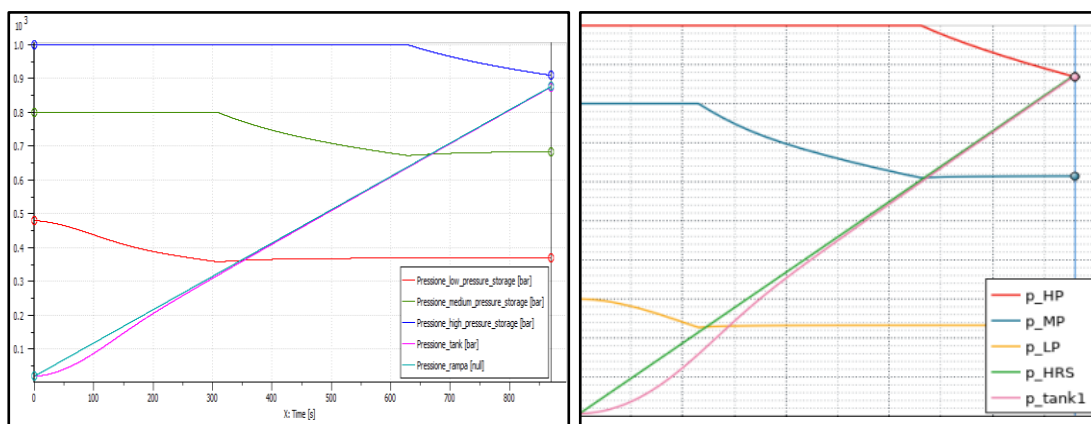
Come ultima parte di questo elaborato vorrei mettere a confronto i grafici ricavati attraverso le mie simulazioni con altri grafici che mi sono stati mostrati dal cliente come frutto di loro personali e precedenti studi sul processo di riempimento dei tank, con parametri a me sconosciuti.

I grafici che mi sono stati forniti dal cliente non indicano né unità di misura né i parametri di input utilizzati per la costruzione del modello di simulazione. Anche il circuito idraulico utilizzato per la simulazione, in linea di massima, potrebbe non essere lo stesso che ho implementato nelle mie simulazioni.

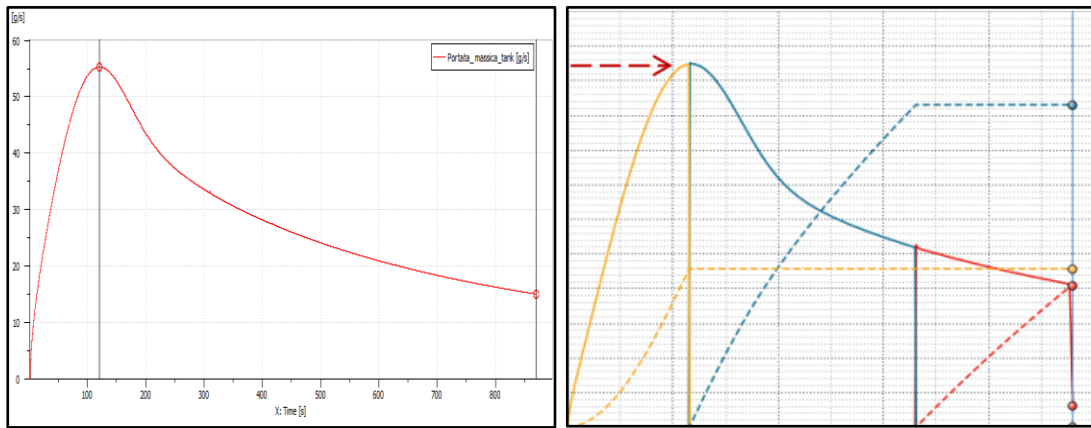
In questo ultimo paragrafo del mio elaborato vorrei confrontare quindi i risultati finali, ottenuti con l'ultima simulazione Amesim (quella in cui è presente l'HTV), con quelli forniti dal cliente. A prescindere dai valori dei parametri ricavati dal cliente, che come detto non sono presenti nei grafici e quindi non è possibile effettuare un confronto quantitativo, vorrei sottolineare la grande similitudine che c'è tra i due studi dal punto di vista qualitativo dei risultati.

Ciò sta a significare che il circuito in esame, che andrà poi realizzato fisicamente nel plant del cliente, risponde alle sue richieste in termini di andamento delle varie grandezze (pressioni di storage e tank, portata massica di idrogeno, quantità di  $H_2$  introdotta nel tank e temperatura finale del tank) e, come abbiamo già appurato, i valori ottenuti sono consoni a quanto stabilito dalla norma SAE J2601.

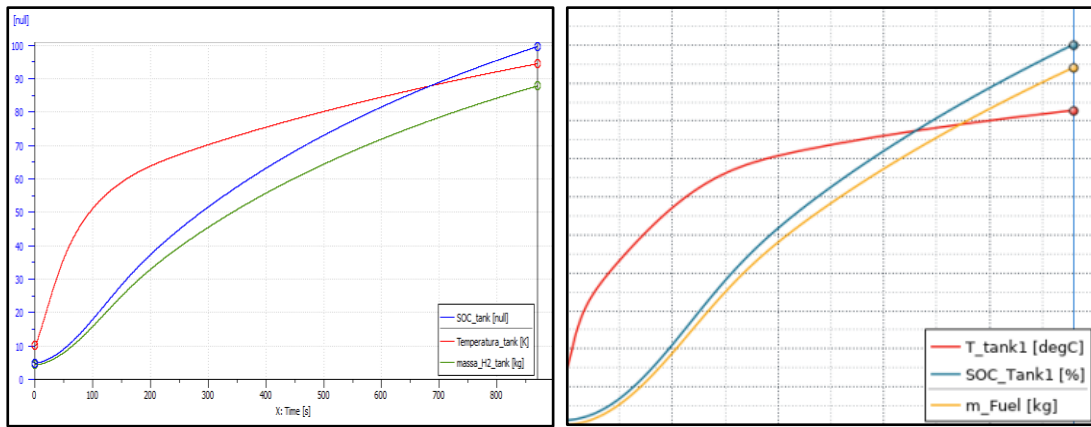
Le *Figure 97-98-99-100-101-102* mostrano, a due a due, il confronto tra i grafici in questione.



*Figure 97/98 – Confronto grafici pressioni (Amesim/Cliente)*



**Figure 99/100 - Confronto grafici portata massica al tank (Amesim/Cliente)**



**Figure 101/102 - Confronto grafici temperatura e SOC (Amesim/Cliente)**

Come si può notare dalle figure precedenti, i grafici rappresentanti le pressioni di storage/tank, i profili di portata massica, la quantità di idrogeno fornita e la temperatura del tank hanno lo stesso identico andamento, a giustificazione del fatto che la linea di test, seguendo le specifiche del cliente, riesce ad ottenere effettivamente i risultati auspicati nel riempimento del tank.



## CONCLUSIONI

Lo studio condotto in questo elaborato si proponeva come obiettivo quello di valutare le prestazioni di una linea di test per la ricarica di tank ad idrogeno nell'ottica di verificare se i parametri ottenuti fossero in linea con quanto prescritto dalla norma SAE J2601.

A tal punto, dopo aver predisposto il circuito idro-pneumatico all'interno del quale far fluire l'idrogeno, il focus del progetto si è spostato sulla valutazione degli effetti e dei fenomeni ai quali è vincolato l'idrogeno nel passaggio dai serbatoi di stoccaggio (*storage*), presenti in una qualsiasi stazione di rifornimento, fino al tank finale, collocato all'interno del veicolo. La ricerca ha portato a considerare i differenti aspetti che influenzano la ricarica delle bombole e sono stati quindi inizialmente introdotti all'interno di fogli di calcolo Excel per valutare i risultati ottenuti, in termini di pressioni e temperature, al termine del processo di riempimento.

Lo sviluppo in Amesim ha consentito quindi di validare ed approfondire l'analisi della carica, verificando la bontà delle simulazioni Excel ed ottenendo dei risultati finali in accordo a quanto stabilito della norma.

Il confronto finale con i grafici forniti dal cliente ha poi dimostrato come il processo di rifornimento analizzato conduca effettivamente a ciò che il cliente si aspettava inizialmente, prima della costruzione del modello.

Il fatto di ottenere andamenti grafici delle grandezze di interesse del tutto speculari a quelli del cliente e che hanno valori finali contenuti entro i limiti stabiliti dalla normativa vigente testimonia che la linea di test può effettivamente essere realizzata fisicamente ed assolvere al suo compito nel modo ottimale.

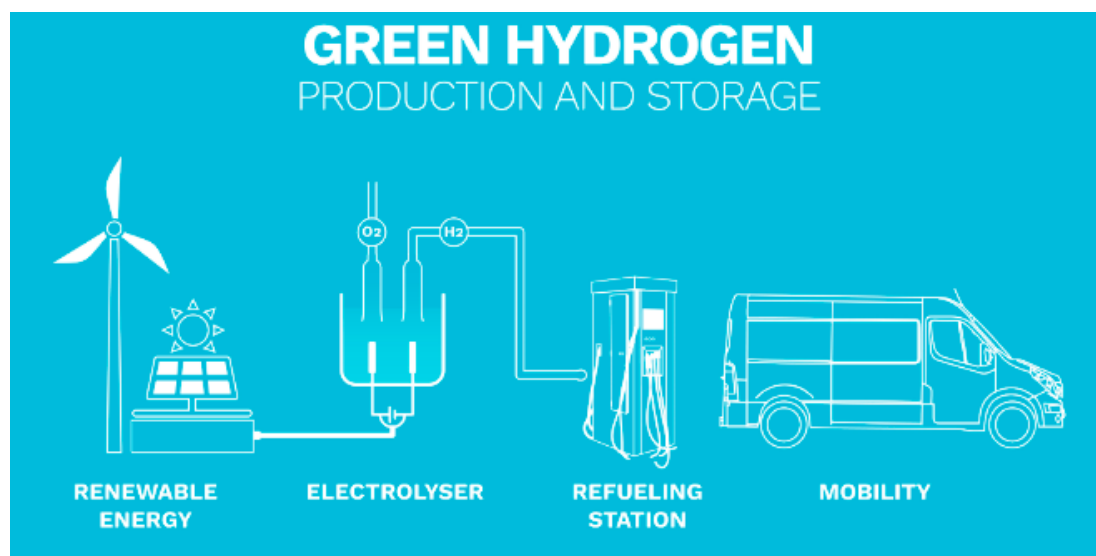
Sarà poi compito del cliente valutare come cambiano le prestazioni di riempimento variando i parametri di input (valutando se effettivamente le differenze che si

riscontrano siano in linea con quelle che ho personalmente appurato attraverso le simulazioni).

Possiamo quindi dire che i risultati ottenuti tramite questo studio confermino il fatto che sia possibile ricaricare bombole ad idrogeno, anche di grandi dimensioni, in tempi congrui ed in sicurezza.

Naturalmente lo sviluppo tecnologico consentirà, negli anni a seguire, di migliorare le prestazioni del processo di ricarica per via del fatto che il progredire della tecnologia di costruzione dei tank consentirà di accumulare, a pressione superiore, una maggiore quantità di idrogeno al loro interno ed in tempi molto più veloci (con rampe di pressione di maggiore entità).

Per questo motivo sono personalmente convinto che la propulsione ad idrogeno, nonostante attualmente presenti ancora dei limiti, possa essere nei prossimi anni una valida alternativa all'elettrico per cercare di garantire, a livello mondiale, una mobilità del tutto "green" (senza l'utilizzo di combustibili fossili).



*Figura 103 – Ciclo dell'idrogeno: dalla produzione alla propulsione*





# BIBLIOGRAFIA

Ing. Buro J. P. Hasebrink, *Fondamenti di pneumatica Volume 1*, Mannesmann Rexroth Pneumatik GmbH

P. Drexler, H. Faatz, F. Feicht, H. Geis, J. Morlok, E. Wiesmann, *Progetto e realizzazione degli impianti oleodinamici Volume 3*, Mannesmann Rexroth GmbH

Ulisse Belladonna, Angelo Mombelli, *Elementi di pneumatica*, Hoepli

Guido Belforte, Andrea Manuello Bertetto, Luigi Mazza, *Pneumatica*, Tecniche nuove

Fabrizio Cerri, *Tecnologie pneumatiche*, Hoepli

Massimiliano Eberini, *Automazione Pneumatica*, Tecniche nuove, Festo

Marco Alverà, Ferruccio De Bortoli, *Rivoluzione idrogeno (la piccola molecola che può salvare il mondo)*, Mondadori

Fouad A. S. Soliman, Hamed I. E. Mira, Karima A. Mahmoud, *Idrogeno verde*, Sapienza

Umesh N. Karleker, Rahul K. Kamble, *Idrogeno, l'energia di domani*, Sapienza

Cataloghi fornitori (Atlas Copco, Maximator, Nuova General Instruments, Tescom, Kelvion)