



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Progettazione dell'impianto sperimentale a litio fluente Lifus 6

*A. Aiello, A. Tincani, S. Nitti, L. Sansone, M. Muzzarelli, G. Fasano*

## PROGETTAZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE A LITIO FLUENTE LIFUS 6

A. Aiello, A. Tincani, S. Nitti, L. Sansone, M. Muzzarelli, G. Fasano (ENEA)

Novembre 2011


Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Fusione nucleare: Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER, denominate "Broader Approach"

Responsabile Progetto: Aldo Pizzuto, ENEA


	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. <b>L</b>	Pag. 1 di 21
					Allegato n. di

## Sommario

INTRODUZIONE .....	2
Lay out dell'impianto .....	2
Progettazione dell'impianto .....	4
Dimensionamento termico.....	4
Verifica della coibentazione .....	4
Verifica delle dispersioni termiche .....	5
Verifica del tempo di pre-riscaldamento .....	5
Valutazione della fluidodinamica del circuito .....	6
Calcolo delle perdite di carico .....	6
Progetto meccanico .....	13
Analisi termomeccanica.....	13
Progettazione della sezione di prova .....	17
Strumentazione.....	18
Sistema di controllo.....	18
Conclusioni.....	18

### Indice delle figure

<a href="#">Figura 1: Schema generale dell'impianto</a> .....	3
<a href="#">Figura 2: andamento delle pressioni lungo il circuito</a> .....	12
<a href="#">Figura 3: curva caratteristica dell'impianto in funzione delle portate</a> .....	13
<a href="#">Figura 4: lay out generale dell'impianto</a> .....	20
<a href="#">Figura 5: circuito installato sul telaio di supporto</a> .....	21
<a href="#">Figura 6: dettaglio della sezione di prova</a> .....	22
<a href="#">Figura 7: insieme della sezione di prova</a> .....	22

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 2 di 21
					Allegato n. di

## INTRODUZIONE

La progettazione dell'impianto IFMIF richiede una approfondita conoscenza del comportamento dei materiali strutturali esposti al litio ad alta velocità. Tali condizioni si verificano nell'area dell'ugello di uscita del litio e della back plate del target.

ENEA si è pertanto fatta carico, dopo le esperienze condotte negli anni passati con l'impianto Lifus 3, di sviluppare un nuovo circuito a litio che consentisse di raggiungere prestazioni superiori sul piano idraulico.

In particolare i prerequisiti funzionali dell'impianto sono:

Temperatura in sezione di prova di 350°C;

Velocità in sezione di prova di almeno 16 m/s;

Disponibilità di prevalenza e attacchi per l'installazione di un sistema di purificazione e monitoraggio.

Al fine di semplificare la termoidraulica del sistema si è preferito adottare una temperatura unica per tutto l'impianto, realizzando quindi un circuito isoterma con classica geometria ad anello.

I principali parametri termoidraulici e la loro influenza sulla progettazione sono presentati nel seguito.

## Lay out dell'impianto

Come detto, l'impianto ha una struttura ad anello il cui lay out è riportato in figura 1.

Sono identificabili due circuiti: il circuito a metallo liquido, con tubazioni da 1" e le linee gas interamente realizzate con tubazioni Swagelok da ½".

Il circuito a metallo liquido è caratterizzato dai seguenti componenti:

Pompa elettromagnetica prodotta dalla ditta GAAA modello IP 121. Punto di funzionamento ottimale con portata di 12 m<sup>3</sup>/h e prevalenza di 2.5 bar;

Valvola di regolazione pneumatica da 1";

Misuratore di portata tipo Vortex, modello Rosemount 8800;

Sezione di prova, nella quale vengono raggiunte le condizioni previste di velocità del fluido;

Misuratore di portata tipo Coriolis, Emerson Micro Motion DT65;

Linee in acciaio AISI 316 L da 1", scheda 40;

Serbatoio di stoccaggio.

Il circuito gas ha come scopo il mantenimento delle condizioni di sicurezza, e quindi di assenza di ossigeno ed acqua, in tutte le possibili condizioni di esercizio dell'impianto ed in particolare nelle fasi di caricamento e drenaggio.

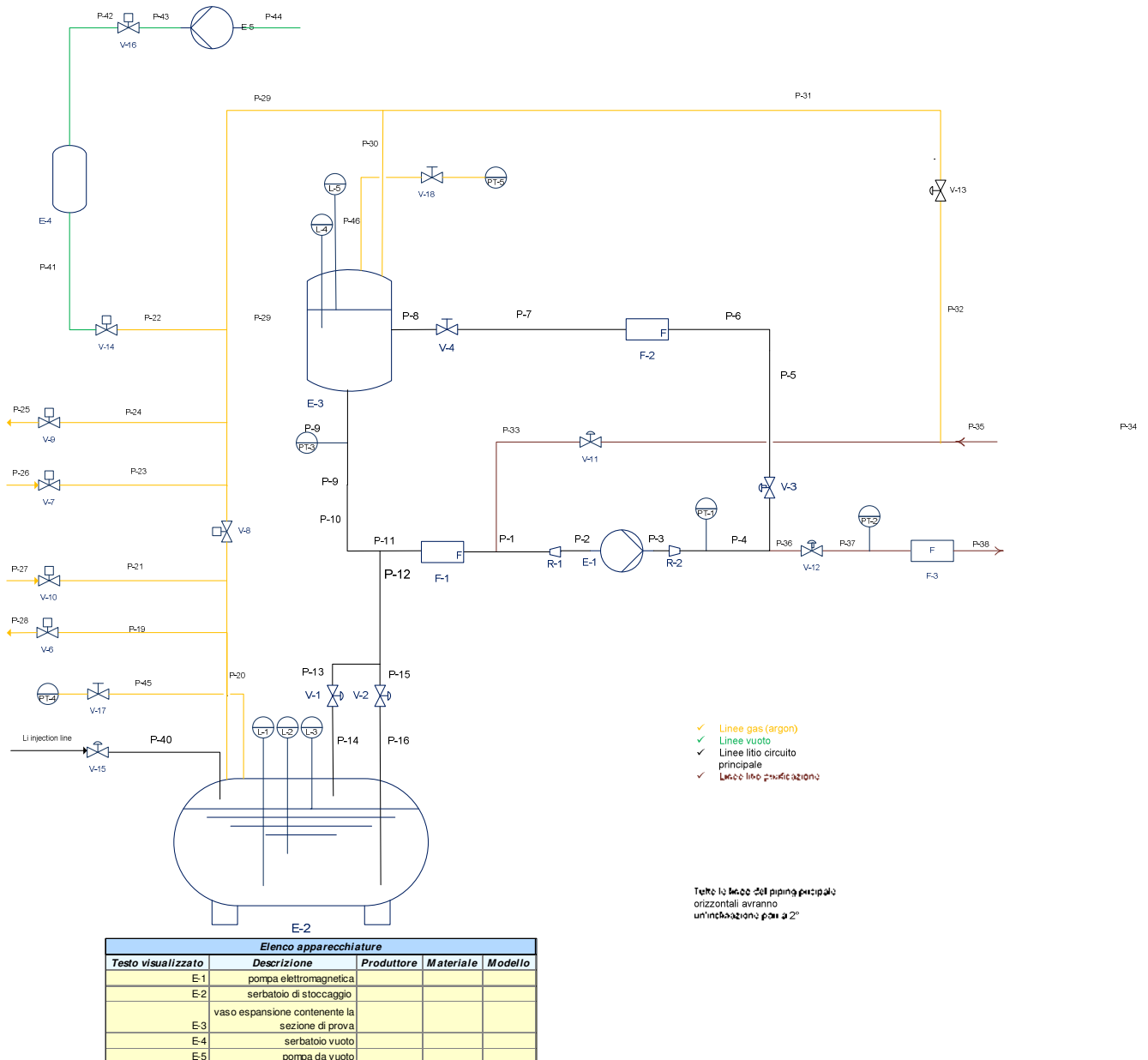



Figura 1: Schema generale dell'impianto

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 4 di 21
					Allegato n. di

L'intero circuito a metallo liquido è elettricamente tracciato e coibentato per garantire la temperatura di funzionamento di 350°C.

## Progettazione dell'impianto

### Dimensionamento termico

Come detto, l'impianto è interamente tracciato elettricamente per garantire la temperatura di esercizio di progetto e prevenire il congelamento del metallo liquido nel circuito in qualsiasi possibile condizione ordinaria ed accidentale.

Il dimensionamento termico dell'impianto ha l'obiettivo di calcolare/valutare:

- lo spessore della coibentazione in modo da garantire una temperatura di superficie esterna minore di 50°C;
- la potenza termica dissipata dalle linee del circuito metallo liquido durante il normale esercizio;
- la potenza termica necessaria per il preriscaldamento delle linee del circuito metallo liquido, assumendo una rampa di salita di 10°C/h;

### Verifica della coibentazione

La temperatura sulla superficie esterna è valutata attraverso la seguente correlazione di scambio termico:

$$T_{se} = T_{si} - \frac{P_{th}}{S \cdot U^*}$$

Nella quale:

$$U^* = ((s_{acc} / k_{acc}) + (s_{coib} / k_{coib}))^{-1}$$

-  $P_{th}$  è la potenza termica scambiata complessivamente con l'esterno


-  $T_{si}$  è la temperatura di parete del tubo assunta uguale (condizione più gravosa e quindi conservativa) alla temperatura del fluido interno

La potenza scambiata con l'esterno è valutabile attraverso la seguente correlazione generale di scambio termico:

$$P_{th} = U \cdot S \cdot \Delta T$$

dove:

$$U = ((1/h_{est}) + (s_{acc} / k_{acc}) + (s_{coib} / k_{coib}))^{-1}$$

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 5 di 21
					Allegato n. di

$$S = \pi \times d_{est} \times h$$

$$\Delta T = (T_{si} - T_{amb})$$

Poiché l'intero impianto può essere assunto realizzato con tubazioni di uguale diametro, visto che la sezione di prova ha diametro solo leggermente superiore a quello della tubazione principale, la valutazione può essere svolta per l'intero impianto. Procedendo in maniera iterativa si ricava che lo spessore ottimale di coibente per rispettare la prescrizione sulla temperatura esterna di 50°C è di 70 mm.

### Verifica delle dispersioni termiche

La potenza termica dispersa nell'ambiente è valutata secondo la correlazione generale riportata nel paragrafo precedente. Tale valore è stato ricalcolato considerando la temperatura ambiente pari a 10 °C, temperatura difficilmente raggiunta nel locale nel quale verrà posto l'impianto, ma che garantisce condizioni conservative.

Per unità di lunghezza del tubo si ha una superficie scambiante di circa 0.5 m<sup>2</sup>.

Supponendo che la superficie sia a 50°C e l'aria costantemente a 10°C si può assumere, semplificando, che per unità di lunghezza di tubo si abbia una dispersione di 95 W. Questo valore rappresenta la potenza minima che occorrerà fornire al tubo, per unità di lunghezza, per mantenere la temperatura, alla superficie del coibente, di 50°C con una temperatura alla superficie del tubo di 350°C.

In realtà, al fine di operare nelle massime condizioni di sicurezza e di ridurre il rischio di rottura dei cavi, i cavi scaldanti saranno posati in modo da garantire una potenza per metro di tubo di almeno 120 W, limitando quindi la potenza necessaria a compensare le dispersioni al di sotto del 90% di quella disponibile.

### Verifica del tempo di pre-riscaldamento

Il pre-riscaldamento su tutte le linee e componenti dell'impianto ha lo scopo di evitare la solidificazione del litio durante la fase di riempimento del circuito stesso.

Per valutare il tempo necessario si effettua il seguente bilancio energetico:


$$t = \frac{M_i \cdot c_p \cdot (T_f - T_a)}{P_{elet,i} - P_{disp,i}}$$

dove

$M_i$  è la massa dell'-iesimo tratto

$c_p$  è il calore specifico dell'acciaio = 460 J/Kg °C

$T_f$  è la temperatura finale da raggiungere = 350°C

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 6 di 21
					Allegato n. di

$T_a$  è la temperatura ambiente = 10 °C

$P_{elet. i}$  è la potenza installata su un tratto di lunghezza unitaria;

$P_{disp. i}$  è la potenza dispersa da un tratto di lunghezza unitaria.

Si ottiene pertanto che, utilizzando completamente la potenza installata sui tubi, il tempo di preriscaldamento è di circa 5 ore e 45 minuti, corrispondente ad una rampa di quasi 70°C/h. Poiché per limitare le sollecitazioni termiche sull'impianto e garantire un tempo di preriscaldamento uniforme, si vuole adottare una rampa di salita di 10°/h, la potenza termica disponibile consente di avere tempi di preriscaldamento di gran lunga inferiori a quanto imposto.

## Valutazione della fluidodinamica del circuito

### Calcolo delle perdite di carico

Le perdite di carico sono state valutate mediante la relazione:

$$\Delta p = K \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

In cui:

$$K = f_M \frac{L}{D} + K_r + K_a + K_c + K_T \quad (2)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_M}} = -2 \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f_M}} \right) \quad (3)$$

(Relazione di Colebrook)

$$\text{Re} = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} \quad (4)$$

$K$  → Coefficiente totale delle perdite di carico

$f_M$  → Coefficiente di perdite di carico distribuite


$K_r$  → Coefficiente delle perdite di carico per restringimenti = 0.5

$K_a$  → Coefficiente delle perdite di carico per allargamenti = 1

$K_c$  → Coefficiente delle perdite di carico per curvature = 0.75







	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 8 di 21
					Allegato n. di

						perd.	
Curva C1			$\Delta p$	[Pa]	8,6605E+01	kc1	0,49435
Curva C2			$\Delta p$	[Pa]	8,6605E+01	kc2	0,49435
Curva C3			$\Delta p$	[Pa]	8,6605E+01	kc3	0,49435
Curva C4			$\Delta p$	[Pa]	8,6605E+01	kc4	0,49435
Curva C5			$\Delta p$	[Pa]	8,6605E+01	kc5	0,49435
Curva C6			$\Delta p$	[Pa]	8,6605E+01	kc6	0,49435
Curva C7			$\Delta p$	[Pa]	8,6605E+01	kc7	0,49435
Curva C8			$\Delta p$	[Pa]	8,6605E+01	kc8	0,49435
Curva C9			$\Delta p$	[Pa]	8,6605E+01	kc9	0,49435

Valori assunti per i parametri fisici nei diversi punti del sistema					
	P [Pa]	T [°C]	$\rho$ [ kg/m3]	Intern. Diameter [m]	Velocity [m/s]
Point 1	4,0000E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 2	3,9997E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 3	3,9984E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 4	3,9978E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 5	3,9969E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 6	3,9965E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 7	3,9962E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 8	3,9951E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 9 di 21
					Allegato n. di

Point 9	3,9913E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 10	3,9890E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 11	3,9881E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 12	3,9874E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 13	3,9866E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 14	3,9861E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 15	3,8861E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 16	3,8857E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 17	3,8848E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 18	3,8846E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 19	3,8837E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 20	3,8832E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 21	3,8823E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 22	3,8821E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 23	3,8812E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 24	3,8808E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 25	3,8799E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 26	3,8796E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 27	3,7637E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372
Point 28	3,7636E+05	350,00	499,85	0,02664	0,8372

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. <b>L</b>	Pag. 10 di 21
					Allegato n. di



Dai valori ottenuti per le perdite di carico nei diversi tratti di circuito, e nota la caratteristica idraulica della pompa, è possibile rappresentare l'andamento della pressione nell'impianto (fig. 2):

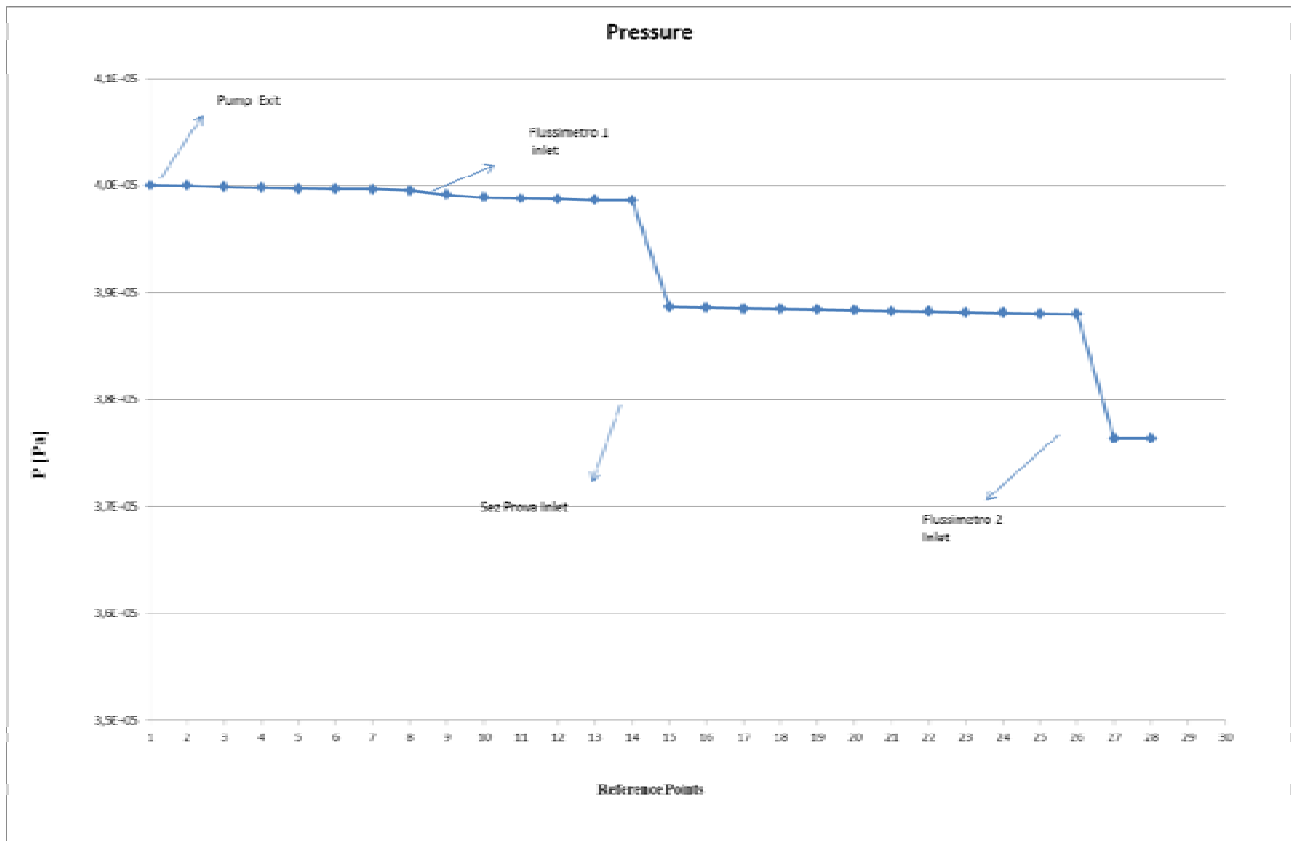



Figura 2: andamento delle pressioni lungo il circuito

Inoltre, si può determinare la curva caratteristica dell'impianto in funzione della portata (fig. 3):

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. <b>L</b>	Pag. 13 di 21
					Allegato n. di

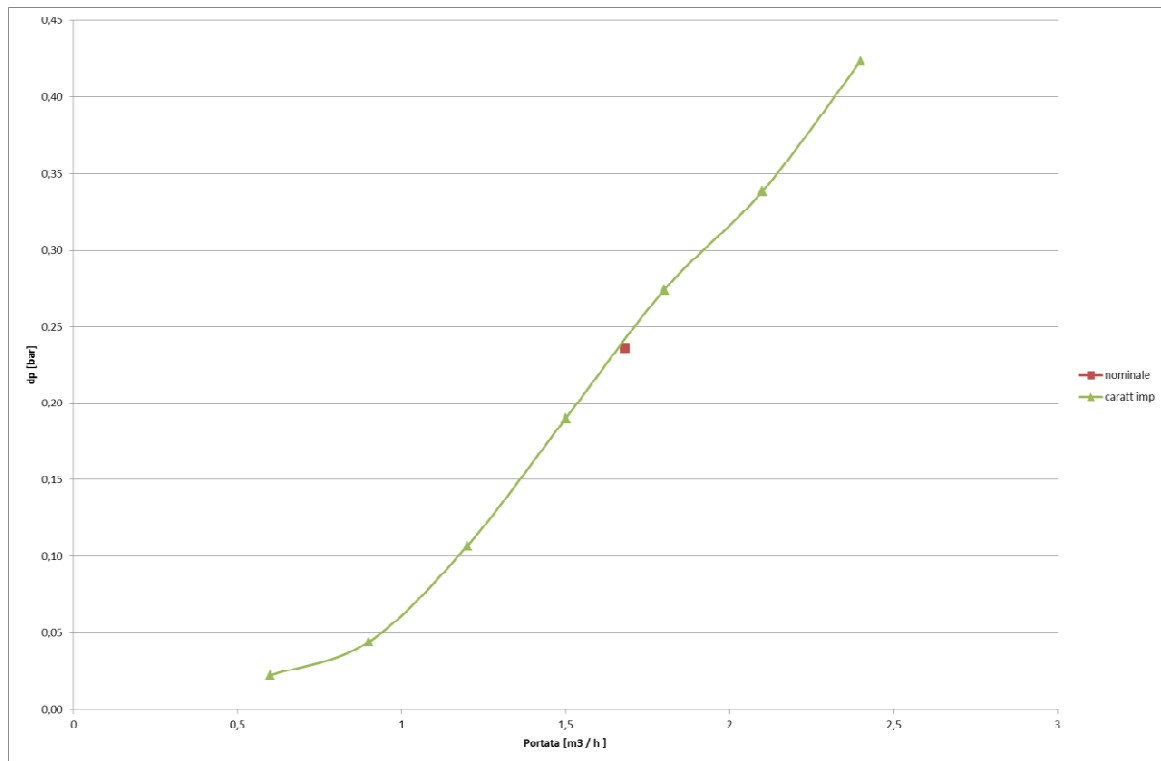


Figura 3: curva caratteristica dell'impianto in funzione delle portata

Dalle curve sopra riportate è in particolare evidente che, per operare l'impianto in condizioni stabili sarà necessario aggiungere delle perdite di carico operando sulla valvola di regolazione al fine di incrementare le perdite di carico.


## Progetto meccanico

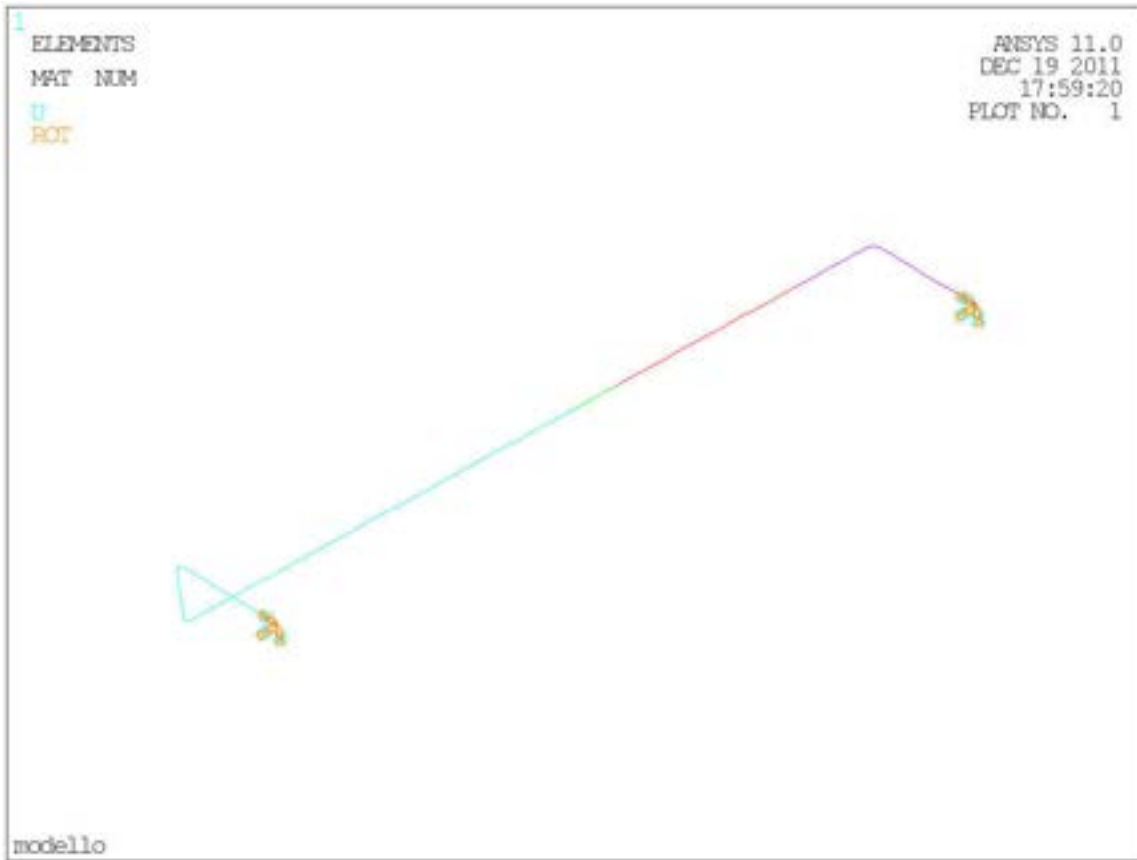
Lo schema di impianto è riportato in fig.4, mentre in fig. 5 l'impianto è rappresentato installato sul telaio di supporto.

### Analisi termomeccanica

Gli unici punti fissi dell'impianto sono rappresentati dalla pompa e dal serbatoio di stoccaggio. Pertanto le tubazioni sono libere di dilatarsi, e le sollecitazioni meccaniche sono trascurabili.

La verifica delle sollecitazioni è stata eseguita utilizzando il software Ansys.


	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. <b>L</b>	Pag. 14 di 21
					Allegato n. di



Materiale : AISI 316 STEEL

TEMPERATURE [°C]	EXPANSION COEFFICIENT [1/°C 10 <sup>-6</sup> ]	YOUNG MODULUS [GPa]	POISSON
25	15.97	192.0	0.3
100	16.40	185.9	0.3
200	16.95	177.7	0.3
300	17.45	169.6	0.3
400	17.91	161.4	0.3
500	18.33	153.3	0.3
600	18.17	145.2	0.3



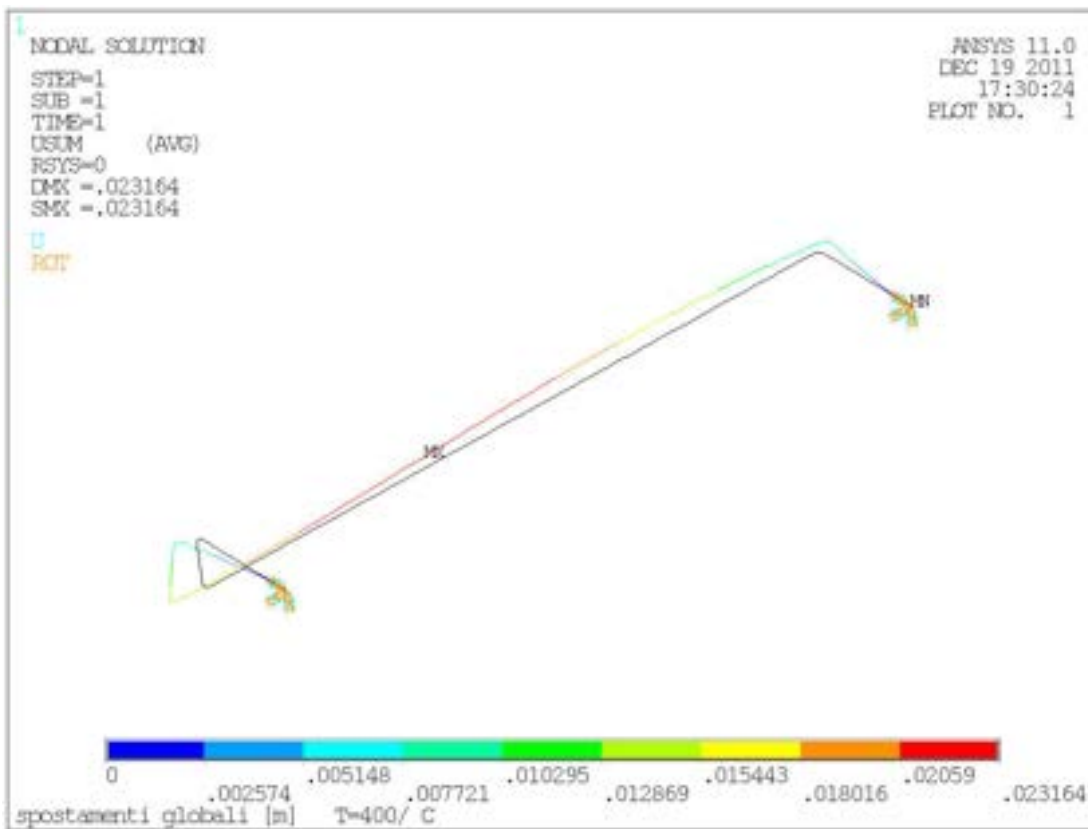
	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. <b>L</b>	Pag. 15 di 21
					Allegato n. di

Vincoli all'estremità del modello: tutti gli spostamenti e le rotazioni sono nulle.


Risultati alla temperatura di progetto di 400 °C :

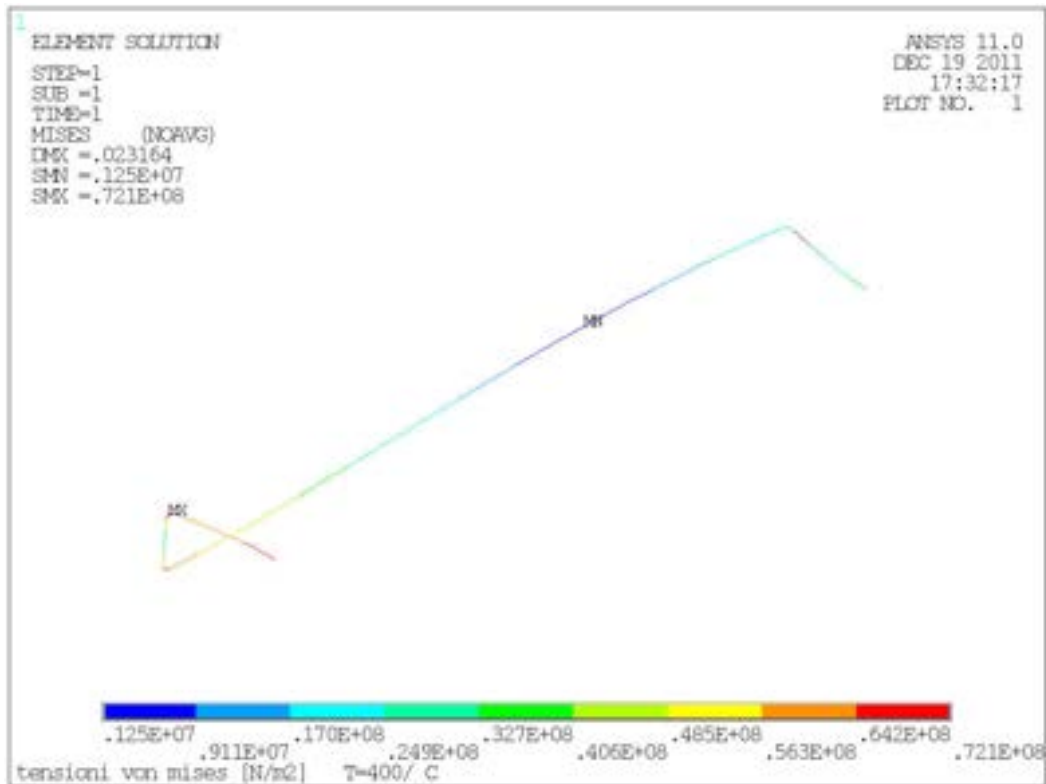
Nell'immagine seguente gli spostamenti sono amplificati di un fattore 10 e lo spostamento globale tiene conto degli spostamenti secondo gli assi cartesiani [  $S = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$  ]<sup>0.5</sup>.

Lo spostamento massimo è di 23 mm quasi a metà del tubo più lungo.

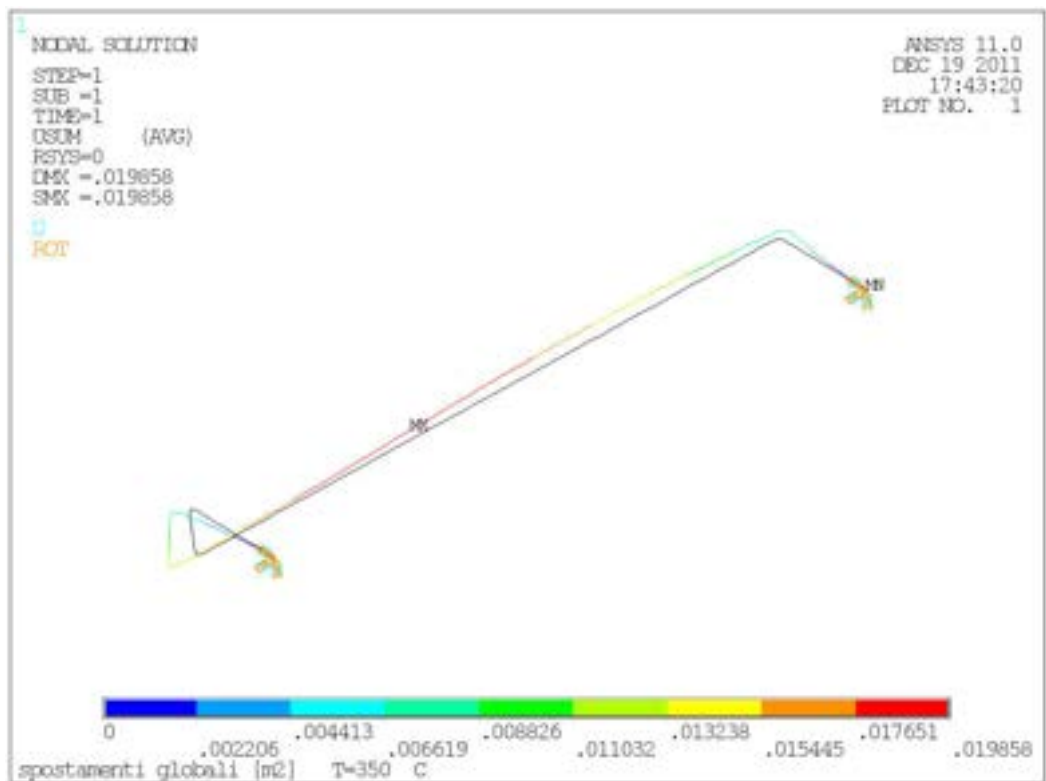


La struttura è più sollecitata nei gomiti vicino alla sezione di prova con una tensione di 7.21 MPA


	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 16 di 21
					Allegato n. di

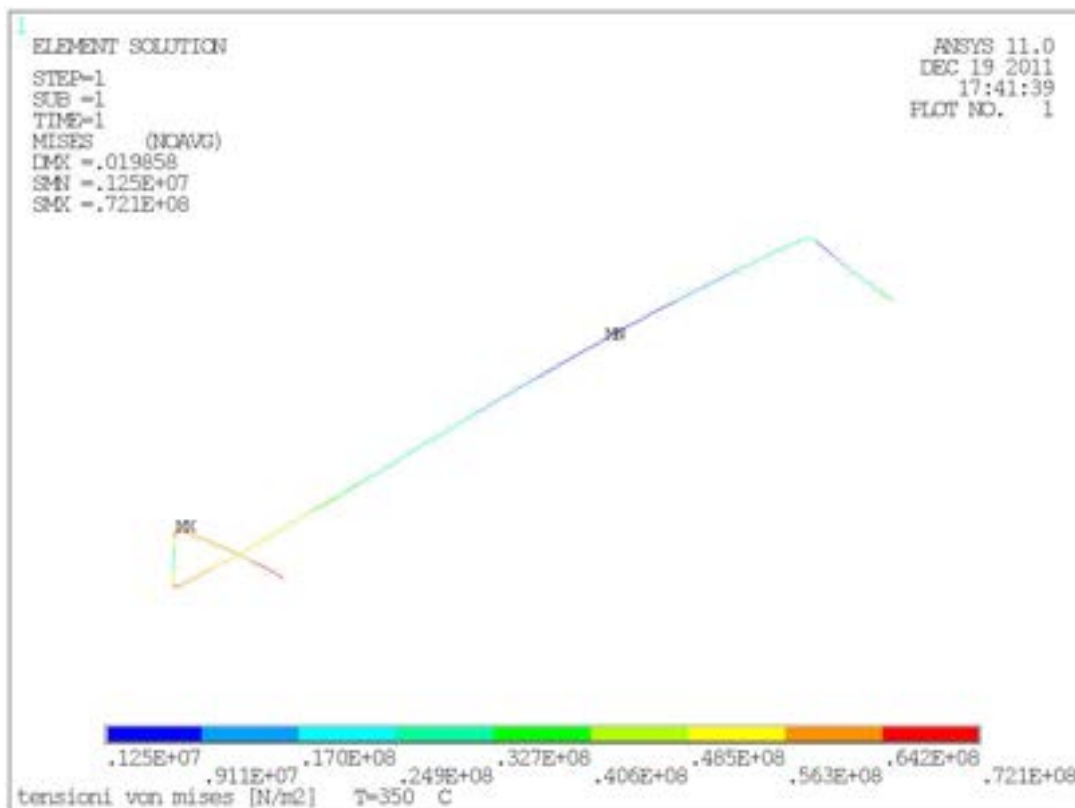


Risultati alla temperatura di esercizio di 350 °C : in questo caso lo spostamento massimo è di 19.8 mm



La sollecitazione massima è nei gomiti vicino alla sezione di prova con una tensione di 7.21 MPA. Risulta uguale alla prima poiché il modulo di Young cresce mentre il coefficiente d'espansione termica decresce.

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 17 di 21
					Allegato n. di




### Progettazione della sezione di prova

Per ciò che riguarda la sezione di prova, un dettaglio di questa è in fig. 6, mentre l'insieme è in fig. 7.

I provini hanno forma cilindrica e sono montati su un'asta a sua volta fissata nella parte superiore ad una flangia rimovibile, ed appoggiata nella parte inferiore ad un sistema di centraggio. In questo modo si realizza per il litio un meato di passaggio tale da portare al valore di velocità di progetto di 16 m/s. Il doppio ancoraggio dell'asta di supporto previene l'insorgere di vibrazioni in condizioni di flusso turbolento.

Per il diametro esterno dei provini su è adottata la misura di 16 mm, con foro centrale da 3 mm e altezza di 20 mm. Il canale che li ospita ha diametro di 34 mm, corrispondente ad un tubo da 1 ¼" standard. La parte superiore della sezione di prova, per una altezza di circa 100 mm, è riempita di Ar, in modo da prevenire qualsiasi contatto tra il litio e l'area di tenuta della flangia. Un doppio sensore di livello sarà installato nella sezione di prova per controllare eventuali salite accidentali di livello.

I provini potranno essere estratti drenando l'impianto, aprendo la flangia mantenendo il circuito in atmosfera inerte e rimuovendo l'asta porta campioni. Questa procedura garantisce una limitata contaminazione del circuito e la massima sicurezza per gli operatori, riducendo i tempi di fermo per le operazioni di sostituzione.

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. <b>L</b>	Pag. 18 di 21
					Allegato n. di

## Strumentazione

La strumentazione di impianto è costituita da:

- Termocoppie standard tipo K, montata alla superficie delle tubazioni o su passanti Conax in modo da essere immerse in litio (serbatoio e sezione di prova);
- Misuratore di portata Vortex modello Rosemount 8800, scala 0.08 – 2.7 m/s
- Misuratore di portata massico tipo Coriolis Micro Motion DT 65, scala 0-4086 kg/h
- Misuratori di pressione Gefran **IE2-S-6-M-B01D-4-4-D-0-0**, di tipo piezoelettrico, scala 0-10 bar
- Sensori di livello di tipo conduttivo

Tutta la strumentazione è idonea all'uso in litio, a temperature fino a 350°C, ed è fornita di uscita analogica o di tipo Modbus, escluse evidentemente le termocoppie, o digitale.

## Sistema di controllo

Il sistema di controllo si basa su prodotti National Instruments.

In particolare per il PLC si è fatto ricorso a moduli della famiglia CompactRIO in grado di garantire le prestazioni richieste.


Il sistema CompactRIO, oltre ad essere paragonabile allo standard di mercato Siemens S7 su piccoli sistemi quali Lufus6, in cui è richiesta la gestione di un numero limitato di punti, ha una semplicità di uso superiore potendo essere interamente programmato mediante NI LabView Real Time.

Il controllo sarà interamente da remoto, vista la possibilità di collegarsi al PLC mediante un indirizzo standard TCP-IP. Inoltre, così come accade su tutti i sistemi PLC, in caso di perdita della connessione di rete il sistema manterrà l'ultima configurazione impostata mantenendo la piena gestione delle situazioni di anomalia ed allarme.


## Conclusioni

La progettazione dell'impianto è stata completata, nel rispetto dei principali requisiti sperimentali. La notevole semplificazione impiantistica rispetto all'impianto Lufus 3 dovrebbe garantire una notevole affidabilità e continuità operative.

La sicurezza dell'impianto e degli operatori è stata tenuta nella massima considerazione, selezionando soluzioni, come per il montaggio e l'estrazione dei provini, che riducano al minimo la possibilità di contatti accidentali con il litio.

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. <b>L</b>	Pag. 19 di 21
					Allegato n. di

La flessibilità del sistema ed il notevole sovradimensionamento della pompa elettromagnetica consentiranno inoltre l'installazione e qualificazione di sistemi di purificazione e monitoraggio delle impurezze in via di selezione.

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. <b>L</b>	Pag. 20 di 21
					Allegato n. di

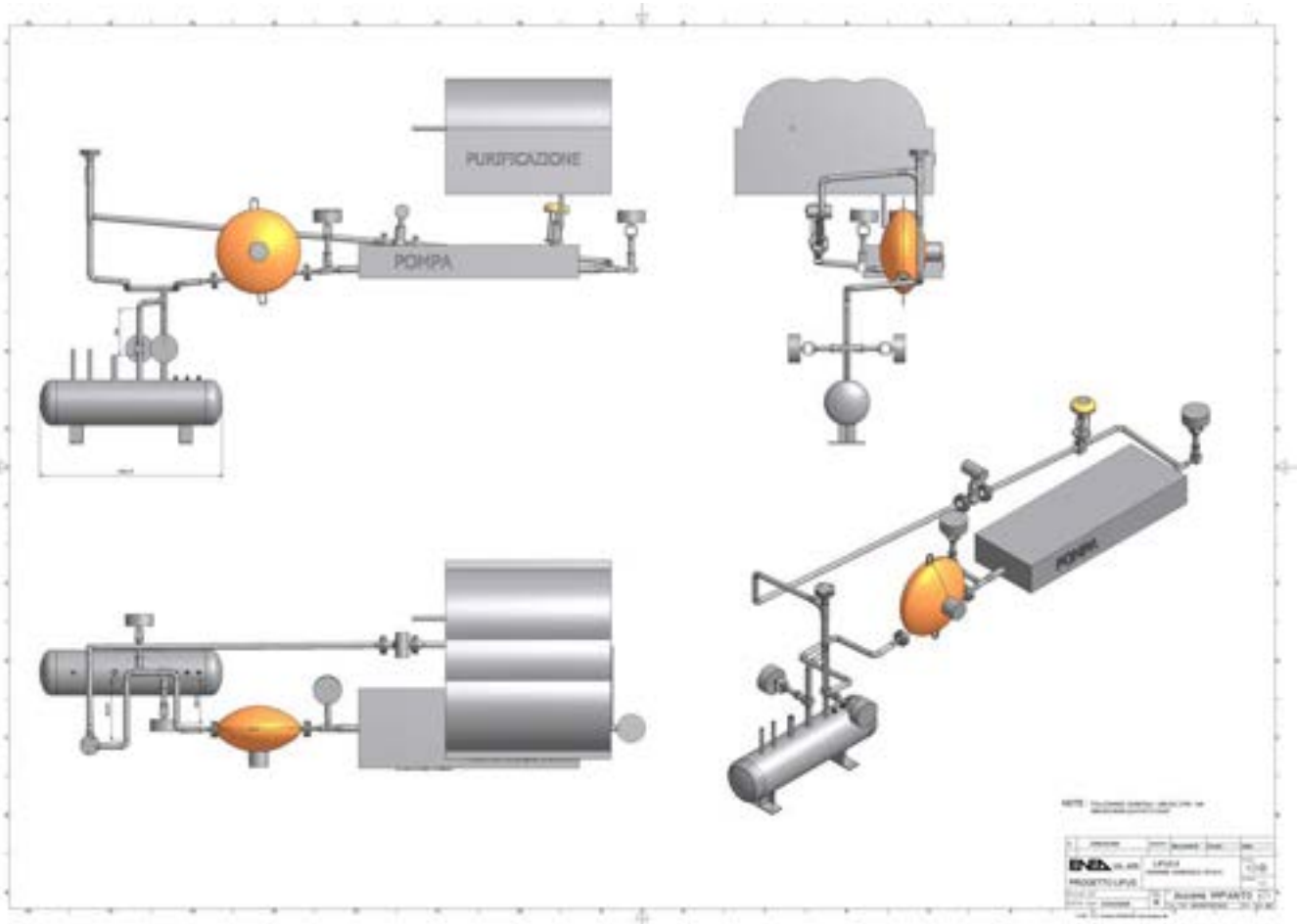



Figura 4: lay out generale dell'impianto

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione IMG-R-012	Rev. 0	Distrib. <b>L</b>	Pag. 21 di 21
					Allegato n. di

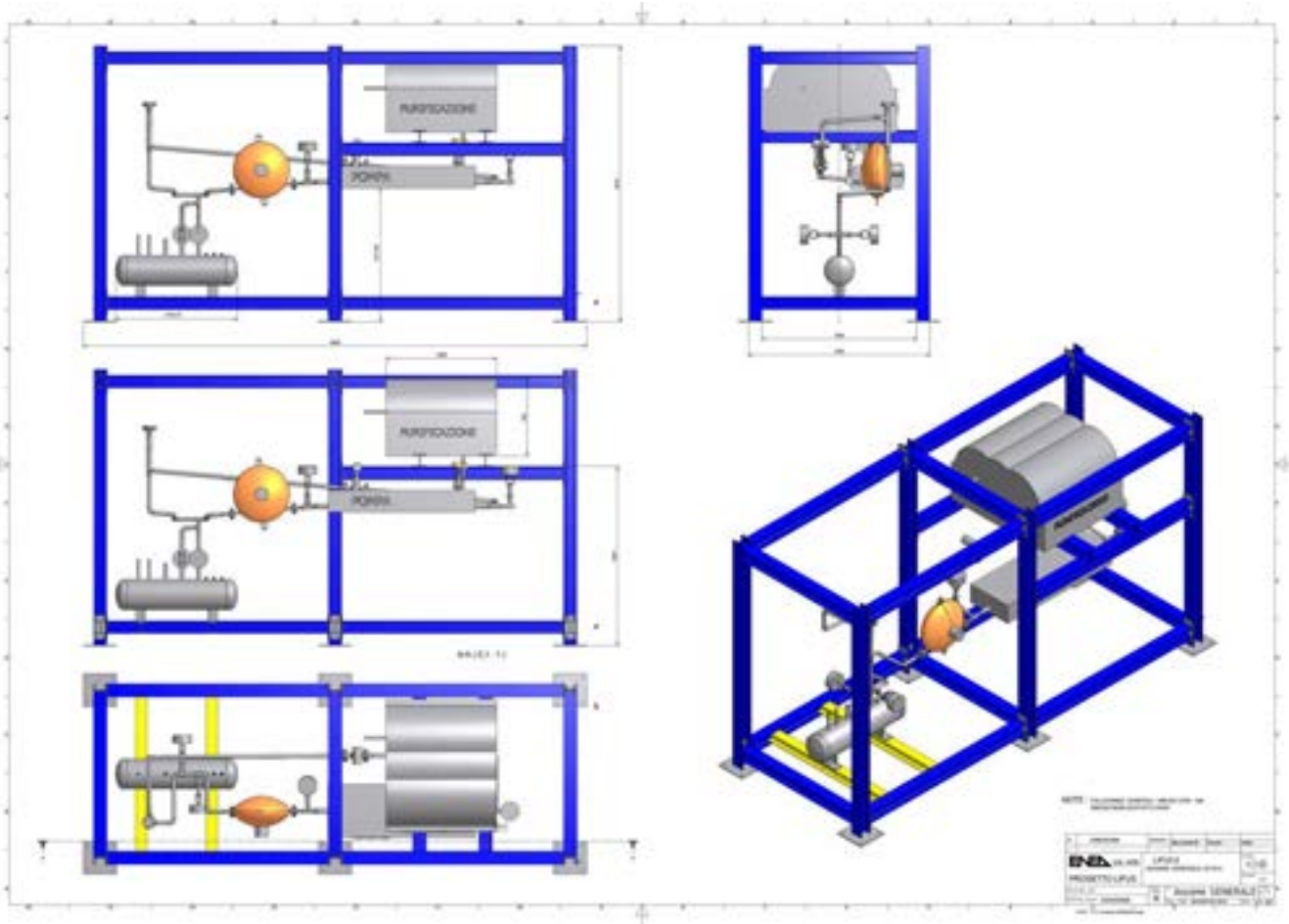


Figura 5: circuito installato sul telaio di supporto

