



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Attività propedeutiche per la messa in funzione di un impianto  
termoidraulico ad alta pressione per pretest su simulacri di  
componenti

*M. Cumo, A. Naviglio, F. Giannetti*



Report RdS/2011/227

ATTIVITÀ PROPEDEUTICHE PER LA MESSA IN FUNZIONE DI UN IMPIANTO TERMOIDRAULICO  
AD ALTA PRESSIONE PER PRETEST SU SIMULACRI DI COMPONENTI

M. Cumo, A. Naviglio, F. Giannetti – UNIROMA La Sapienza

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, Gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Nuovo nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in materia nucleare

Responsabile Progetto: Paride Meloni, ENEA



**CIRTEN**

**Consorzio Interuniversitario per la Ricerca TEcnologica Nucleare**

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA**

**“LA SAPIENZA”**

**Attività propedeutiche per la messa in funzione di un  
impianto termoidraulico ad alta pressione per pretest su  
simulacri di componenti**

**Autori**

**Prof. Maurizio Cumo**

**Prof. Antonio Naviglio**

**Ing. Fabio Giannetti**

**CERSE-UNIRM RL 1172/2011**

**ROMA, SETTEMBRE 2011**

Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP5 punto B1  
AdP MSE - ENEA “Ricerca di Sistema Elettrico” - PAR2008-09  
Progetto 1.3 – “Nuovo Nucleare da Fissione”.

# INDICE

1	Sommario .....	4
2	Impianto VAPORE .....	5
2.1	Informazioni generali sull'impianto VAPORE .....	5
2.2	Descrizione dell'attività oggetto del presente contratto .....	5
3	Modellazione dell'impianto VAPORE .....	6
3.1	Modello vapore .....	8
3.2	Modello liquido .....	11
3.3	Modellazione tratto di collegamento della valvola prototipo per vapore .....	12
3.4	Modellazione tratto di collegamento della valvola prototipo per liquido .....	14
3.5	Simulazione Valvola prototipo .....	14
4	Validazione dell'input con dati sperimentali .....	16
4.1	Nodalizzazione di validazione .....	16
5	Prove con impianto VAPORE .....	19
5.1	Prove con flusso di vapore saturo con valvola di back pressure totalmente aperta	19
5.1.1	Procedure operative .....	19
5.1.2	Andamento temporale della portata calcolata attraverso il prototipo .....	20
5.1.3	Andamento temporale della pressione calcolata all'ingresso del prototipo ....	20
5.1.4	Andamento temporale della pressione calcolata nel collettore di scarico da 20" 21	
5.1.5	Corsa VR 1.1 vs tempo .....	22
5.2	Prove con flusso di liquido inizialmente sottoraffreddato con valvola di back pressure totalmente aperta .....	23
5.2.1	Andamento temporale della portata calcolata attraverso il prototipo .....	23
5.2.2	Andamento temporale della pressione calcolata all'ingresso del prototipo ....	24
5.2.3	Andamento temporale della temperatura calcolate all'ingresso del prototipo	24
5.2.4	Andamento temporale della pressione calcolata nel collettore di scarico da 20" 25	
6	Risultati ottenuti .....	25
6.1	Prove con flusso di vapore saturo .....	25
6.1.1	Andamento temporale della portata calcolata attraverso il prototipo .....	26
6.1.2	Andamento temporale della pressione calcolata all'ingresso del prototipo ....	26
6.1.3	Andamento temporale della pressione nel collettore di scarico da 20" .....	27
6.1.4	Corsa VR 1.1 vs tempo .....	28
6.2	Prove con flusso di liquido inizialmente sottoraffreddato .....	28
6.2.1	Procedure operative .....	28
6.2.2	Andamento temporale della portata calcolata attraverso il prototipo .....	29
6.2.3	Andamento temporale della pressione calcolata all'ingresso del prototipo ....	29
6.2.4	Andamento temporale della temperatura calcolate all'ingresso del prototipo	30
6.2.5	Andamento temporale della pressione nel collettore di scarico da 20" .....	31

6.3	Prove con flusso bifase .....	31
6.3.1	Andamento temporale della portata calcolata attraverso il prototipo.....	32
6.3.2	Andamento temporale della pressione calcolata all'ingresso del prototipo ....	32
6.3.3	Andamento temporale della temperatura calcolata all'ingresso del prototipo	33
6.3.4	Andamento temporale del titolo di vapore all'ingresso del prototipo .....	34
6.3.5	Andamento temporale della pressione nel collettore di scarico da 20" .....	35
6.4	Modifica del lay-out dell'impianto .....	35
7	Conclusioni .....	37
8	Riferimenti .....	38

## Elenco figure

Figura 3-1	- Configurazione d'impianto dal pressurizzatore al collettore di prova, per vapore e per liquido .....	7
Figura 3-2	- Configurazione d'impianto dal collettore di scarico alla piscina di soppressione .....	7
Figura 3-3	- Nodalizzazione dal pressurizzatore al collettore di prova, per vapore.....	8
Figura 3-4	- Curva caratteristica valvola VR 1.1 .....	9
Figura 3-5	- Nodalizzazione dal collettore di scarico alla piscina di soppressione .....	10
Figura 3-6	- Nodalizzazione dal pressurizzatore al collettore di prova, per liquido .....	11
Figura 3-7	- Curva caratteristica valvola VL2.....	12
Figura 3-8	- Configurazione tubi di raccordo e valvola prototipo per prove con vapore .....	13
Figura 3-9	- Nodalizzazione tubi di raccordo e valvola prototipo per prove con vapore.....	13
Figura 3-10	- Configurazione tubi di raccordo e valvola prototipo per prove con liquido....	14
Figura 3-11	- Nodalizzazione tubi di raccordo e valvola prototipo per prove con liquido ...	14
Figura 3-12	- Rappresentazione valvola prototipo .....	15
Figura 3-13	- Curva caratteristica normalizzata della valvola prototipo.....	15
Figura 4-1	- Configurazione dell'impianto VAPORE nella prova utilizzata per la validazione dell'input.....	16
Figura 4-2	- Andamento della sezione di passaggio in corrispondenza dello stelo .....	17
Figura 4-3	- Perdite di carico nell'orifizio tarato durante la prova utilizzata per la validazione dell'input.....	17
Figura 4-4	- Andamento della pressione nel corso della prova di validazione.....	18
Figura 4-5	- Andamento della portata nel corso della prova di validazione.....	18
Figura 6-1	- Configurazione tubi di raccordo e valvola prototipo per prove con vapore .....	36

# 1 Sommario

In questo documento è trattata l'analisi termoidraulica pre-test di qualifica di una valvola prototipo tramite l'impianto VAPORE. Il codice termoidraulico d'impianto utilizzato è RELAP5; inizialmente si è effettuata la verifica della corrispondenza dei risultati forniti dal codice, utilizzando alcuni dati sperimentali ottenuti sull'impianto stesso con una configurazione standard. Successivamente modificando opportunamente l'input per inserire la valvola prototipo e i tubi di raccordo necessari per collegarla all'impianto, si è proceduto con la simulazione delle prove di qualifica della valvola. Il Test della valvola prototipo di cui è stato fornito il coefficiente di efflusso teorico ( $C_v$ ) in funzione della corsa, si articola in tre diverse prove:

1. la prima consiste nell'utilizzare vapore saturo a una pressione maggiore di 60 bar (da determinare) per far sì che a monte del prototipo grazie all'azione di regolazione di una valvola dotata di servomotore si mantenga un flusso di vapore a 60 bar.
2. la seconda consiste nell'utilizzare liquido saturo a 59 bar e trovare la configurazione d'impianto (apertura parziale delle valvole) per ottenere una portata il più vicino possibile al valore assegnato nelle specifiche
3. la terza consiste nell'utilizzare liquido saturo a 44.2 bar e trovare la configurazione d'impianto (apertura parziale delle valvole) per ottenere all'ingresso del prototipo, con l'introduzione di perdite di carico opportune a monte di esso, un titolo di vapore il più vicino possibile al valore assegnato e una portata maggiore di un livello di soglia presente nelle specifiche.

## 2 Impianto VAPORE

### 2.1 Informazioni generali sull'impianto VAPORE

L'impianto VAPORE, progettato da ENEA, è stato completato nel 1986 e successivamente potenziato nel 1992 ed è in grado di effettuare prove di qualifica, in scala reale, su componenti e sistemi di impianti nucleari e convenzionali.

Su questo impianto sono stati provati negli anni passati:

- valvole di sicurezza destinate all'ex centrale nucleare di Montalto di Castro,
- il sistema di scarico del vapore in piscina destinato alla stessa Centrale,
- Valvole, strutture e piping inerenti il sistema di depressurizzazione per il progetto AP-600 Westinghouse.

E' quindi evidente che l'impianto VAPORE rappresenta un importante supporto per le industrie del settore dell'impiantistica e della componentistica meccanica e strutturale di processo, che vogliono accedere alle opportunità di mercato presentate dal rilancio dell'opzione nucleare in Italia.

Pertanto è opportuno esaminare, tramite una simulazione con codice affermato (RELAP), la fattibilità di prove sperimentali particolarmente impegnative su nuovi prototipi di interesse industriale, per i quali è necessario applicare metodi e procedure di prova non ancora sperimentati su VAPORE.

I risultati costituiranno uno degli elementi di valutazione della convenienza ad avviare i necessari interventi per ripristinare la funzionalità di VAPORE, che è inattivo dal 2000.

Le prestazioni principali di VAPORE sono:

- Pressione di esercizio: regolabile fino a 18 MPa
- Temperatura di esercizio: da T ambiente a 357 °C
- Portata vapore saturo: regolabile fino a 300 kg/s
- Portata acqua satura: regolabile fino a 600 kg/s.
- La temperatura iniziale di piscina può essere predisposta da temperatura ambiente fino a 100°C.

### 2.2 Descrizione dell'attività oggetto del presente contratto

L'ENEA sta valutando, sulla base delle richieste pervenute, quali interventi programmare e quali risorse destinare all'adeguamento degli impianti di prova che a tutt'oggi non risultano pienamente operativi o che comunque dovessero richiedere un adeguamento per offrire le prestazioni richieste da attività di qualifica in campo nucleare.

In particolare è stata proposta, da un'industria di rilevante interesse nazionale, produttrice tra l'altro di valvole anche per applicazioni speciali e di alto livello tecnologico, un'attività di qualifica delle prestazioni di un prototipo di valvola installabile su linee di vapore, su linee di acqua surriscaldata e su linee che elaborano anche portate di miscele liquido-vapore. La valvola dovrà operare ad alta pressione e temperatura, e dovrà essere in grado di gestire alte portate di fluido di processo.

Sulla base delle informazioni acquisite dal Costruttore, presumibilmente ancora non del tutto finalizzate ma comunque ampiamente significative del futuro modello commerciale, ENEA ha effettuato un'elaborazione grafica indicativa del prototipo (**fig. 6**).

Nelle figure che seguono si supporrà di disporre di un prototipo in versione flangiata, diversamente da quanto indicato dal Costruttore, per motivi di praticità nell'installazione e gestione su VAPORE.

Nella Tabella 1 si riportano le condizioni operative del prototipo in oggetto, che dovranno essere simulate sull'impianto VAPORE.

Tabella 1 – Matrice delle prove

	Water	Steam	Mix	Descrizione
$P_1$	59 bar	60 bar	44.2 bar	Pressione a monte
$P_2$	4.0 bar	2.5 bar	3.0 bar	Pressione a valle
$T$	257 °C	275 °C	257 °C	Temperatura a monte prototipo ad inizio prova
$Q$	744 t/h	210 t/h	>396 t/h	Portata massica
$\rho$	790,40 kg/m <sup>3</sup>	30,83 kg/m <sup>3</sup>	416,65 kg/m <sup>3</sup>	Densità
$h$	1120 kJ/kg	2788 kJ/kg	1168 kJ/kg	Entalpia

Il range di lavoro del prototipo rientra ampiamente nelle possibilità dell'impianto VAPORE, ma attualmente non è stata messa a punto una procedura che consenta di effettuare prove con miscela liquido-vapore.

Il lavoro svolto dall'Università consiste in :

- a) Modellazione dell'impianto VAPORE nella configurazione generale
- b) Simulazione di una prova di efflusso con vapore saturo
- c) Simulazione di una prova di efflusso con liquido inizialmente sottoraffreddato
- d) Simulazione di una prova di efflusso con miscela vapore-liquido

### 3 Modellazione dell'impianto VAPORE

Questa fase consisterà nella modellazione su codice RELAP della configurazione d'impianto riportata in **Figura 3-1** e **Figura 3-2**.

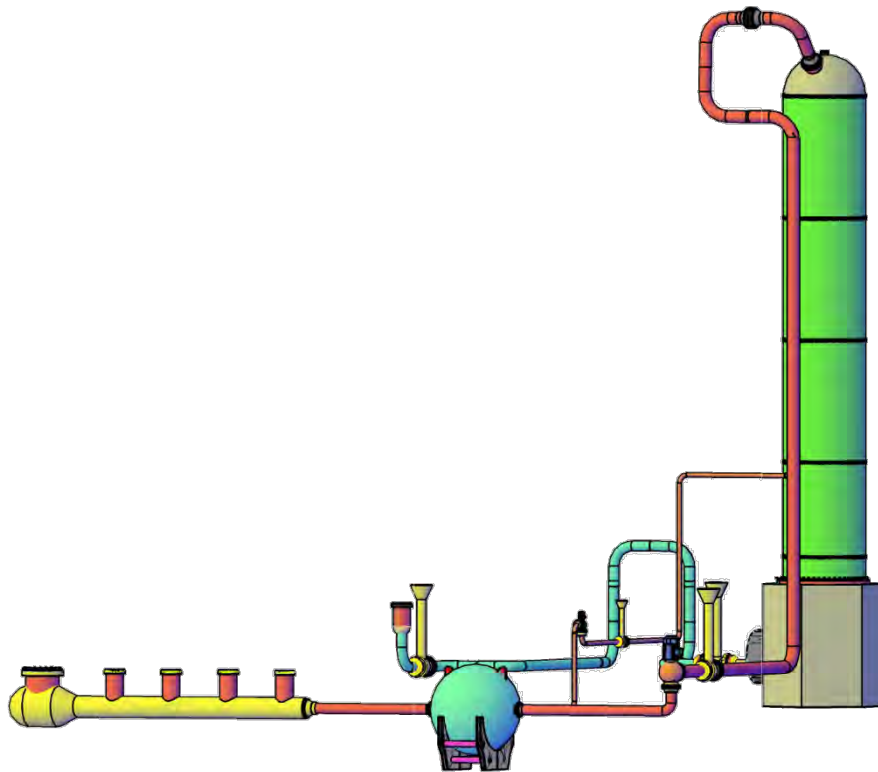


Figura 3-1 - Configurazione d'impianto dal pressurizzatore al collettore di prova, per vapore e per liquido

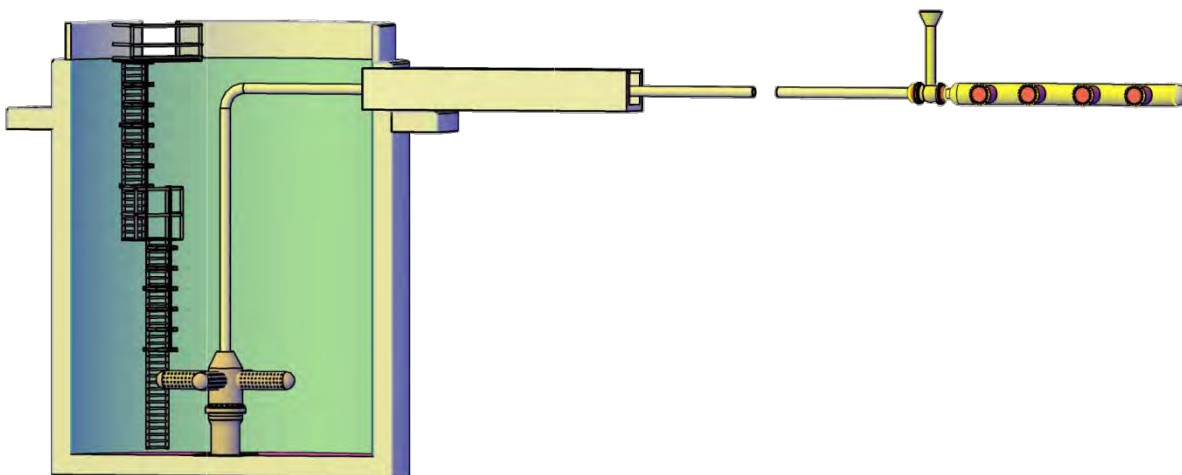


Figura 3-2 - Configurazione d'impianto dal collettore di scarico alla piscina di soppressione

In **Figura 3-1** e **Figura 3-2** è indicata la configurazione generale dell'impianto, alla quale saranno applicate le sezioni di prova o i componenti da provare tramite opportune aggiunte di connessioni e pezzi speciali di adattamento. Non sono escluse anche modifiche impiantistiche di adeguata entità, qualora necessarie per l'esecuzione dei test richiesti.

Per il calcolo delle prove in oggetto si è fatto uso di due nodalizzazioni del circuito VAPORE: la prima è stata utilizzata per le prove relative alla scarico di vapore, la seconda per le prove con scarico di liquido saturo e per quelle con liquido bifase.

Le due nodalizzazioni differiscono solo per alcune parti; nel seguito vengono dapprima descritte le parti in comune, poi le parti proprie di ogni nodalizzazione.

La nodalizzazione è stata preparata secondo i seguenti criteri:

- lunghezza dei volumi pari al massimo a qualche diametro idraulico;
- per le parti caratterizzate da un deflusso essenzialmente monofase o da limitate variazioni spaziali di titolo e velocità sono state adottate lunghezze maggiori al fine di contenere il numero totale di volumi e conseguentemente il tempo di calcolo;
- Le dispersione di calore attraverso le pareti non sono state generalmente simulate; tale semplificazione si giustifica con la rapidità dei transitori (durata delle prove dell'ordine del minuto).

### 3.1 Modello vapore

Per le prove con deflusso di vapore si è adottata una nodalizzazione dell'impianto uguale a quella rappresentata in **Figura 3-3** e **Figura 3-5** che viene di seguito descritta e presa come riferimento; per tutti gli altri casi verranno descritti solo i componenti aggiunti o modificati rispetto alla nodalizzazione di riferimento.

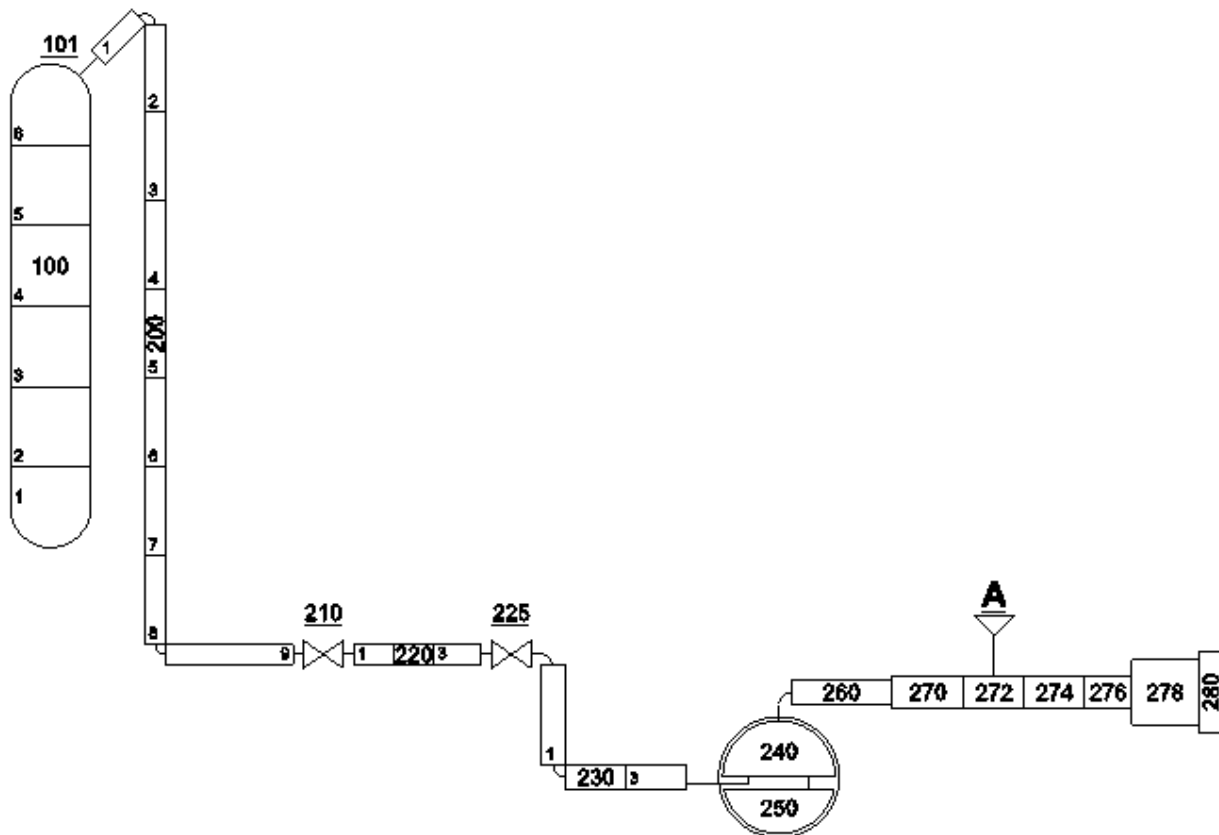


Figura 3-3 - Nodalizzazione dal pressurizzatore al collettore di prova, per vapore

Il pressurizzatore è stato nodalizzato con il PIPE 100, costituito da 6 volumi. La giunzione che collega il componente 100-01 con l'ingresso del componente 100-02 ha area pari all'area libera della griglia di supporto dei riscaldatori elettrici presenti in questa zona. Il PIPE 200, costituito da 9 volumi, simula il tubo da 10 pollici che dalla sommità del pressurizzatore scende verso il basso arrivando fino al separatore di umidità. I componenti di tipo MTRVLV 210 e 225 simulano rispettivamente la valvola di intercettazione e la valvola di regolazione (VR 1.1). Per la valvola 210, che come intercettatrice funziona in modalità ON/OFF e può stazionare solo nelle posizioni estreme di apertura o chiusura, è stata adottata l'ipotesi di area di efflusso proporzionale alla percentuale di corsa dello stelo. Per la valvola 225 è stata utilizzata la tabella del Cv (coefficiente che quantifica la portata in funzione della pressione a monte) in funzione della posizione normalizzata dello stelo (**Figura 3-4**). Il Cv massimo corrispondente alla valvola totalmente aperta (corsa a 0.15 m) è di 650.

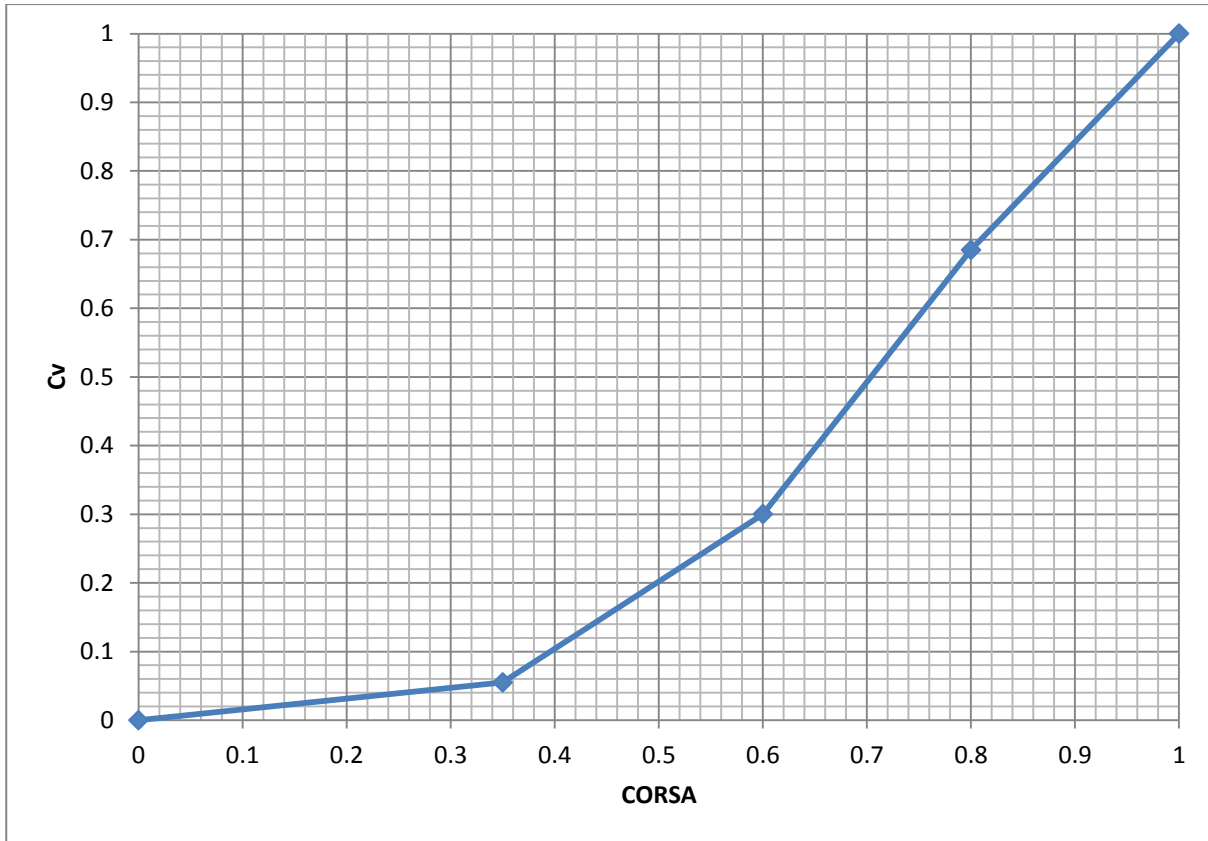


Figura 3-4 - Curva caratteristica valvola VR 1.1

Il PIPE 220 simula il tronco di collegamento delle valvole su menzionate. Il PIPE 230, composto da due volumi, collega la valvola di regolazione all'ingresso del separatore. Il separatore è simulato dai componenti 240 e 250. In particolare il 240 è proprio un SEPARATR ad efficienza unitaria, con volume pari a metà del volume libero della sfera. La giunzione che rende possibile il drenaggio del liquido è collegata al SINGVOL 250 anch'esso di volume pari a metà del separatore reale. Il SINGVOL 260 simula il volume del misuratore di portata a boccaglio situato tra il separatore ed il test drum. Le perdite di carico in esso generate sono state simulate con un opportuno coefficiente di perdita di carico associato alla giunzione che collega il volume 260 con il volume 270. Il test drum è simulato dai BRANCH 270, 272, 274, 276, 278 e 280. I primi quattro simulano la parte conica di raccordo iniziale e la parte cilindrica. L'ultimo rappresenta il bocchello flangiato da 24 pollici.

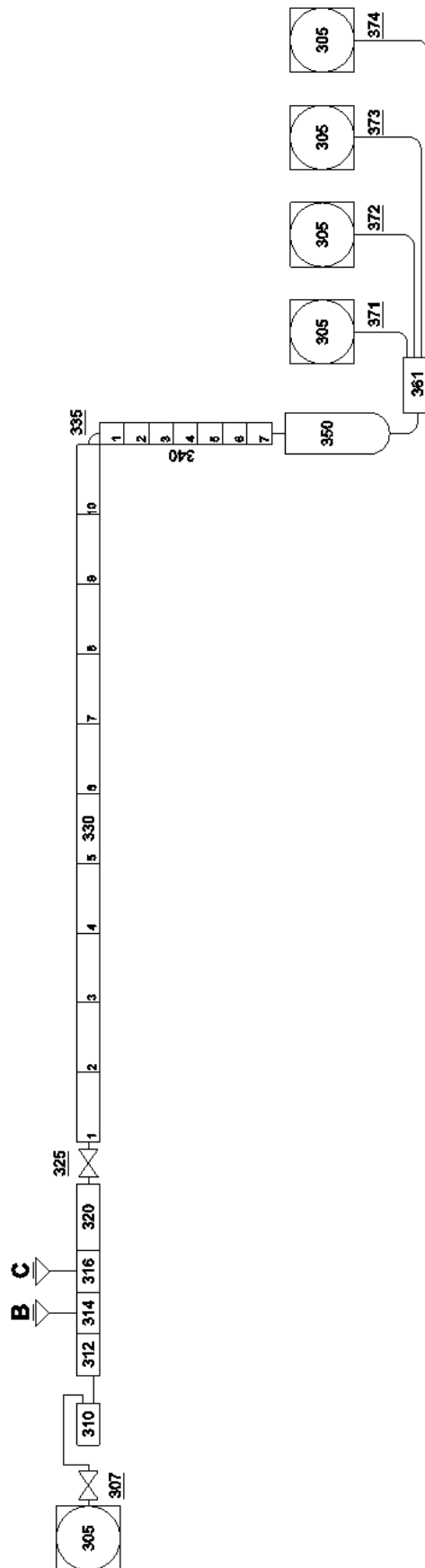


Figura 3-5 - Nodalizzazione dal collettore di scarico alla piscina di soppressione

La parte del collettore di scarico fino alla valvola di back pressure è simulato dai BRANCH 310, 312, 314 e 320, la restante parte con il PIPE 330 composto da 10 volumi uguali. La valvola di Back Pressure è simulata dal componente 325 di area pari a quella libera col piatto dell'otturatore parallelo all'asse del tubo (è una valvola a farfalla); attualmente sulla valvola non è montato alcun otturatore, ma per avere la possibilità di limitare la portata attraverso la valvola prototipo durante le prove si è ritenuto necessario simulare la presenza dell'otturatore e la possibilità di chiudere la valvola, considerando per semplicità un andamento lineare del Cv in funzione della posizione dello stelo. La valvola rompi vuoto è stata simulata con il TMDPVOL 305 e la TRPVLV 307, la quale si collega alla sezione di uscita del BRANCH 310 sopra descritto. Tale valvola ha il ruolo di regolazione della pressione del collettore di scarico, durante lo stazionario, e di evitare che la pressione nello stesso si riduca al di sotto di 1 bar. Il collegamento tra il tratto orizzontale e quello verticale è effettuato con la JUN 335, con opportuna perdita di carico per cambio di direzione. Il tratto di tubazione verticale da 10 pollici (è stata studiata la possibilità di sostituirlo con un tubo di diametro maggiore, ad esempio 16") è stato simulato con la pipe 340 composta da 7 volumi. Il quencher è simulato dal BRANCH 350 che ne costituisce il corpo cilindrico, e dal BRANCH 361 che ne rappresenta i quattro bracci. Quest'ultimo ha lunghezza pari alla lunghezza di ogni singolo braccio ed area trasversale pari all'area totale dei bracci, mantenendo per ovvie ragioni il diametro idraulico del singolo braccio. I fori presenti sulla periferia dei bracci sono simulati dalle quattro giunzioni 371, 372, 373 e 374. Ognuna di essa ha area corrispondente all'area totale dei fori su un singolo braccio del quencher. Per tali giunzioni si è adottata l'ipotesi di variazione brusca di sezione ed il coefficiente di riduzione della portata critica pari a 0,84. Questo valore è stato determinato con calcoli di post test di prove effettuate con il quencher del BWR negli anni passati. Si ritiene che questa sia la miglior stima di tale valore. Nel quencher del BWR l'area totale dei fori è pari a circa la metà dell'area trasversale dei bracci e pertanto ci si può aspettare che ogni foro si comporti come un singolo orifizio (infatti il valore di 0,84 è quello tipico degli orifizi). Comunque non si hanno dati in proposito. I TMPDVOL 901, 902, 903 e 904 simulano la piscina a pressione atmosferica.

### 3.2 Modello liquido

Per le prove con deflusso liquido si è adottata la nodalizzazione di **Figura 3-6** e **Figura 3-5**. Dal collettore di scarico alla piscina di soppressione la nodalizzazione è la stessa, mentre sostanziali modifiche sono effettuate nella configurazione e quindi nella nodalizzazione dal pressurizzatore al collettore di prova.

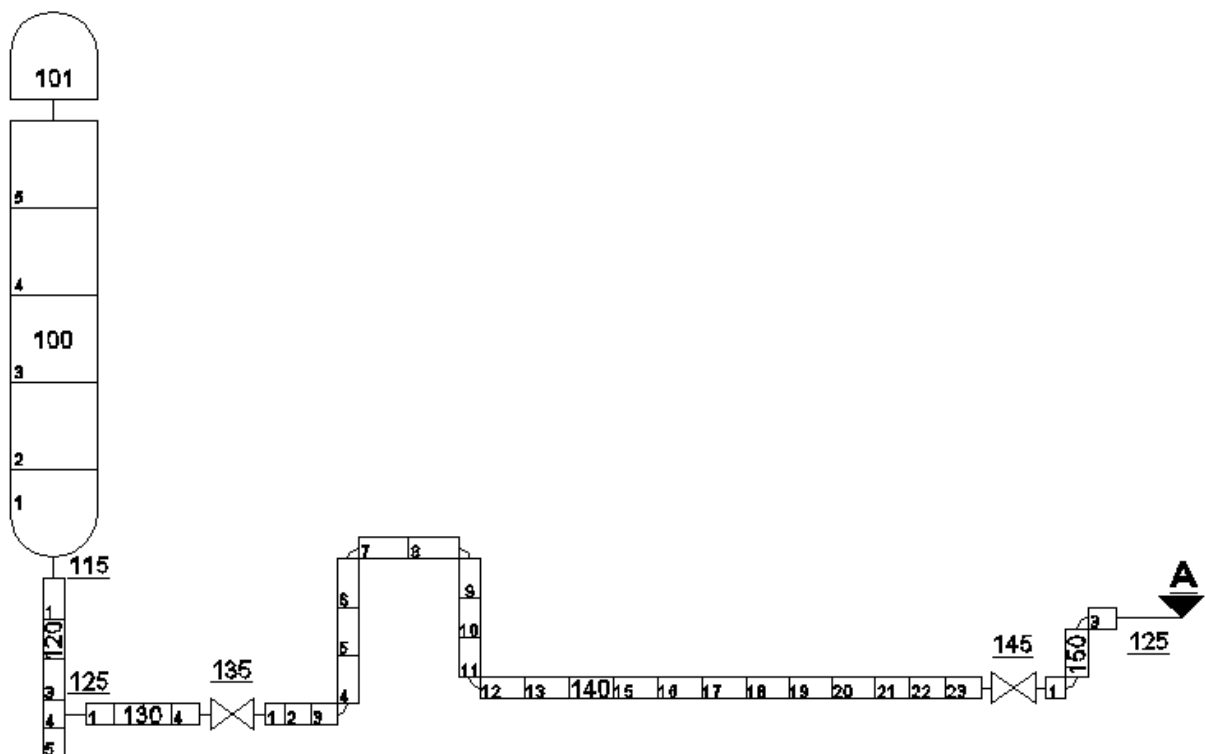


Figura 3-6 - Nodalizzazione dal pressurizzatore al collettore di prova, per liquido

In **Figura 3-6** si può notare come il pressurizzatore questa volta sia stato simulato attraverso due componenti separati: il PIPE 100 composto da 5 volumi che rappresenta la parte inferiore del pressurizzatore, la giunzione che collega il componente 100-01 con l'ingresso del componente 100-02 ha area pari all'area libera della griglia di supporto dei riscaldatori elettrici presenti in questa zona, il BRANCH 101 rappresenta invece la parte superiore. Il tubo di adduzione del liquido da 12 pollici è stato nodalizzato con il PIPE 120, composto da 5 volumi, partendo dal fondo del pressurizzatore. La giunzione 125 collega il quarto volume del PIPE 120 dalla faccia laterale al tubo da dodici pollici orizzontale di allaccio al separatore nodalizzato con il PIPE 130 da 4 volumi. Tale tubo è connesso con la valvola di intercettazione VL1 simulata con la TRPVALVE 135 che si apre alla fine dello stazionario. Il tubo da 12 pollici che si connette all'impianto di prova per il prototipo è nodalizzato con il PIPE 140 e 150 separati dalla valvola di regolazione VL2 simulata con la MTRVLV 145 Il PIPE 140 è composta da 23 volumi divisi essenzialmente in due tratti verticali e due orizzontali, nelle quali le perdite di carico dovute alle curve sono state considerate con opportuni coefficienti nelle giunzioni considerate. Per la MTRVLV 145 è stata utilizzata la tabella del Cv (coefficiente che quantifica la portata in funzione della pressione a monte) in funzione della posizione normalizzata dello stelo (**Figura 3-7**) Il valore massimo del Cv di 3300 si raggiunge con la corsa posizionata a 0.285 m.

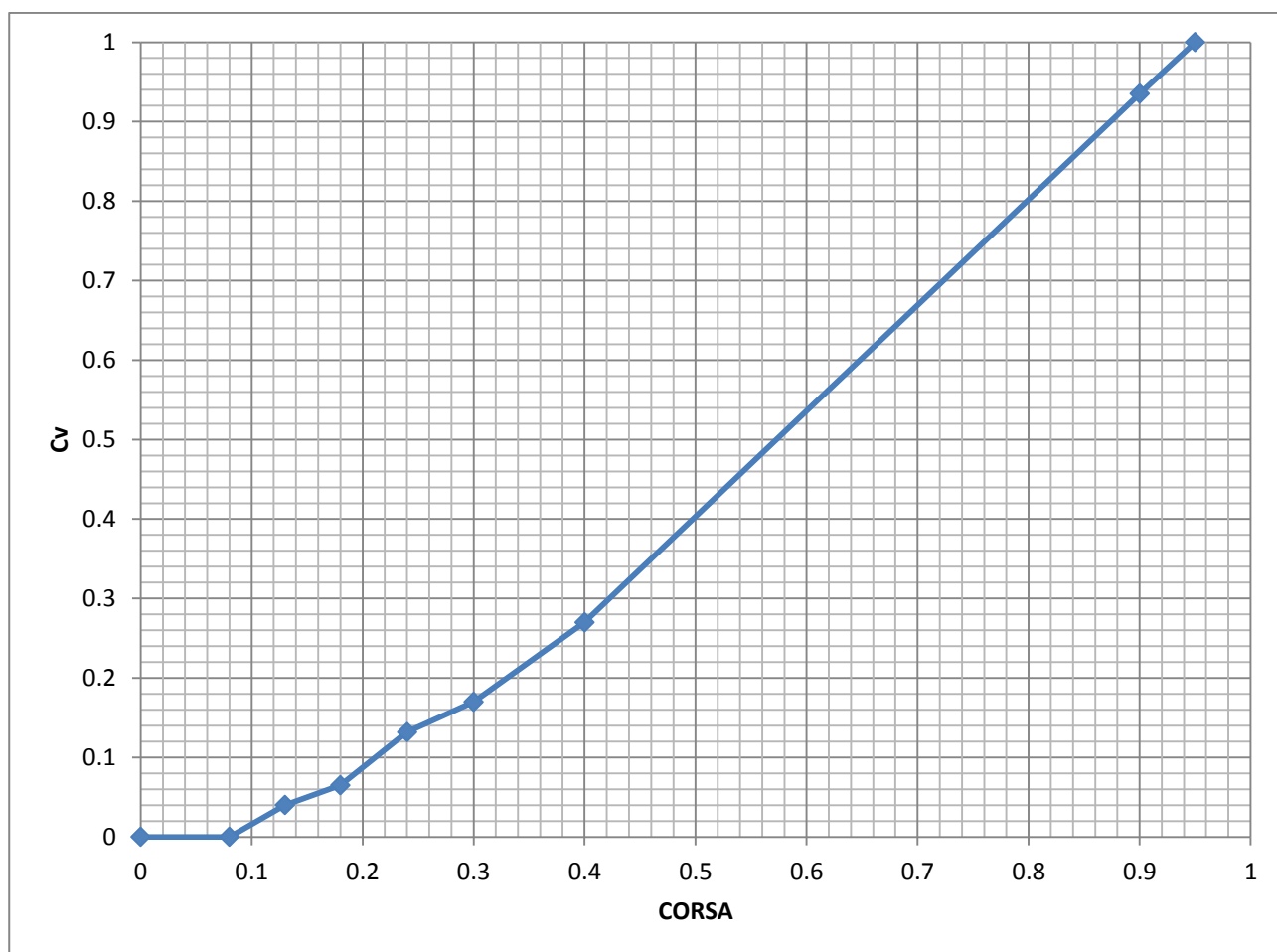


Figura 3-7 - Curva caratteristica valvola VL2

### 3.3 Modellazione tratto di collegamento della valvola prototipo per vapore

L'impianto è stato progettato per testare una vasta gamma di prototipi di varie dimensioni. In particolare si hanno a disposizione quattro attacchi in uscita dal test drum, per provare più componenti in parallelo nel caso in cui la prova lo richieda. È necessario raccordare questi ultimi con dei tratti di tubazione come si può vedere in **Figura 3-8**.

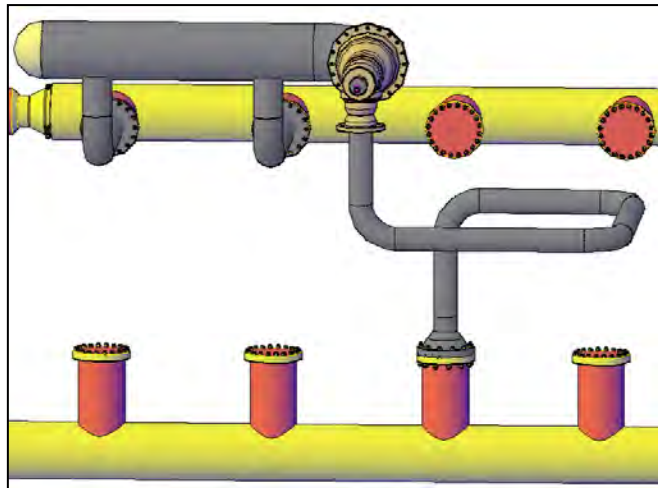


Figura 3-8 - Configurazione tubi di raccordo e valvola prototipo per prove con vapore

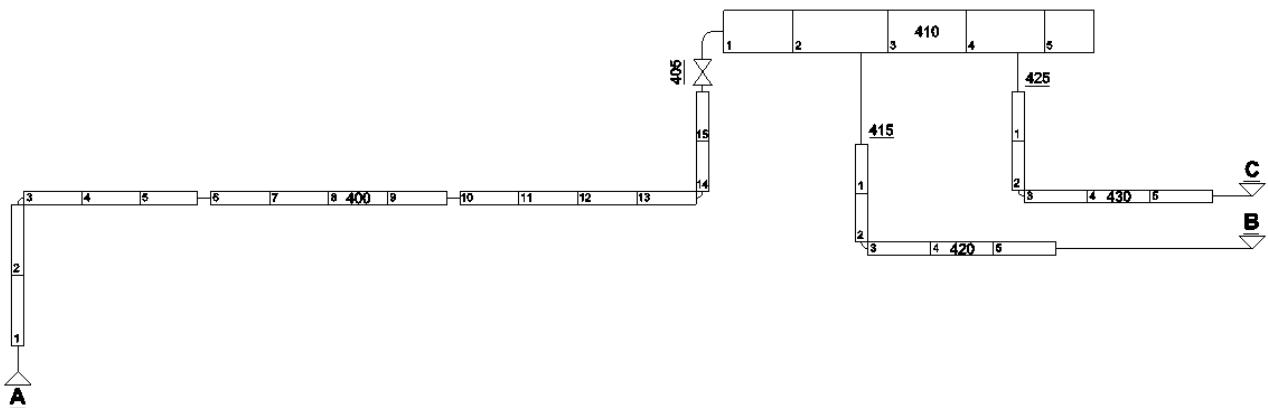


Figura 3-9 - Nodalizzazione tubi di raccordo e valvola prototipo per prove con vapore

Il tubo di connessione da 8" tra collettore di prova e valvola prototipo, in **Figura 3-9**, è stato schematizzato con il PIPE 400 con 16 volumi, anche qui, come per le altre tubazioni sono state rispettate le lunghezze dei tratti con diversi orientamenti, inserendo nelle giunzioni di collegamento opportune perdite di carico, dovute ai cambi di direzione (nello specifico curve a 90° ad ampio raggio con un  $K_f = K_r = 0.4$ ). La valvola prototipo è stata simulata con il componente MTRVLV 405, di cui si parlerà nello specifico in seguito. L'uscita della valvola prototipo è direttamente connessa con la tubazione da 20 pollici che costituisce il corpo principale della sezione di scarico, alla quale sono connessi in parallelo attraverso le sezioni laterali dei volumi 02 e 04 della stessa sezione due tubi da 10 pollici, simulati con le PIPE 420 e 430 e le SNGLJUN 415 e 425. Le perdite di carico sulle due giunzioni sono state poste in prima approssimazione pari a  $K_f = 1.0$  e  $K_r = 1.5$ , mentre la curva a 90° dei due tubi da 10 pollici è stata considerata con un  $K_f = K_r = 0.6$  sulla giunzione interessata.

### 3.4 Modellazione tratto di collegamento della valvola prototipo per liquido

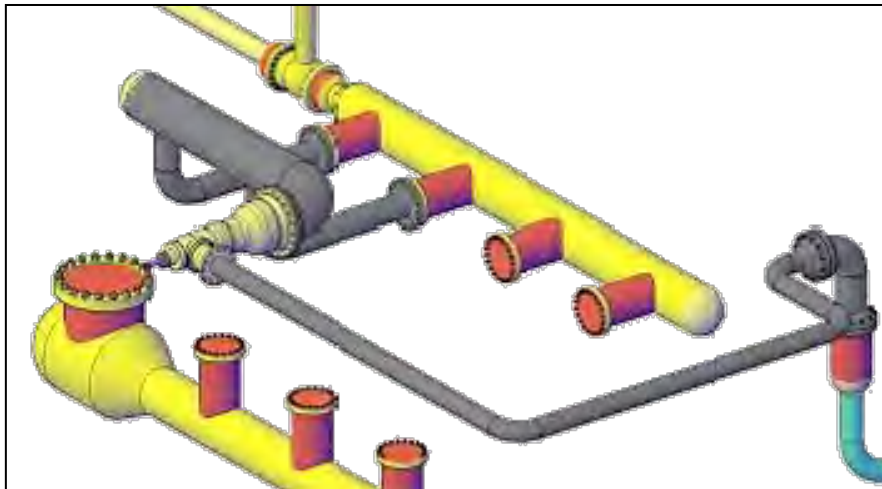


Figura 3-10 - Configurazione tubi di raccordo e valvola prototipo per prove con liquido

Come si nota dalla figura la seconda parte del raccordo è rimasta invariata, ciò non vale invece per la parte a monte della valvola prototipo. Il tubo di collegamento simulato con il PIPE 400 composta da 13 volumi. Il tubo è da 8 pollici, questa volta però totalmente orizzontale, diviso nello specifico in 4 tratti, collegati dalle giunzioni su cui si è imposta una perdita di carico pari a quella per le curve a 90°, con l'aggiunta, per le giunzioni 415 e 425, del contributo dato dalla separazione del flusso.

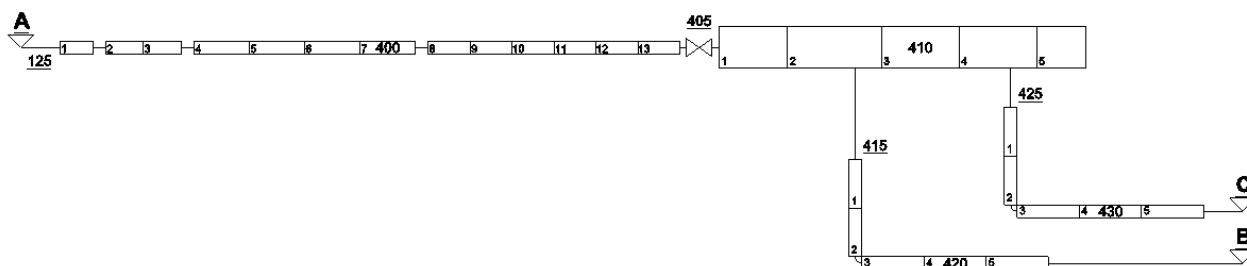


Figura 3-11 - Nodalizzazione tubi di raccordo e valvola prototipo per prove con liquido

### 3.5 Simulazione Valvola prototipo

La valvola oggetto delle prove è un prototipo in via di sviluppo, per il quale ENEA ha proposto al costruttore una verifica sperimentale attraverso l'impianto VAPORE.

La valvola prototipo connessa al sistema come descritto nei paragrafi 3.3 e 3.4 è visibile in sezione nella **Figura 3-12**. Il prototipo è stato simulato con la MTRVLV 405, per la quale è stata utilizzata la tabella del Cv (coefficiente che quantifica la portata in funzione della pressione a monte) in funzione della posizione normalizzata dello stelo (Figura 3-13) che è stata fornita dal costruttore.

Il valore massimo del Cv è 372 e si raggiunge per una corsa di 0.076 m.

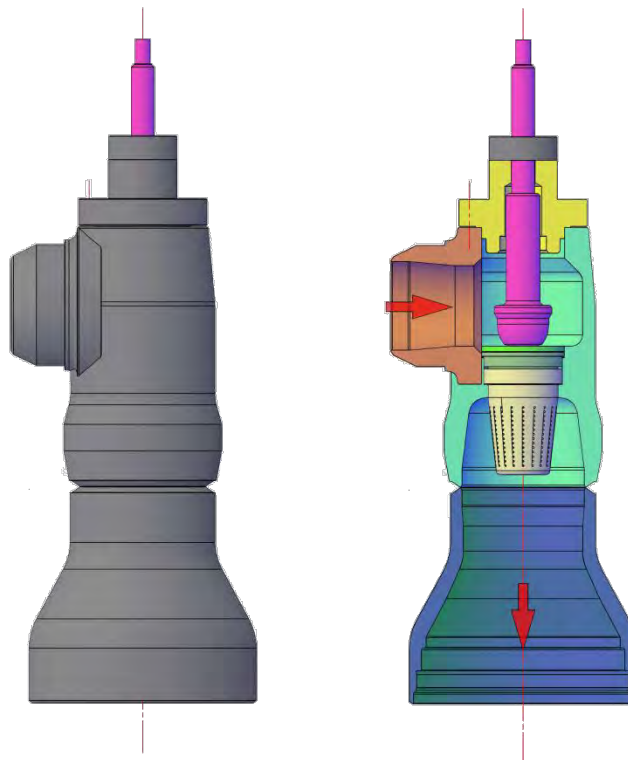


Figura 3-12 - Rappresentazione valvola prototipo

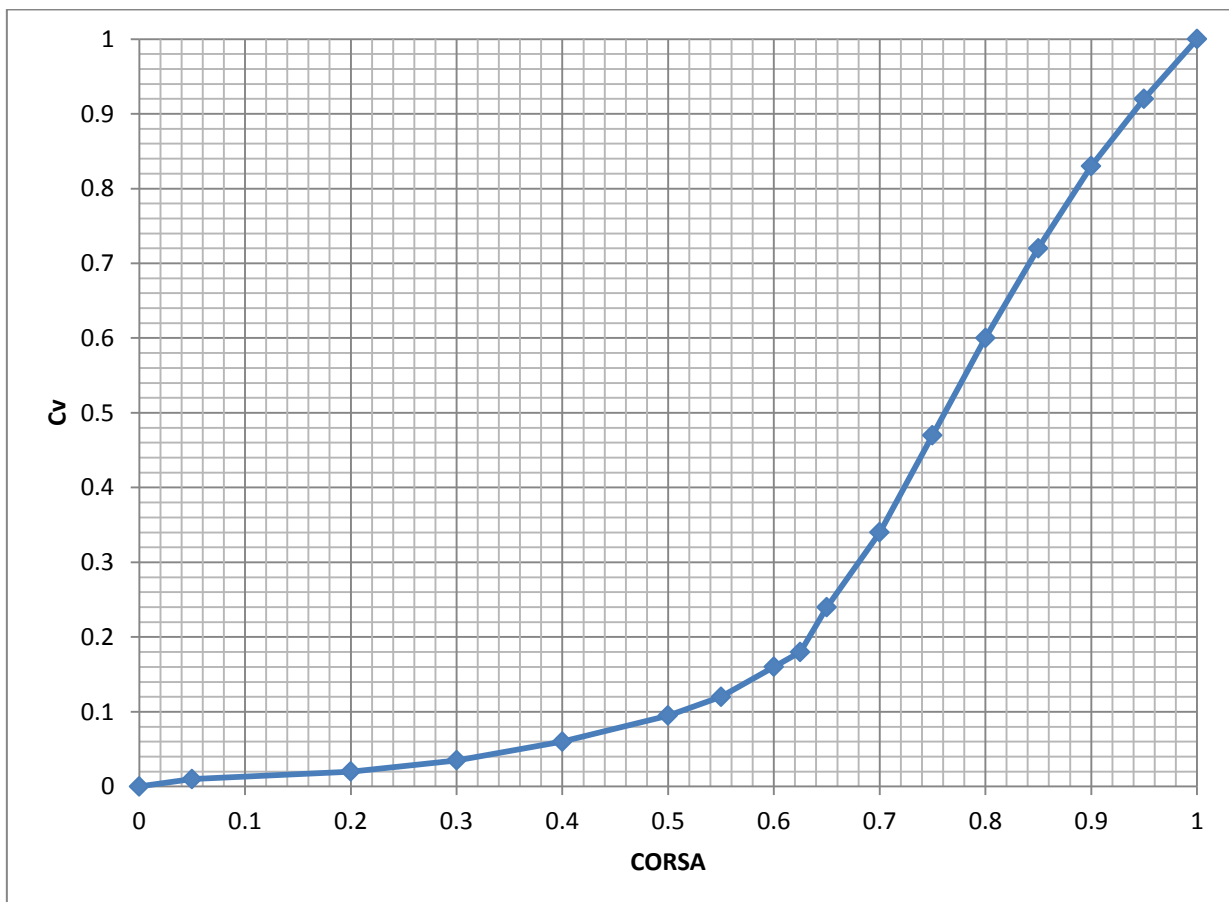


Figura 3-13 - Curva caratteristica normalizzata della valvola prototipo

## 4 Validazione dell'input con dati sperimentali

### 4.1 Nodalizzazione di validazione

I dati sperimentali in possesso per la validazione dell'input RELAP5 si riferiscono ad una configurazione d'impianto molto simile per larghi tratti a quella della prova studiata in questo documento. Come si nota nella figura successiva, al posto della valvola prototipo e dei relativi tratti di connessione erano presenti tre raccordi con dimensioni delle tubazioni rispettivamente di 4" sch.80, 8" sch.80 ed 8" sch.80.

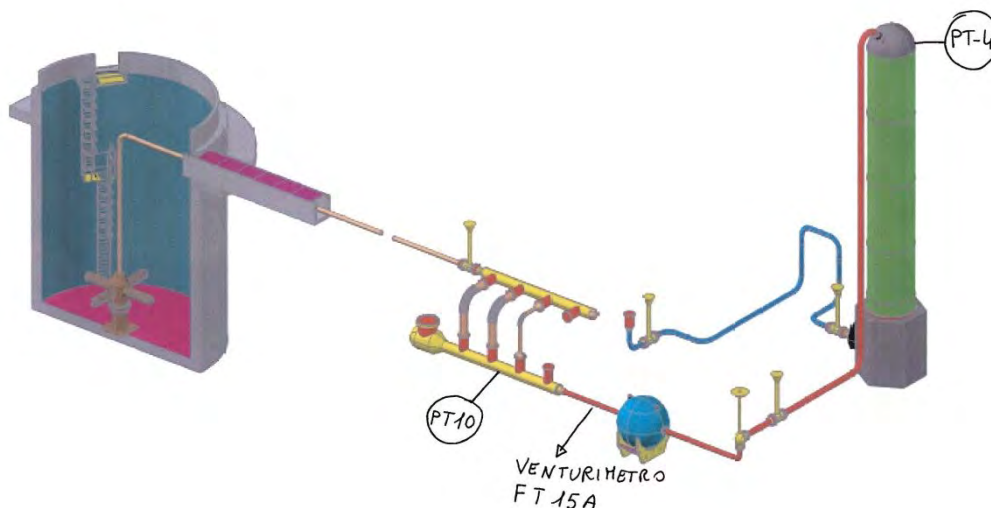


Figura 4-1 - Configurazione dell'impianto VAPORE nella prova utilizzata per la validazione dell'input

Inserendo queste modifiche alla nodalizzazione già effettuata tra il test drum ed il collettore di scarico si è proceduto alla ripetizione numerica della prova sperimentale.

La prova consisteva nell'apertura con una determinata legge (riportata nella figura seguente) della valvola VR1.1, partendo dal pressurizzatore con una pressione di 120 barg.

L'andamento delle grandezze principali nel corso del transitorio risulta molto simile, a conferma della correttezza del modello. Inoltre il valore massimo della portata (che si ha all'incirca dopo 20s), preso come valore di confronto tra il modello e l'esperienza è simile nei due casi:

- Il valore ricavato dalla tabella di taratura del misuratore di portata è di 292 kg/s
- Il valore calcolato tramite il codice RELAP è di 270 kg/s

L'errore tra valore sperimentale e quello calcolato in questo punto è del 7.5%.

L'input risulta quindi validato sulla base della prova sperimentale.

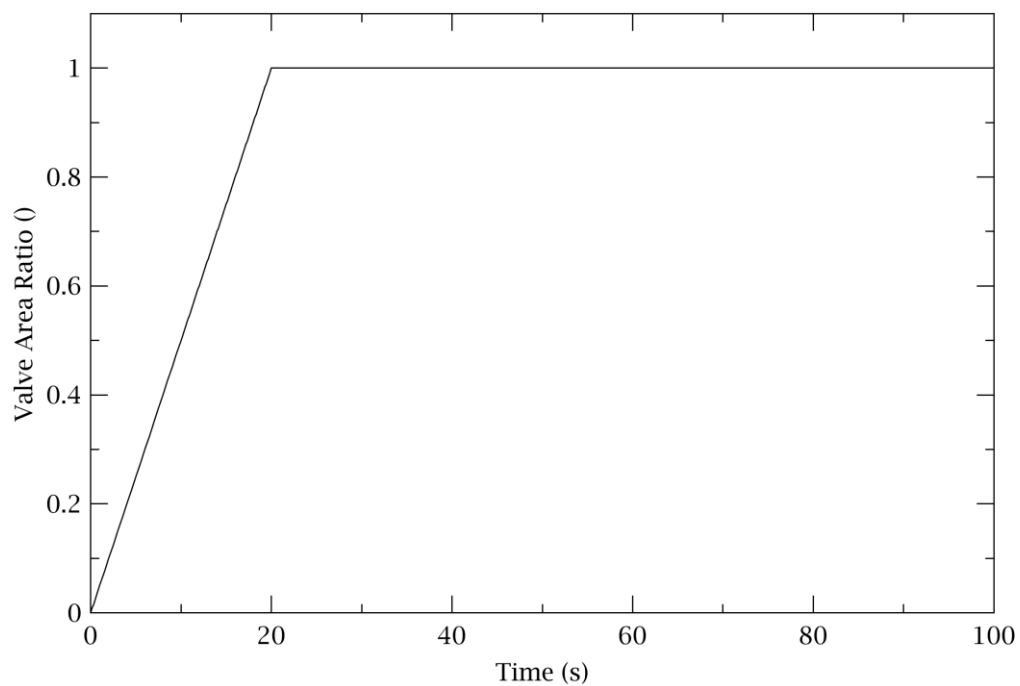


Figura 4-2 – Andamento della sezione di passaggio in corrispondenza dello stelo

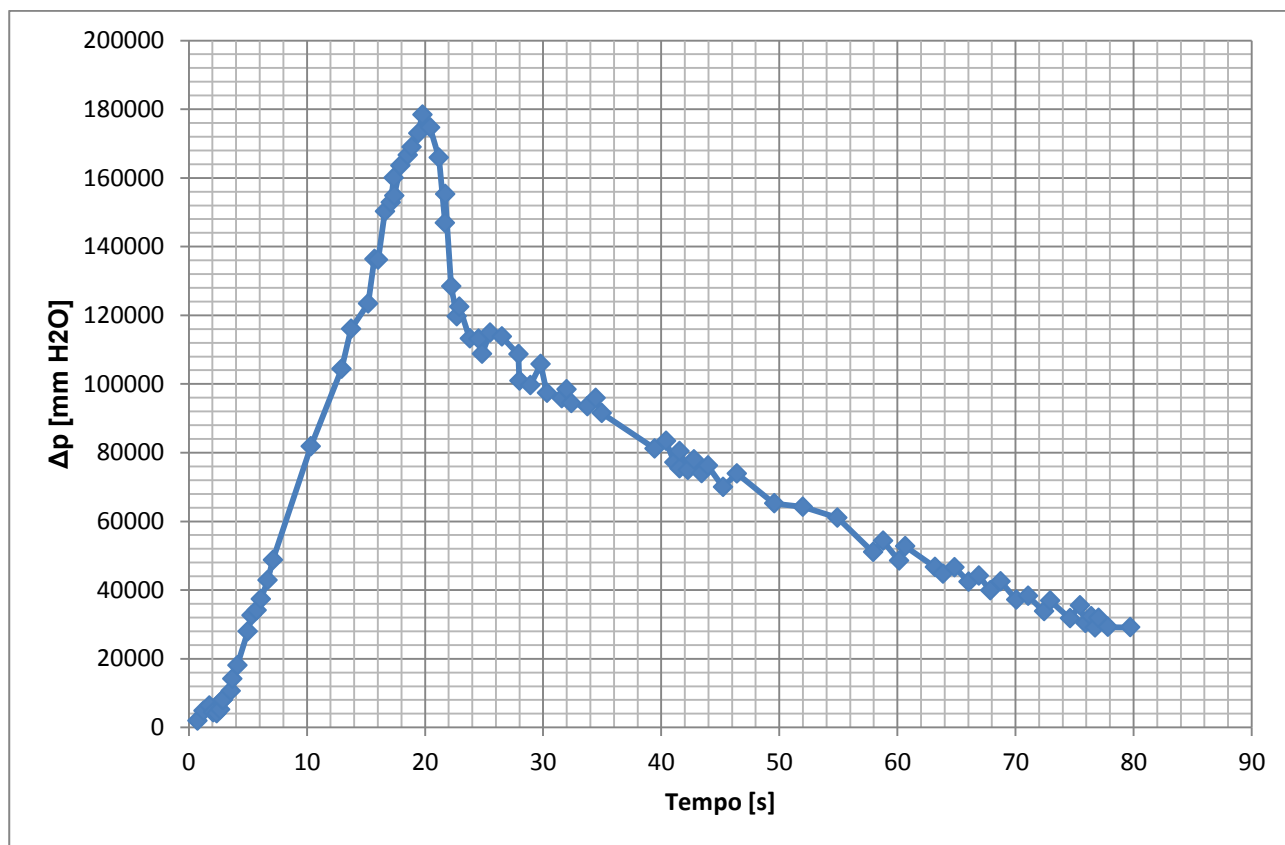


Figura 4-3 - Perdite di carico nell'orifizio tarato durante la prova utilizzata per la validazione dell'input

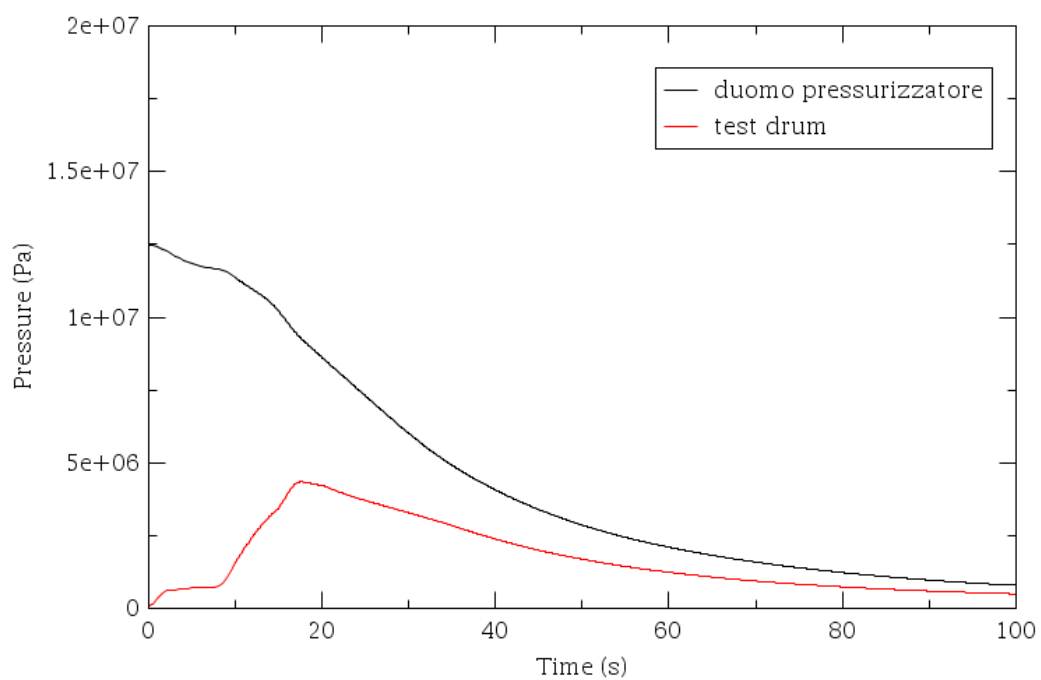


Figura 4-4 – Andamento della pressione nel corso della prova di validazione

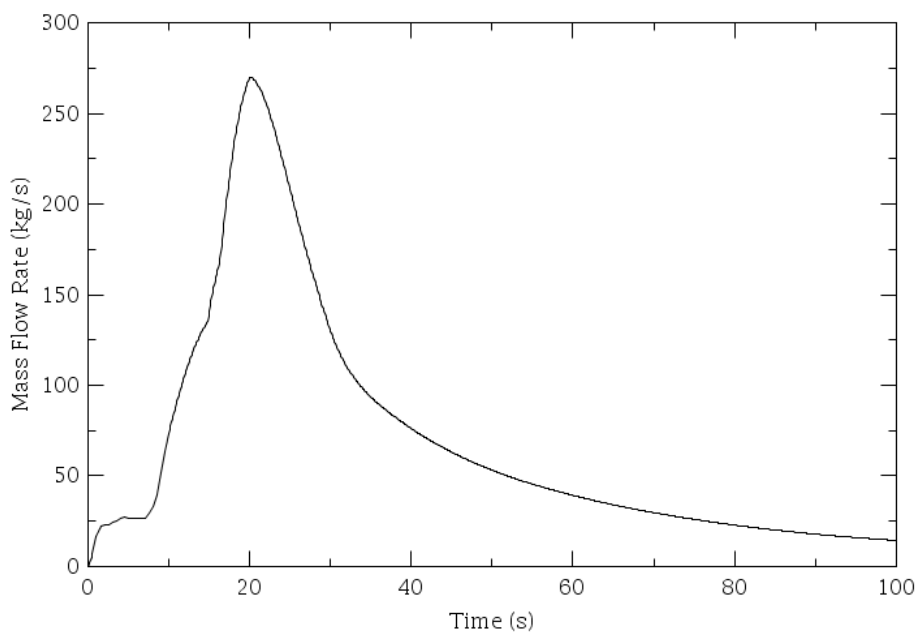


Figura 4-5 – Andamento della portata nel corso della prova di validazione

## **5 Prove con impianto VAPORE**

L'input che è stato validato è stato poi personalizzato per i singoli casi da studiare, inserendo la valvola prototipo ed i tratti di connessione della valvola stessa alle flange dell'impianto VAPORE

### **5.1 Prove con flusso di vapore saturo con valvola di back pressure totalmente aperta**

#### **5.1.1 Procedure operative**

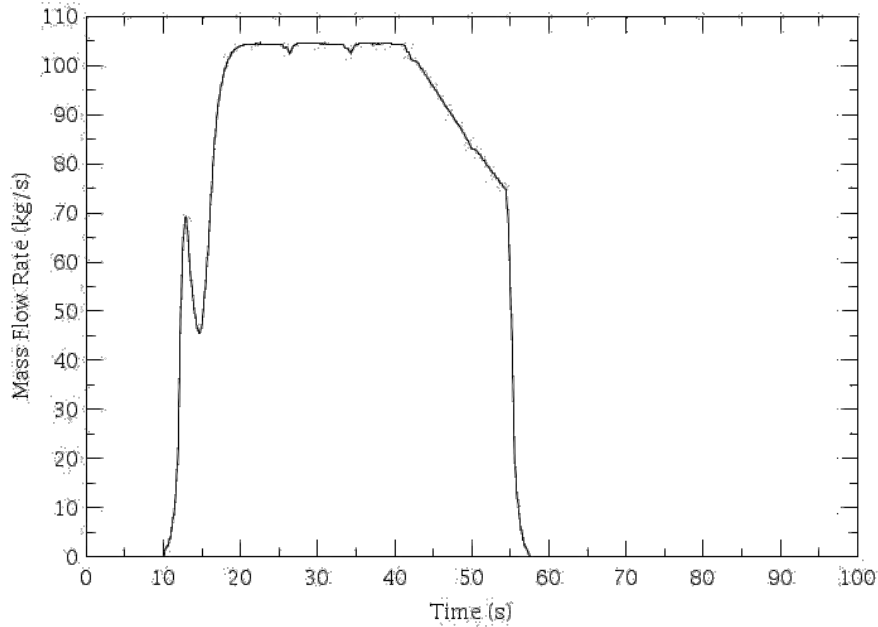
La prova sperimentale della valvola prototipo con flusso di vapore saturo è stata effettuata utilizzando la nodalizzazione dell'impianto sopra descritta. La valvola VR 1.1 attualmente montata sull'impianto ha una velocità di attuazione di 7,8 mm/s: tale caratteristica non permette di raggiungere risultati soddisfacenti nelle prove considerate, per questo si è scelto di portare tale velocità a 20 mm/s. Il sistema di controllo automatico della valvola motorizzata, (necessario a mantenere costante la pressione a monte del prototipo durante i transitori, con continua necessità di modificare l'assetto della valvola) è stato effettuato con un controllore PD. Partendo dalla differenza tra la pressione a monte della valvola, ed un set point di 60 bar, si ottiene un output proporzionale e differenziale, con coefficienti di peso identici e posti uguali a uno, che fa sì che finché la pressione nel pressurizzatore non scende sotto i 60 bar, la valvola continui ad aprirsi mantenendo la pressione il più vicino possibile al valore di set point. La modalità di esecuzione della prova è la seguente:

Il pressurizzatore, va riempito con 14900 kg di liquido saturo in equilibrio con la fase vapore a 160 bar, le tubazioni fino alla VR 1.1 vanno riempite con vapore saturo a 160 bar mentre il tratto tra VR 1.1 e il prototipo va riempito con vapore a 60 bar. La condizione "pronto a partire" è:

1. VI 1.1 aperta
2. VR 1.1 chiusa
3. Valvola prototipo chiusa
4. Valvola di Back Pressure posizionata al 12.4% della corsa (0% chiusa-100% aperta)

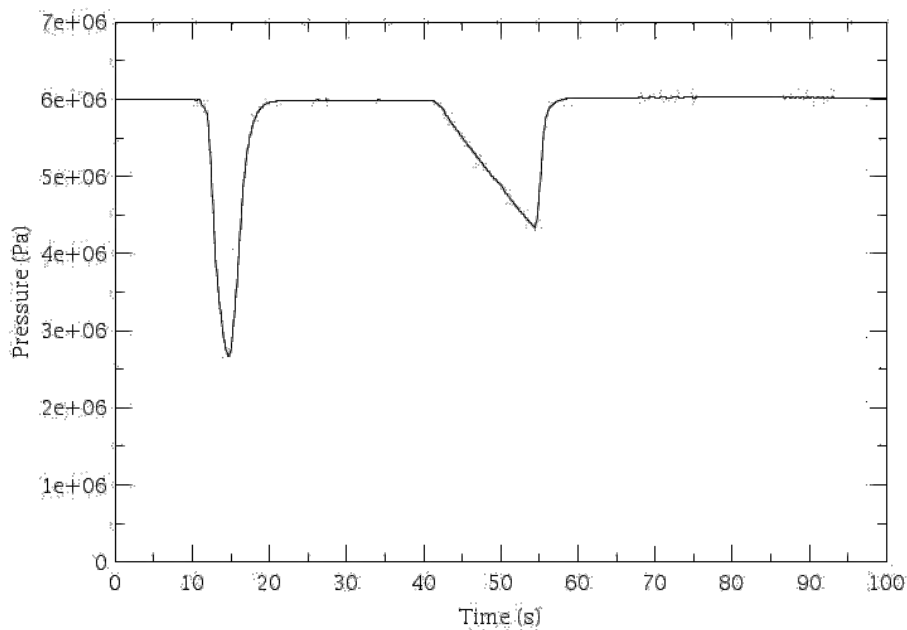
Si avvia la prova attuando in apertura il prototipo. La valvola di regolazione VR 1.1 agisce come regolatrice della pressione al valore di set-point teorico di 60 bar, che è misurato a monte della flangia d'ingresso del prototipo. La prova sarà considerata conclusa quando la pressione nel pressurizzatore scenderà al di sotto di 60 bar. A questo punto la simulazione potrà concludersi con l'inversione della corsa dell'otturatore del prototipo fino alla sua completa chiusura.

### 5.1.2 Andamento temporale della portata calcolata attraverso il prototipo



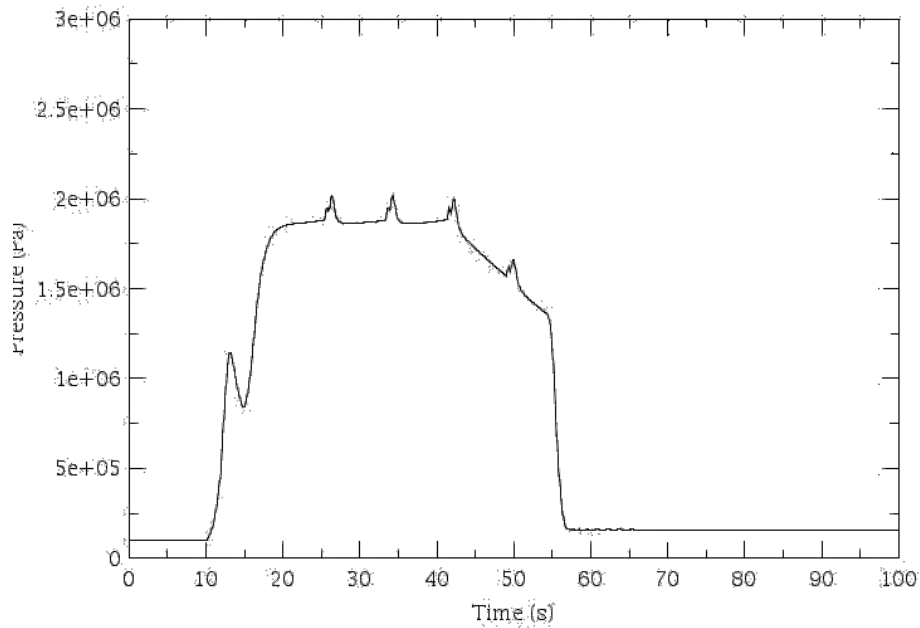
Lasciando la valvola di Back Pressure totalmente aperta la portata in massa di vapore raddoppia rispetto al valore richiesto nelle specifiche: questo provoca un repentino svuotamento del pressurizzatore, riducendo il tempo in cui la portata rimane costante grazie alla valvola di regolazione

### 5.1.3 Andamento temporale della pressione calcolata all'ingresso del prototipo



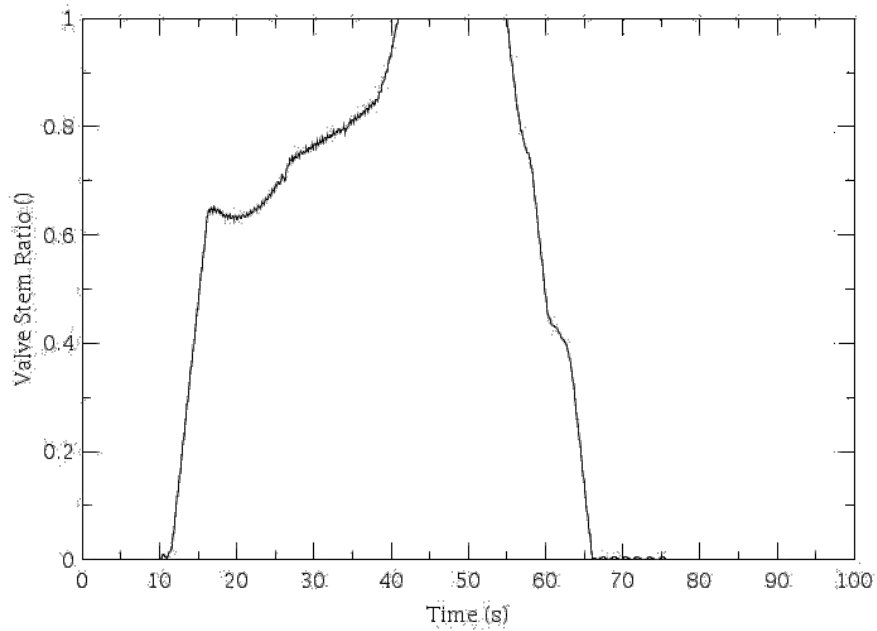
Grazie alla valvola di regolazione, fino a quando la pressione del pressurizzatore non scende sotto i 60 bar, il valore della pressione a monte del prototipo rimane intorno al set point, ma per un tempo inferiore rispetto alla prova con valvola di back pressure parzialmente aperta.

### 5.1.4 Andamento temporale della pressione calcolata nel collettore di scarico da 20''



La pressione con la valvola di back pressure totalmente aperta diminuisce rispetto a quella con valvola parzialmente aperta, ma non rispetta comunque le specifiche che impongono una pressione di 4.0 bar.

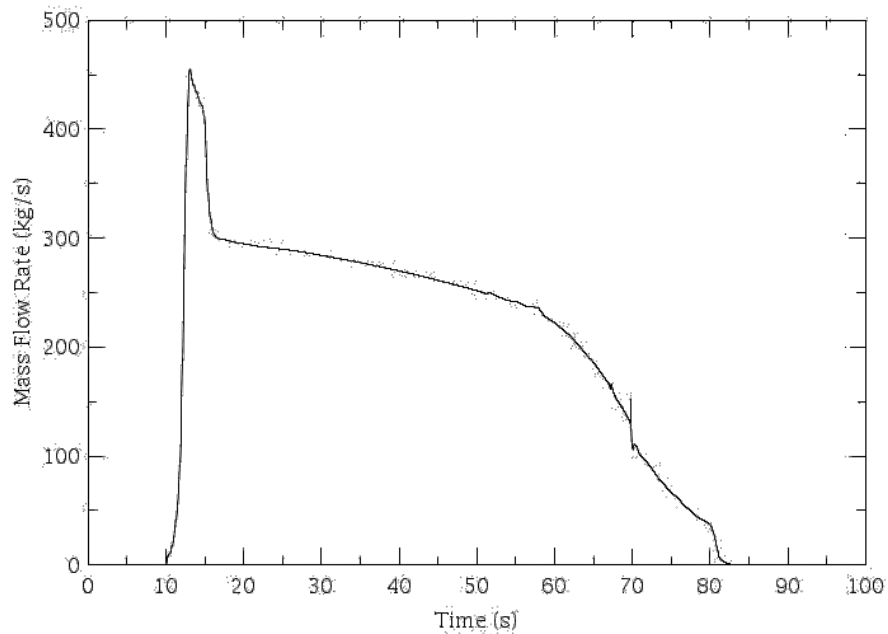
### 5.1.5 Corsa VR 1.1 vs tempo



La corsa della valvola ha un andamento simile a quello della prova con valvola di back pressure parzialmente aperta ma naturalmente rimane bloccata totalmente aperta molto prima a causa dello svuotamento veloce del pressurizzatore.

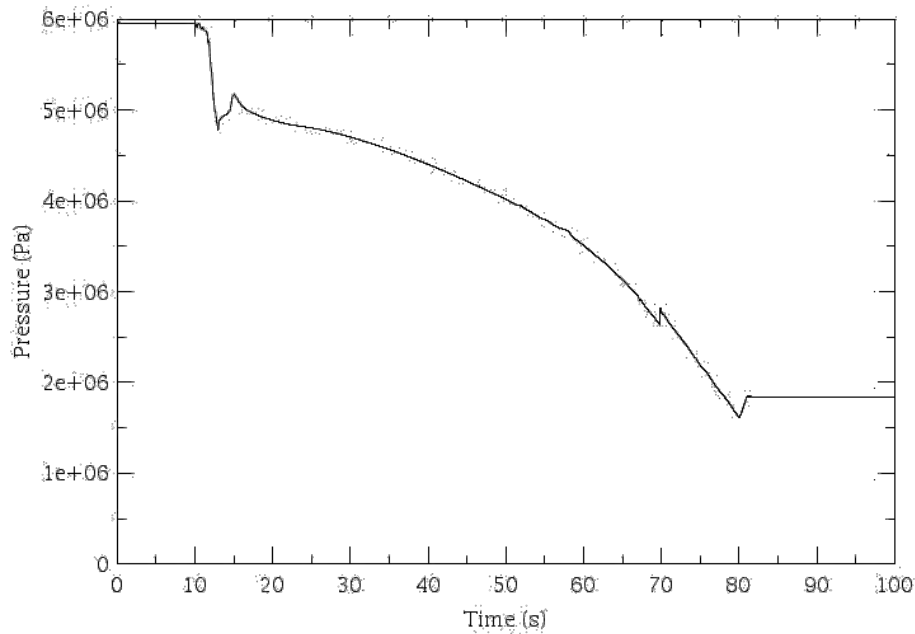
## 5.2 Prove con flusso di liquido inizialmente sottoraffreddato con valvola di back pressure totalmente aperta

### 5.2.1 Andamento temporale della portata calcolata attraverso il prototipo



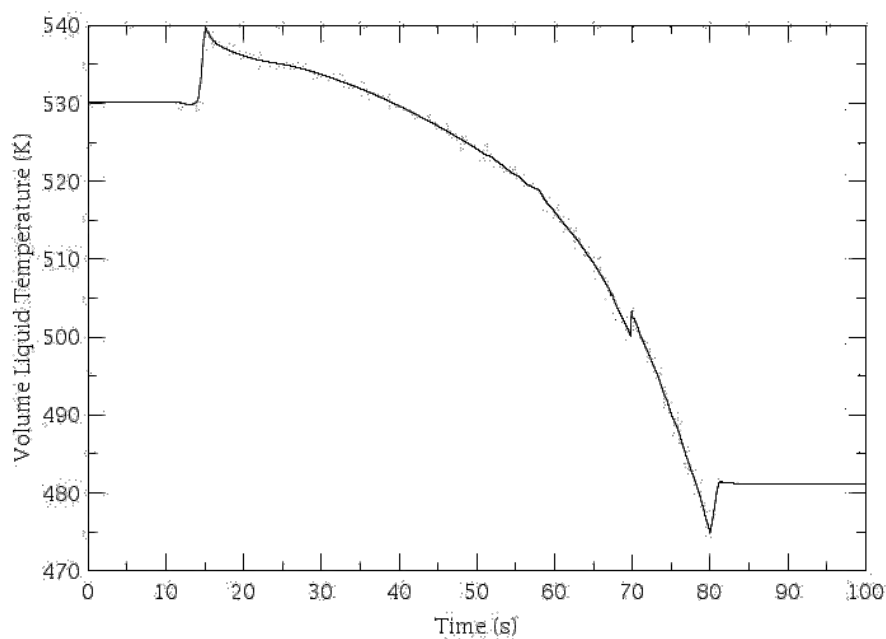
Lasciando la valvola di Back Pressure totalmente aperta la portata in massa di liquido aumenta assumendo un valore maggiore rispetto alle specifiche. L'andamento rimane simile a quello precedente, con la valvola parzialmente chiusa.

### 5.2.2 Andamento temporale della pressione calcolata all'ingresso del prototipo



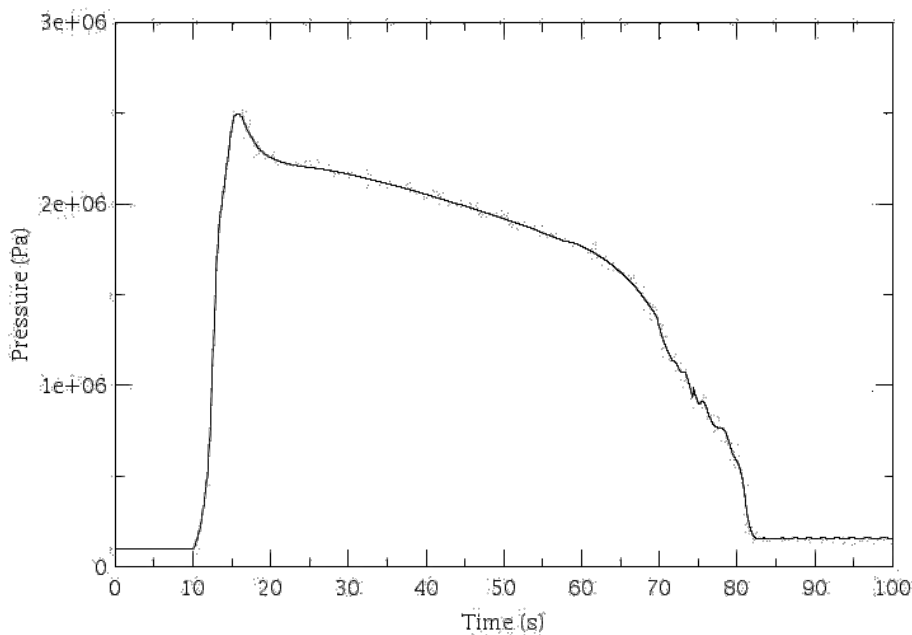
La pressione all'ingresso del prototipo diminuisce leggermente a causa della portata maggiore (quindi della maggiore velocità del fluido), che provoca perdite di carico maggiori a monte del prototipo.

### 5.2.3 Andamento temporale della temperatura calcolate all'ingresso del prototipo



La temperatura non subisce grosse variazioni, se non fosse per il fatto che alla fine della prova raggiunge un valore più basso rispetto alla prova con valvola di back pressure parzialmente aperta, grazie a un maggiore svuotamento del pressurizzatore

### 5.2.4 Andamento temporale della pressione calcolata nel collettore di scarico da 20''



La pressione con la valvola di back pressure totalmente aperta diminuisce rispetto a quella con valvola parzialmente aperta, ma non rispetta comunque le specifiche che impongono una pressione di 2.5 bar.

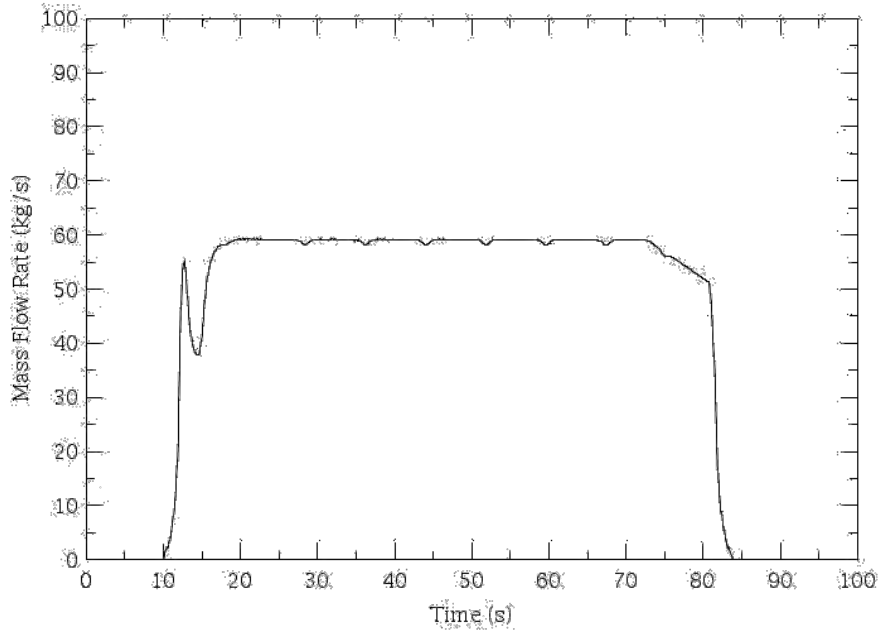
## 6 Risultati ottenuti

Per ottenere la portata in massa richiesta dalla matrice di prova si è scelto di modificare la valvola di Back Pressure e di prevedere l'installazione dell'otturatore, per semplicità con sezione di passaggio in corrispondenza dell'otturare proporzionale alla corsa dello stelo.

### 6.1 Prove con flusso di vapore saturo

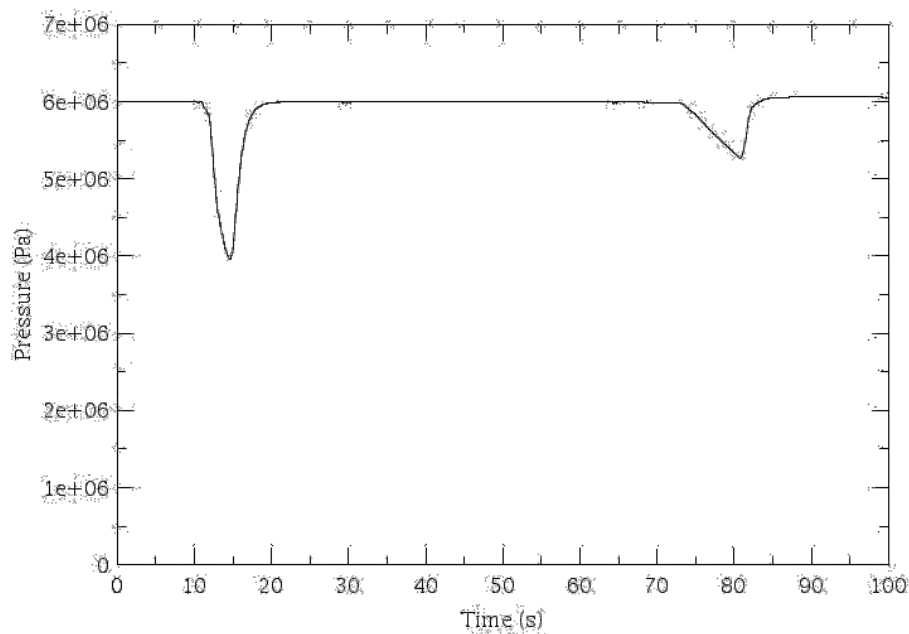
La presenza della forte perdita di carico concentrata causata dalla presenza della valvola parzialmente chiusa porta ai seguenti risultati.

### 6.1.1 Andamento temporale della portata calcolata attraverso il prototipo



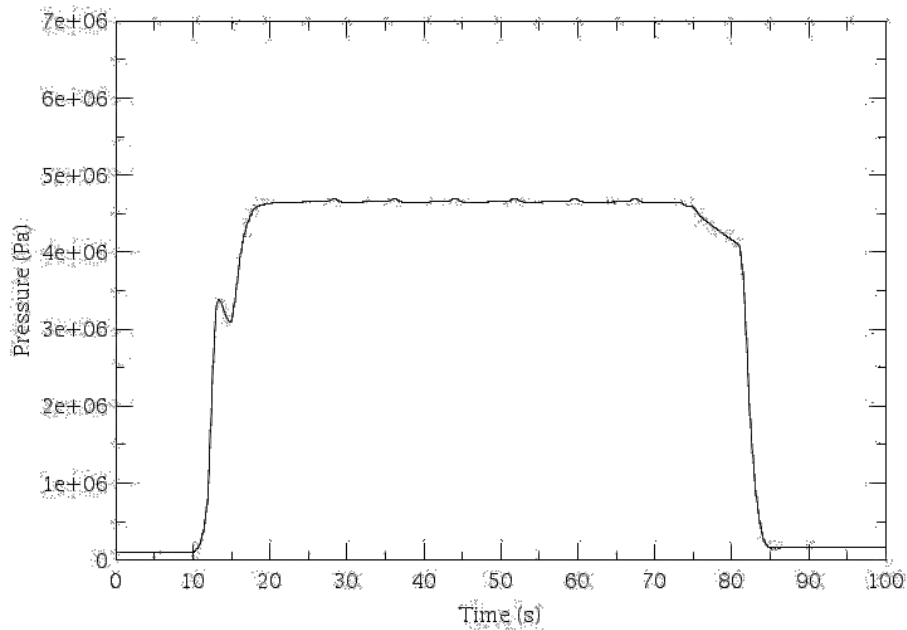
La portata di vapore per circa 50 s, grazie alla chiusura parziale della valvola di back pressure e all'azione di regolazione di VR 1.1, raggiunge il valore medio voluto di circa 58.3 kg/s con oscillazioni contenute intorno a tale valore.

### 6.1.2 Andamento temporale della pressione calcolata all'ingresso del prototipo



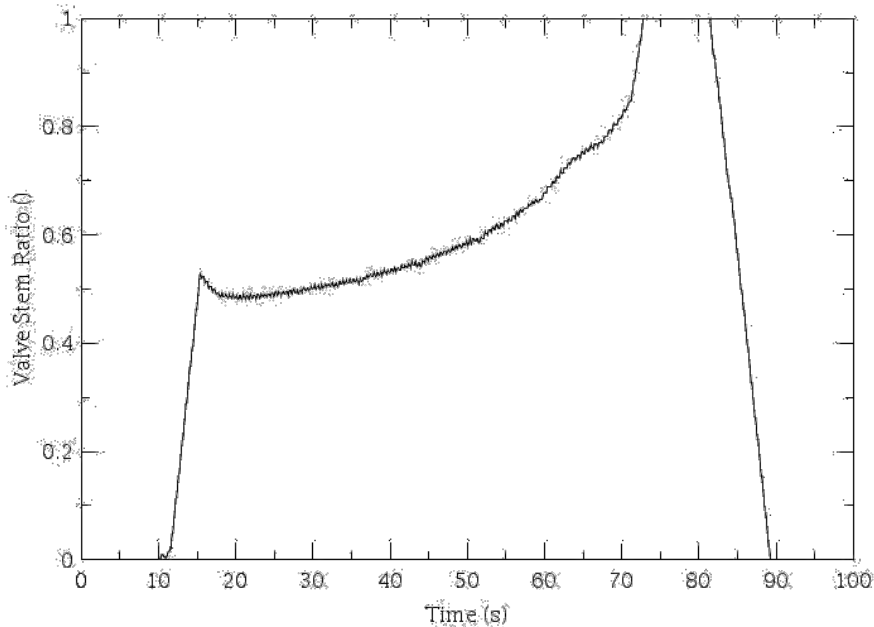
La pressione all'ingresso del prototipo per circa 50 s grazie all'azione di regolazione di VR 1.1 raggiunge e mantiene il valore voluto di circa 60 bar, fino a quando la pressione nel pressurizzatore scende sotto tale soglia.

### 6.1.3 Andamento temporale della pressione nel collettore di scarico da 20''



La pressione nel collettore da 20'' si mantiene intorno a un valore medio di circa 46.6 bar che non corrisponde però ai 2.5 bar richiesti dalla prova. Questo è dovuto alla notevole perdita di carico sulla valvola di back pressure, necessaria ad ottenere il basso valore di portata richiesto con la valvola prototipo tutta aperta.

## 6.1.4 Corsa VR 1.1 vs tempo



La valvola di regolazione VR 1.1 è stata simulata con velocità massima di attuazione pari 20 mm/s; per mantenere i parametri nel range richiesto deve seguire il profilo sopra descritto: la valvola, dopo un rapido transitorio iniziale, si apre gradualmente (diminuendo in progressione la perdita di carico da essa introdotta) mano a mano che la pressione nel pressurizzatore diminuisce fino al valore di soglia di 60 bar, oltre il quale la valvola rimane totalmente aperta senza però riuscire più a regolare la pressione. Va notato che per rendere così piatto l'andamento di pressioni e portate nel tempo è necessario sostituire la vecchia valvola presente sull'impianto (che ha una velocità massima di attuazione di 7.8 mm/s).

## 6.2 Prove con flusso di liquido inizialmente sottoraffreddato

### 6.2.1 Procedure operative

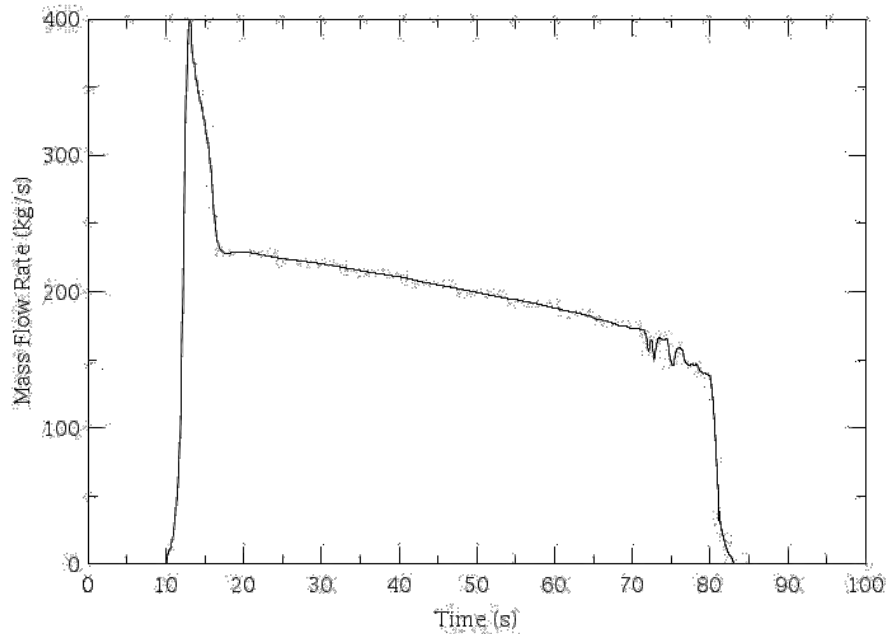
La prova sperimentale della valvola prototipo con flusso di liquido inizialmente sottoraffreddato è stata effettuata utilizzando la nodalizzazione dell'impianto sopra descritta. La modalità di esecuzione della prova è la seguente:

Il pressurizzatore, va riempito con 14985 kg di liquido saturo in equilibrio con la fase vapore a 59 bar, le tubazioni fino alla VL1 vanno riempite con liquido saturo a 59 bar mentre il tratto tra VL1 e il prototipo va riempito con liquido sottoraffreddato a 59 bar e 257 °C. La condizione "pronto a partire" è:

5. VL1 aperta
6. VL2 aperta
7. Valvola prototipo chiusa
8. Valvola di Back Pressure posizionata al 20.0% della corsa (0% chiusa-100% aperta)

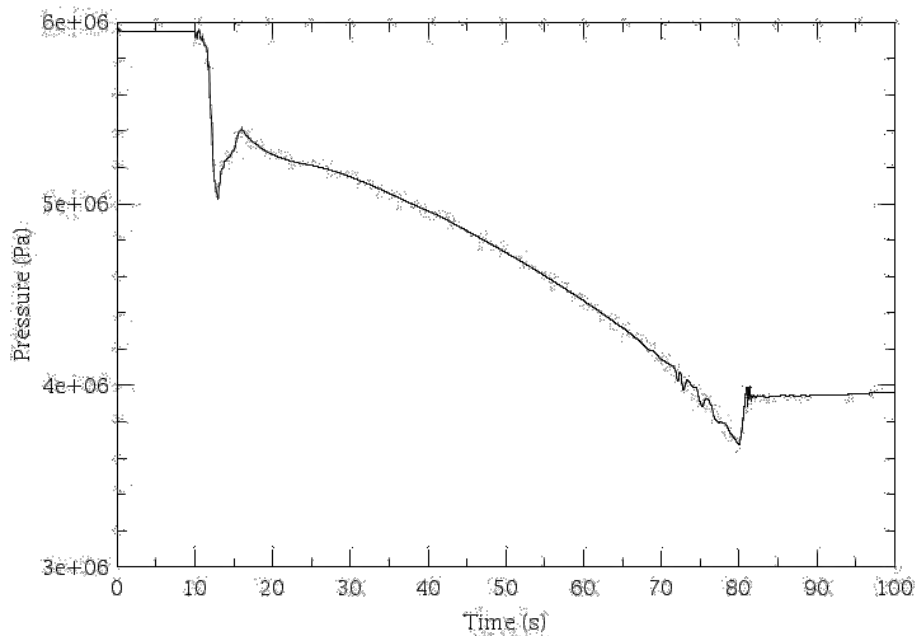
Si avvia la prova attuando in apertura il prototipo. Dopo un transitorio iniziale i parametri si stabilizzeranno, dopo 70 s dall'inizio della prova (nei grafici 80 s per tener conto dei primi 10 s di stazionario) si attua in chiusura il prototipo.

## 6.2.2 Andamento temporale della portata calcolata attraverso il prototipo



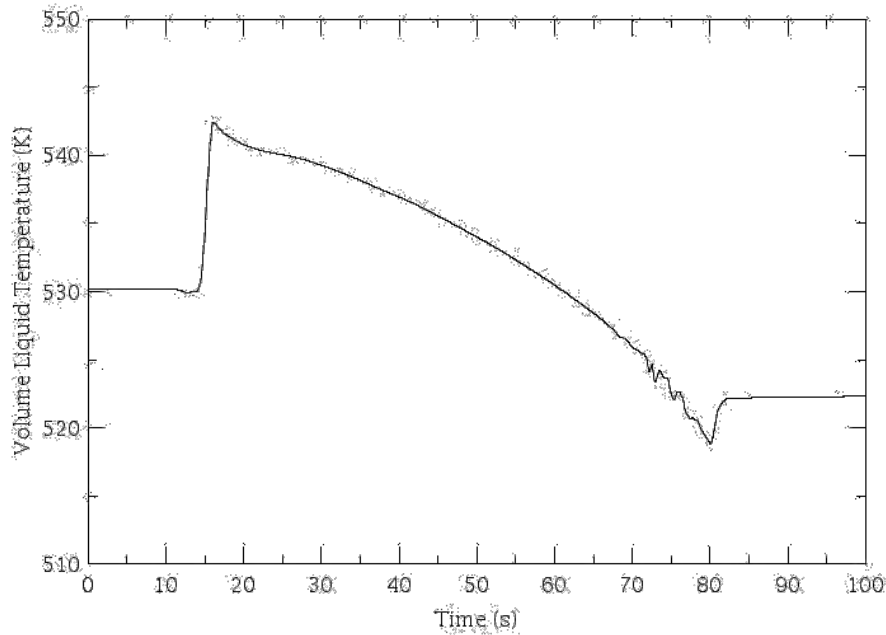
La portata di liquido per circa 50 s dopo un transitorio iniziale grazie alla chiusura parziale della valvola di back pressure segue un transitorio che parte da un valore maggiore della portata richiesta di 206.7 kg/s, per poi scendere quasi linearmente al di sotto di esso, ottenendo come valore medio il valore voluto.

## 6.2.3 Andamento temporale della pressione calcolata all'ingresso del prototipo



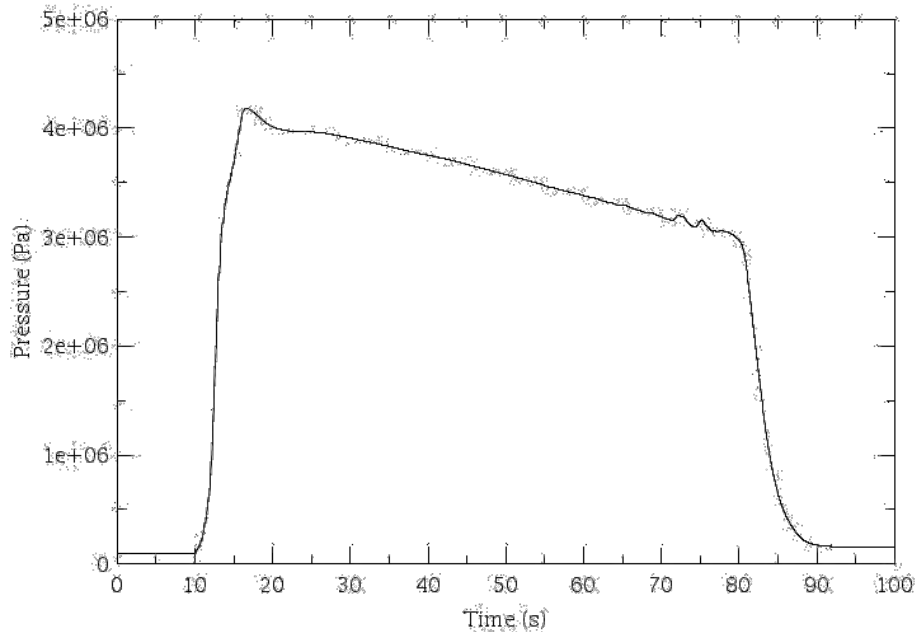
La pressione all'ingresso del prototipo durante i 10 s di stazionario assume il valore di 59.0 bar poiché il prototipo è direttamente a contatto con liquido sottoraffreddato a tale pressione. Non essendoci valvole di regolazione in moto per mantenere costante tale pressione, dopo un transitorio iniziale inizia progressivamente a diminuire seguendo l'andamento della pressione nel pressurizzatore che scende a causa del suo progressivo svuotamento.

### 6.2.4 Andamento temporale della temperatura calcolate all'ingresso del prototipo



La temperatura all'ingresso del prototipo durante lo stazionario assume il valore di 530.15 K poiché il prototipo è direttamente a contatto con liquido sottoraffreddato a tale temperatura. Non appena inizia la prova, la temperatura sembra mantenersi intorno allo stesso valore fino al momento in cui inizia a scorrere liquido inizialmente saturo proveniente dal pressurizzatore. Da questo istante sale velocemente, poi segue l'andamento della pressione ed inizia a diminuire fino alla conclusione della prova.

## 6.2.5 Andamento temporale della pressione nel collettore di scarico da 20''



La pressione nel collettore da 20'' dopo un transitorio iniziale, ha un andamento quasi lineare con valore medio di 35.5 bar, che come nell'altro caso è maggiore dei 4.0 bar richiesti. Anche in questo caso il valore elevato è dovuto alla notevole chiusura della valvola di backpressure per ottenere il valore di portata desiderato, fissato il valore della pressione a monte.

## 6.3 Prove con flusso bifase

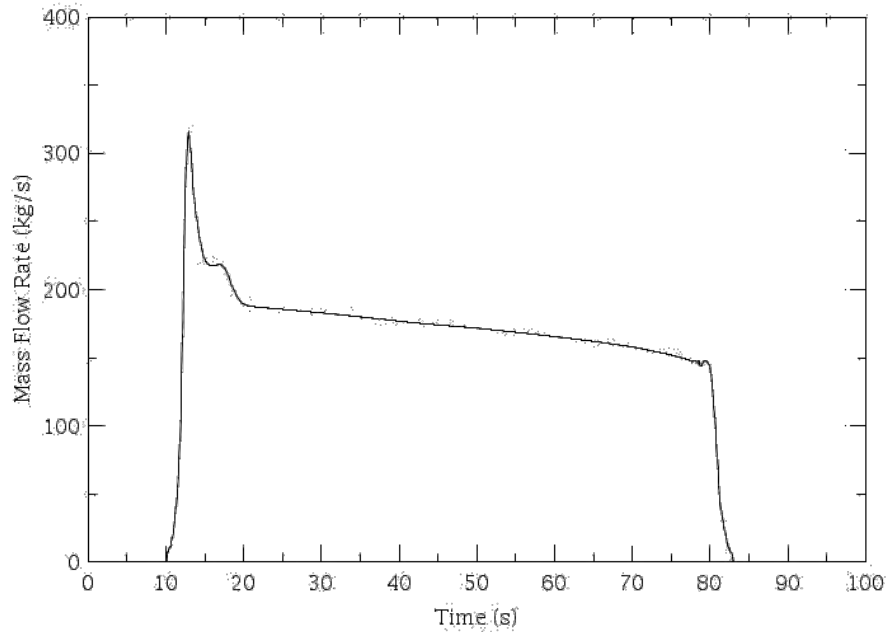
La prova sperimentale della valvola prototipo con flusso bifase è stata effettuata utilizzando la nodalizzazione dell'impianto sopra descritta. La modalità di esecuzione della prova è la seguente:

Il pressurizzatore, va riempito con 14930 kg di liquido saturo in equilibrio con la fase vapore a 44.2 bar, le tubazioni fino al prototipo vanno riempite con liquido saturo a 44.2 bar. La condizione "pronto a partire" è:

9. VL1 aperta
10. VL2 posizionata al 18.0% della corsa (0% chiusa-100% aperta)
11. Valvola prototipo chiusa
12. Valvola di Back Pressure aperta

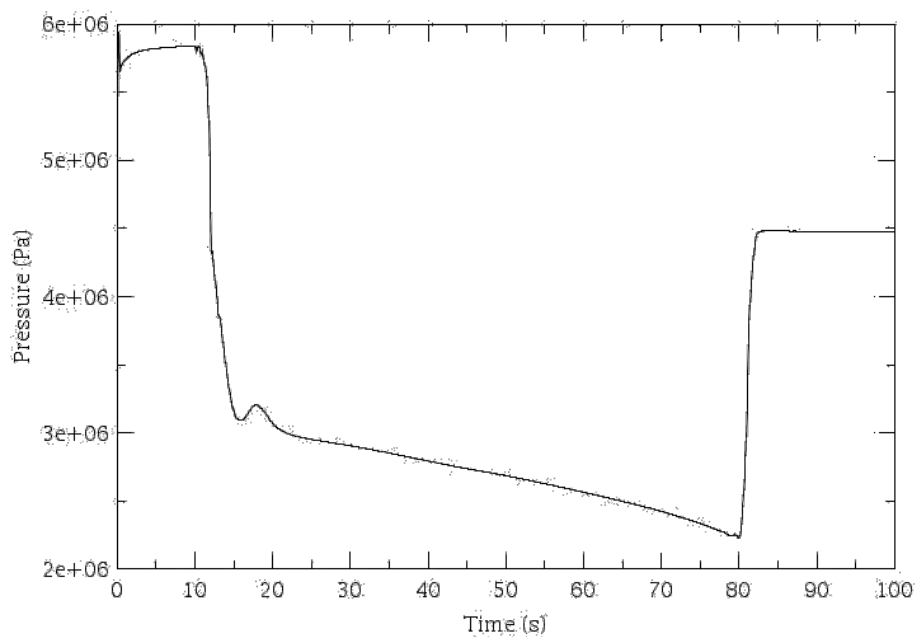
Si avvia la prova attuando in apertura il prototipo. Dopo un transitorio iniziale i parametri si stabilizzeranno, dopo 70 s dall'inizio della prova (nei grafici 80 s per tener conto dei primi 10 s di stazionario) si attua in chiusura il prototipo.

### 6.3.1 Andamento temporale della portata calcolata attraverso il prototipo



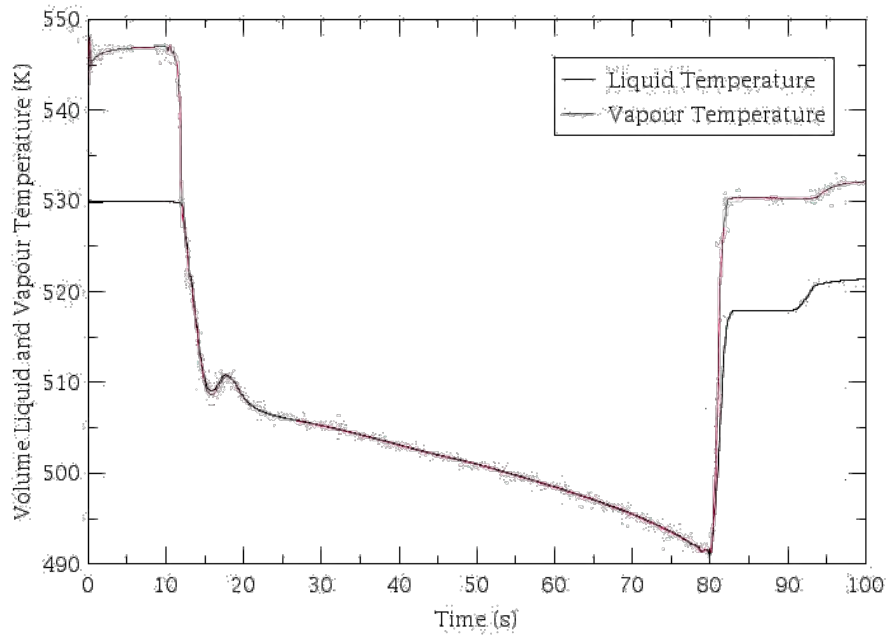
La portata di fluido bifase dopo un transitorio, scende con andamento quasi lineare mantenendosi per circa 60 s intorno a un valore medio di circa 170.3 kg/s, che è maggiore di 110 kg/s come da richiesta.

### 6.3.2 Andamento temporale della pressione calcolata all'ingresso del prototipo



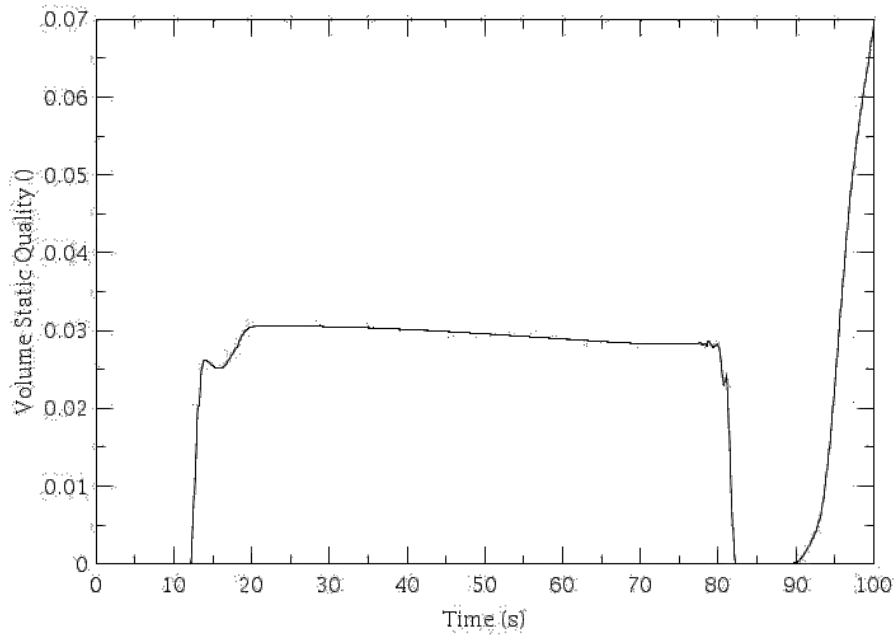
La pressione all'ingresso del prototipo dopo un transitorio iniziale, scende con andamento quasi lineare mantenendosi per circa 60 s intorno a un valore medio di circa 26.7 bar.

### 6.3.3 Andamento temporale della temperatura calcolata all'ingresso del prototipo



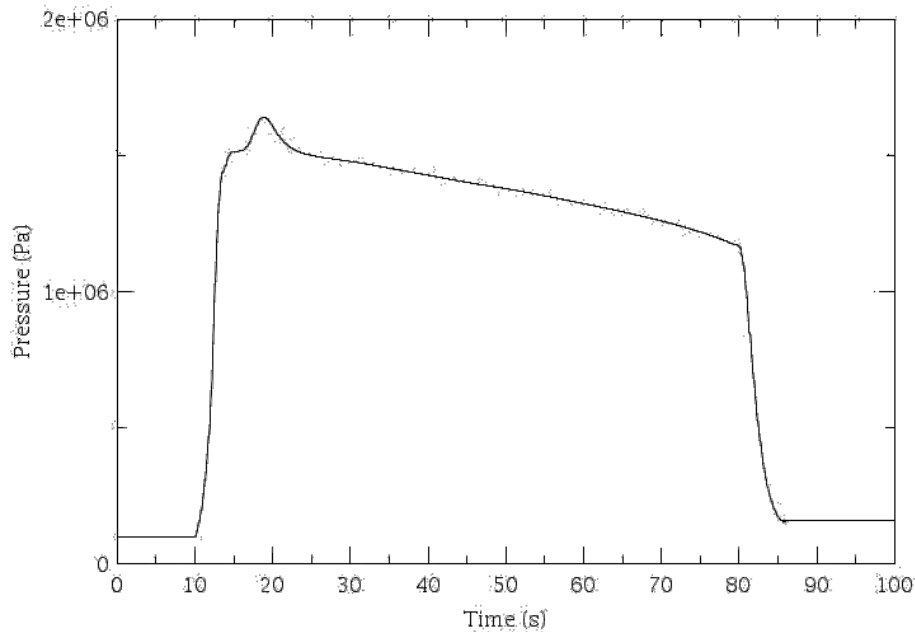
La temperatura sia del liquido che del vapore all'ingresso del prototipo dopo un transitorio iniziale, scendono con andamento quasi lineare mantenendosi per circa 60 s intorno a un valore medio di circa 500 K.

### 6.3.4 Andamento temporale del titolo di vapore all'ingresso del prototipo



Grazie alla chiusura parziale della valvola VL1, la pressione del fluido a valle di tale valvola è di circa 20 bar minore rispetto a quella a monte. Grazie a tale perdita di carico per circa 60 s il titolo della miscela dopo un transitorio iniziale, si stabilizza intorno a un valore medio del 2.95%, che soddisfa pienamente la richiesta di un titolo di circa il 3%.

### 6.3.5 Andamento temporale della pressione nel collettore di scarico da 20"



La pressione nel collettore da 20" dopo un transitorio iniziale, ha un andamento quasi lineare con valore medio di 13.7 bar, che però è maggiore dei 3.0 bar.

Le pressioni allo scarico come si può notare dai grafici non corrispondono ai valori richiesti; aprendo totalmente la valvola di backpressure (quindi variando portate e titoli che non corrisponderanno più ai valori indicati) si abbassa tale pressione ma non si ottengono comunque valori comparabili con quelli cercati, quindi è stata studiata la possibilità di variare la configurazione d' impianto e la modalità di prova

La soluzione migliore è la sostituzione del tubo di scarico da 10" schedula 40 simulato con il volume 340, con un volume di diametro maggiore, ad esempio 16" schedula 40, che consente di ridurre le perdite di carico nel tubo.

## 6.4 Modifica del lay-out dell'impianto

Per migliorare ulteriormente le prestazioni dell'impianto VAPORE ed aumentare la portata durante il transitorio si è studiata una modifica del collegamento della valvola prototipo al collettore di scarico; in questa seconda soluzione è previsto il collegamento tramite tre connessioni su quattro del collettore di scarico. In questo modo diminuisce la velocità media in ogni singolo tratto di collegamento e di conseguenza le perdite di carico del pezzo.

La seconda proposta di modifica riguarda il tratto di tubazione di scarico contenuta all'interno della piscina di soppressione.

Tutta la tubazione di scarico è da 16" sch. 80, mentre solo quel tratto è da 10" sch. 80: sostituendo questo tratto di tubazione (con un pipe 16" sch. 80) è emerso un lieve aumento della portata di deflusso lungo tutto il circuito.

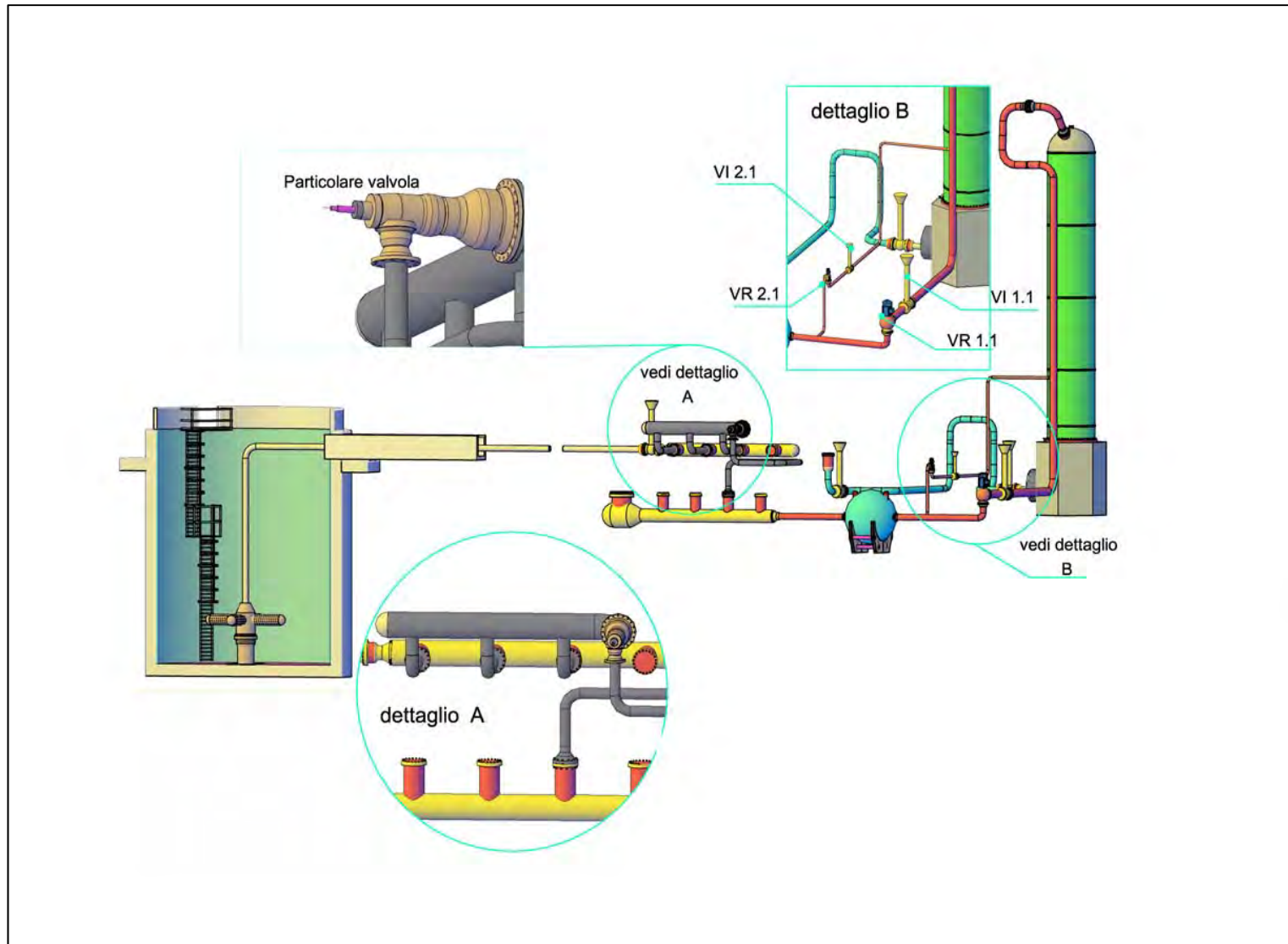


Figura 6-1 - Configurazione tubi di raccordo e valvola prototipo per prove con vapore

## 7 Conclusioni

Le prove di simulazione termoidraulica tramite codice RELAP5 dell'impianto VAPORE hanno permesso di valutare la fattibilità delle prove di qualifica della valvola prototipo in oggetto.

Si ha ragione di credere che i risultati siano significativi: dato che l'input è stato validato sulla base di risultati sperimentali. L'impianto VAPORE si è dimostrato essere in grado di eseguire, con ampio margine in eccesso sulle portate, le prove preventivate. Tuttavia si fa notare che per riprodurre esattamente la matrice di prova è necessario aggiungere una notevole perdita di carico tra la valvola prototipo e lo scarico, per ridurre la portata in massa fluente durante tutta la durata del transitorio. Questo è possibile inserendo l'otturatore nella valvola di Back Pressure presente sull'impianto, ottenendo così i risultati sopra presentati.

L'inconveniente causato ovviamente dall'inserimento di una notevole perdita di carico è l'innalzamento della pressione nel tratto di tubazione a monte della valvola di Back Pressure. Per evitarlo è stato deciso di mantenere la configurazione attuale del tratto di scarico dell'impianto, che non presenta l'otturatore nella valvola di Back Pressure e riprodurre le portate volute semplicemente con prove a pressione di set a monte della valvola prototipo ridotta.

I risultati ottenuti in questa configurazione rispecchiano i valori previsti di portata in massa.

## 8 Riferimenti

- Ref 1 USNRC: "RELAP5/MOD3.3 Code Manual – Volume II", Information System Laboratories Inc, Rockville, Maryland, March 2003
- Ref 2 Kim, S.-N., Griffith, P., 1987. PWR pressurizer modeling. Nuclear Engineering and Design 102 (2), 199–209
- Ref 3 S. L. Thompson and L. N. Kmetyk, RELAP5 Assessment: LOFT Large Break Loss-of-Coolant Experiment L2-5, NUREG/CR-3608, SAND83-2549, January 1984
- Ref 4 R. E. Henry. "The Two Phase Critical Discharge of Initially Saturated or Subcooled Liquid." Nuclear Science and Engineering. 41. 1970. pp. 336-342.
- Ref 5 R. E. Henry and H. K. Fauske. "The Two-Phase Critical Flow of One-Component Mixtures in Nozzles, Orifices, and Short Tubes." Transactions of ASME, Journal of Heat Transfer. 93. 1971. pp. 179-187
- Ref 6 I.E. Idelchik "HANDBOOK of HYDRAULIC RESISTANCE, 3rd Edition" Begell House 1996