



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



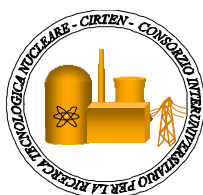
*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

*SIET 01 605 ST10*

### Strumentazione speciale per l'impianto sperimentale SPES-3

*S. Gandolfi, M. Greco*



## STRUMENTAZIONE SPECIALE PER L'IMPIANTO SPERIMENTALE SPES-3

S. Gandolfi, M. Greco

Settembre 2010

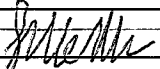
Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Nuovo Nucleare da Fissione

Responsabile Tema: Stefano Monti, ENEA

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |             |            |                                                |                                                                                      |               |                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>ENEA</b> Ricerca Sistema Elettrico                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |             |            | Sigla di identificazione<br>NNFISS – LP2 - 011 |                                                                                      | Distrib.<br>L | Pag.<br>1                                                                             | di |
| <b>Titolo</b><br><br>Strumentazione speciale per l'impianto sperimentale SPES-3:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |             |            |                                                |                                                                                      |               |                                                                                       |    |
| <b>Ente emittente:</b> SIET                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |             |            |                                                |                                                                                      |               |                                                                                       |    |
| <h1>PAGINA DI GUARDIA</h1>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |             |            |                                                |                                                                                      |               |                                                                                       |    |
| <b>Descrittori</b><br>Tipologia del documento:    Rapporto tecnico/Technical Report<br>Collocazione contrattuale:    Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"<br>Argomenti trattati:            Reattori ad acqua leggera/Light Water Reactors                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |             |            |                                                |                                                                                      |               |                                                                                       |    |
| <b>Sommario</b><br>Questo rapporto è stato emesso nell'ambito del secondo PAR dell'accordo di programma ENEA-MSE e costituisce uno dei deliverable dell'obiettivo C "Prova Integrale IRIS – Selezione della strumentazione speciale" della linea progettuale LP2 "Reattori Evolutivi INTD - International Near Term Deployment" del tema di ricerca "Nuovo Nucleare da Fissione".<br>Il documento riporta i risultati delle indagini effettuate sia nel settore accademico sia tra i produttori internazionali di strumentazione per l'individuazione di dispositivi utilizzabili per le misure della portata bifase nell'impianto SPES3 e la definizione di tecniche di misura potenzialmente applicabili. In particolare il documento riassume le informazioni sulle necessità di misura di portata bifase nell'impianto SPES3 e le condizioni operative ai punti di misura, con i relativi vincoli e limiti imposti dalla geometria dell'impianto, ed individua gli strumenti, che potrebbero essere usati senza particolari modifiche, e quelli che, invece, richiedono adeguamenti con particolari accorgimenti tecnici. |             |            |                                                |                                                                                      |               |                                                                                       |    |
| <b>Note</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |             |            |                                                |                                                                                      |               |                                                                                       |    |
| <b>Copia n.</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |             |            | <b>In carico a:</b>                            |                                                                                      |               |                                                                                       |    |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |             |            | NOME                                           |                                                                                      |               |                                                                                       |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |             |            | FIRMA                                          |                                                                                      |               |                                                                                       |    |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |             |            | NOME                                           |                                                                                      |               |                                                                                       |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |             |            | FIRMA                                          |                                                                                      |               |                                                                                       |    |
| 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | EMISSIONE   | 28/09/2010 | NOME                                           | F. Bianchi                                                                           |               | S. Monti                                                                              |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |             |            | FIRMA                                          |  |               |  |    |
| REV.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | DESCRIZIONE | DATA       |                                                | CONVALIDA                                                                            | VISTO         | APPROVAZIONE                                                                          |    |



Società Informazioni Esperienze Termoidrauliche  
Via Nino Bixio, 27 - 29100 Piacenza (I)

**EMITTENTE***issued by***Unità di Produzione***Production Unit***Laboratorio Prove Grandi Impianti**

|                                  |                                        |                                  |                                            |
|----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>CLIENTE:</b> ENEA<br>Client : | <b>COMMESSA:</b> 1PN000CA90245<br>job: | <b>DISCO:</b> CA90245/3<br>disk: | <b>PAGINA:</b> 1 <b>DI:</b> 51<br>page: of |
|----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|

|                                     |                     |
|-------------------------------------|---------------------|
| <b>IDENTIFICATIVO:</b><br>document: | <b>01 605 ST 10</b> |
|-------------------------------------|---------------------|

|                                      |
|--------------------------------------|
| <b>Classe Ris.:</b><br>Confidential: |
|--------------------------------------|

|                                 |
|---------------------------------|
| <b>ALLEGATI:</b><br>Enclosures: |
|---------------------------------|

|                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>TITOLO:</b> STRUMENTAZIONE SPECIALE PER L'IMPIANTO SPERIMENTALE SPES-3<br>Title: |
|-------------------------------------------------------------------------------------|

|                                                         |
|---------------------------------------------------------|
| <b>REDATTORI:</b> S. Gandolfi, M. Greco<br>prepared by: |
|---------------------------------------------------------|

**LISTA DI DISTRIBUZIONE**  
*distribution list*

|             |                   |
|-------------|-------------------|
| ENEA        | Renato Tinti      |
| ENEA        | Fosco Bianchi     |
| SIET S.p.A. | Andrea Achilli    |
| SIET S.p.A. | Gustavo Cattadori |
| SIET S.p.A. | Stefano Gandolfi  |
| SIET S.p.A. | Matteo Greco      |
| SIET S.p.A. | Roberta Ferri     |
| SIET S.p.A. | Cinzia Congiu     |
| SIET S.p.A. | Gaetano Tortora   |

|              |              |                            |                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                              |
|--------------|--------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0            | 14/07/2010   | Emissione                  | <div>S.Gandolfi<br/><br/>M. Greco<br/></div> | <div>Achilli<br/></div> |
| REV.<br>Rev. | DATA<br>date | DESCRIZIONE<br>description | REDAZIONE<br>prepared by                                                                                                                                                                                             | APPROVAZIONE<br>approved by                                                                                  |

Informazioni strettamente riservate di proprietà SIET SpA - Da non utilizzare per scopi diversi da quelli per cui sono state fornite.  
*Confidential information property of SIET SpA - Not to be used for any purpose other than those for which it is supplied.*

## SOMMARIO

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| SOMMARIO                                                                                       | 2  |
| LISTA DELLE TABELLE                                                                            | 3  |
| LISTA DELLE FIGURE                                                                             | 4  |
| LISTA DEGLI ACRONIMI                                                                           | 5  |
| 1. OBIETTIVO                                                                                   | 6  |
| 2. INTRODUZIONE                                                                                | 7  |
| 3. NECESSITA' DI MISURA                                                                        | 8  |
| 4. CONDIZIONI DI ESERCIZIO                                                                     | 12 |
| 5. STRUMENTAZIONE DISPONIBILE PER LA MISURA DI PORTATA                                         | 16 |
| 5.1 Misure di portata in monofase                                                              | 16 |
| 5.1.1 Misuratori a strozzamento                                                                | 17 |
| 5.2 Misure di portata massica in bifase                                                        | 21 |
| 6. STRUMENTAZIONE SPECIALE: SPOOL PIECE                                                        | 23 |
| 6.1 Generalità                                                                                 | 23 |
| 6.2 Criteri generali di selezione                                                              | 25 |
| 6.3 Indagine Conoscitiva                                                                       | 25 |
| 6.3.1 Esperienze SIET                                                                          | 26 |
| 6.3.2 Esperienze Politecnico di Torino                                                         | 27 |
| 6.3.3 Contatto con produttori SPOOL PIECE                                                      | 28 |
| 6.3.4 Utilizzo di uno strumento di tipo elettrico per la misura della spessore di film liquido | 28 |
| 6.4 Misuratore di frazione di vuoto                                                            | 29 |
| 6.4.1 Strumenti commerciali                                                                    | 29 |
| 6.4.2 Strumenti sviluppati in ambito accademico                                                | 31 |
| 6.4.3 Opzioni per il futuro                                                                    | 35 |
| 6.5 Misuratore di velocità del fluido                                                          | 36 |
| 6.5.1 Strumenti commerciali                                                                    | 36 |
| 6.5.2 Opzioni per il futuro                                                                    | 39 |
| 6.6 Misura della quantità di moto                                                              | 41 |
| 6.6.1 Strumenti commerciali                                                                    | 41 |
| 6.6.2 Opzioni per il futuro                                                                    | 41 |
| 7. CONCLUSIONI                                                                                 | 42 |
| ELENCO POTENZIALI COSTRUTTORI E FORNITORI per dispositivi SPOOL PIECE                          | 44 |
| BIBLIOGRAFIA                                                                                   | 48 |

## LISTA DELLE TABELLE

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabella 1: Linee che richiedono l'installazione di strumentazione speciale per misura di portata bifase .....                                                       | 11 |
| Tabella 2: Massimi e minimi valori delle principali variabili termodinamiche a monte e a valle della valvola di rottura sulla linea SPLIT del DVI .....             | 13 |
| Tabella 3: Massimi e minimi valori delle principali variabili termodinamiche a monte e a valle della valvola di rottura sulla linea SPLIT del EBT .....             | 13 |
| Tabella 4: Massimi e minimi valori delle principali variabili termodinamiche a monte e a valle della valvola di rottura sulla linea SPLIT del ADS ST .....          | 13 |
| Tabella 5: Massimi e minimi valori delle principali variabili termodinamiche a monte e a valle della valvola sulla linea ADS ST stadio I .....                      | 14 |
| Tabella 6: Massimi e minimi valori delle principali variabili termodinamiche a monte e a valle della valvola sulla linea ADS DT stadio I .....                      | 14 |
| Tabella 7: Principali strumenti per la determinazione della portata in monofase .....                                                                               | 17 |
| Tabella 8: Strumentazione utilizzabile per SPOOL PIECE .....                                                                                                        | 26 |
| Tabella 9: Massimi e minimi valori della densità di miscela e della frazione di vuoto a monte e valle della generica rottura .....                                  | 29 |
| Tabella 10: Massimi e minimi valori delle velocità della fase liquida e gassosa a monte e valle della generica rottura e del segnale teorico della turbinetta ..... | 36 |
| Tabella 11: Massimi e minimi valori del flusso della quantità di moto a monte e valle della generica rottura stimato dal drag disk .....                            | 41 |
| Tabella 12: Situazione degli strumenti idonei per SPOOL PIECE .....                                                                                                 | 43 |

## LISTA DELLE FIGURE

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Schema dell'impianto SPES3 e indicazione delle posizioni di rottura .....                        | 9  |
| Figura 2: Simulazione di una tipica rottura su SPES3 con l'indicazione delle 3 valvole coinvolte.....      | 10 |
| Figura 3: Simulazione dei condotti dell'ADS con l'indicazione delle valvole coinvolte.....                 | 10 |
| Figura 4: Linea dell'ADS ST e linee di rottura con nodalizzazione in RELAP5.....                           | 11 |
| Figura 5: Venturimetro con manometro ad U .....                                                            | 17 |
| Figura 6: Venturimetro con manometro analogico .....                                                       | 17 |
| Figura 7: Diaframma con manometro ad U .....                                                               | 18 |
| Figura 8: Diaframma – particolare del foro .....                                                           | 18 |
| Figura 9: Misuratore a turbina .....                                                                       | 19 |
| Figura 10: Misuratore di portata a generazione di vortici e funzionamento .....                            | 20 |
| Figura 11: Misuratore di portata ad effetto Coriolis .....                                                 | 21 |
| Figura 12: Esempio di SPOOL PIECE composto da una turbina, una drag disk e un gammadensitometro..          | 25 |
| Figura 13: Rappresentazione del dispositivo in grado di misurare lo spessore dello strato di liquido ..... | 28 |
| Figura 14: Gammadensitometro a tre raggi.....                                                              | 30 |
| Figura 15: Sonda ad ago .....                                                                              | 31 |
| Figura 16: Fibra ottica per la misura di frazione di vuoto e funzionamento.....                            | 31 |
| Figura 17: Sonde conduttive ad ago per misura locale e dimostrazione del principio di misura .....         | 32 |
| Figura 18: Gammadensitometro e semplice rappresentazione del funzionamento .....                           | 32 |
| Figura 19: Wire mesh sensor .....                                                                          | 33 |
| Figura 20: Tipica configurazione della sonda capacitiva integrale ad anelli o capacitive wire.....         | 34 |
| Figura 21: Turbine per misura di velocità di fluido.....                                                   | 37 |
| Figura 22: Misuratori a generazione di vortici per misure bifase.....                                      | 38 |
| Figura 23: Schema di funzionamento del sistema ad “onde di pressione” .....                                | 40 |

## LISTA DEGLI ACRONIMI

|        |                                                      |
|--------|------------------------------------------------------|
| ADS    | Automatic Depressurization System                    |
| DEG    | Double Ended Guillotine                              |
| DT     | Double Train                                         |
| DVI    | Direct Vessel Injection                              |
| DW     | Dry Well                                             |
| FL     | Feed Line                                            |
| GV     | Generatore di Vapore                                 |
| LGMS   | Long term Gravity Makeup System                      |
| LOCA   | Loss of Coolant Accident                             |
| PWR    | Pressurized Water Reactor                            |
| PSS    | Pressure Suppression System                          |
| PET    | Positron Electron Tomography                         |
| QT     | Quench Tank                                          |
| RC     | Reactor Cavity                                       |
| SL     | Steam Line                                           |
| SBLOCA | Small Break Loss of Coolant Accident                 |
| SMR    | Small Modular Reactor                                |
| SPES3  | Simulatore Pressurizzato per Esperienze di Sicurezza |
| ST     | Single Train                                         |
| US-NRC | United States Nuclear Regulatory Commission          |

## 1. OBIETTIVO

L'obiettivo di questo documento è quello di descrivere le attività che la SIET ha condotto con lo scopo di approvvigionare la strumentazione speciale per le misure della portata bifase nell'impianto SPES3.

Il documento riassume le caratteristiche della strumentazione che potenzialmente soddisfa i requisiti di misura e le ricerche fatte per reperirla sul mercato, in ambito universitario o presso centri di ricerca. Il documento dà inoltre risalto a quegli strumenti commerciali che potrebbero essere usati senza particolari modifiche e a quelli che invece necessiterebbero di adeguamenti con particolari accorgimenti tecnici.

## 2. INTRODUZIONE

L'impianto SPES3 (Simulatore Pressurizzato per Esperienze di Sicurezza) è un simulatore integrale del reattore IRIS, capace di verificare la risposta del reattore a fronte di transitori incidentali e fornire dati sperimentali per la validazione di codici di calcoli per le analisi di sicurezza dell'impianto IRIS.

Il reattore IRIS è un reattore nucleare avanzato di media taglia, basato sulla tecnologia dei reattori pressurizzati ad acqua (PWR), con un'innovativa configurazione integrale e sistemi di sicurezza tali da far fronte a incidenti di perdita di refrigerante (LOCA) attraverso un accoppiamento dinamico tra il primario e il sistema di contenimento. Il progetto è sviluppato da un consorzio internazionale, guidato da Westinghouse, che include industrie, università e enti di ricerca.

Il circuito primario, i circuiti secondari e il sistema di contenimento sono simulati in SPES3 con scalatura 1:100 in volume e in potenza, 1:1 in altezza e fluido alle condizioni nominali di pressione e temperatura di un reattore modulare di piccola taglia (SMR), quale IRIS.

La matrice di prova [1] prevede la simulazione di una serie di SBLOCA e rotture sul circuito secondario, i cui dati saranno essenziali per il processo di certificazione del reattore da parte dell'USNRC.

Per ogni transitorio previsto dalla matrice di prova è necessaria la misura della portata massica e dell'energia uscente dalla rottura, per verificare che, anche a fronte di un incidente, l'impianto possa essere gestito in condizioni di sicurezza.

A causa della notevole differenza di pressione tra i circuiti primario e secondario, rispettivamente a 155.5 e 58.3 bar, rispetto ai sistemi di contenimento a pressione ambiente, in caso di rottura si verifica la presenza di flusso bifase nei condotti di collegamento tra il punto di rottura ed il componente di raccolta del fluido uscente. Pertanto, i punti di misura dei circuiti idraulici a monte e a valle della valvola di rottura sono interessati dalla presenza di fluido bifase.

Le misure bifase sono necessarie per ricostruire la distribuzione di massa ed energia tra i diversi componenti.

L'utilizzo del codice termoidraulico RELAP5 per la simulazione dell'impianto SPES3, in particolare per la simulazione dei transitori incidentali, ha permesso di ottenere i dati e le condizioni di riferimento dei principali parametri termoidraulici e l'individuazione dei punti di misura interessati da portata bifase. Sempre sulla base dei dati forniti da RELAP5 sono state specificate le condizioni termodinamiche delle grandezze interessate ai deflussi bifase su SPES3 [2].

L'analisi dei dati forniti dai calcoli mostra che la portata bifase è determinata inizialmente dall'efflusso critico, mentre è guidata dalla differenza di pressione durante il resto del transitorio.

La determinazione di grandezze fisiche, quali la portata massica e l'energia trasportata, non è realizzabile mediante misure dirette, ma va ottenuta indirettamente dalla misura di grandezze come la velocità, la densità del fluido e del grado di vuoto, come riportato nel documento [3].

Il documento [3] presenta uno studio analitico approfondito sulle correlazioni dei segnali di frazione di vuoto, quantità di moto e velocità del fluido al fine di determinare la portata bifase, il titolo e la velocità delle parti gassosa e liquida. I risultati sono stati verificati numericamente con l'utilizzo del codice termoidraulico RELAP5.

La scelta della strumentazione riveste una notevole importanza ai fini dell'ottenimento di risultati sperimentali validi. Il complesso di misura adottato, Spool Piece, sarà costituito da tre strumenti eterogenei scelti in base al tipo di grandezza da misurare. Un ulteriore aspetto importante per la determinazione del tipo di strumenti è la minimizzazione della perturbazione del moto del fluido, pertanto si cercherà di utilizzare strumentazione poco invasiva o comunque saranno adottati accorgimenti di installazione tali da limitare ogni perturbazione.

Questo documento riassume le informazioni sulle necessità di misura di portata bifase in SPES3 e le condizioni operative ai punti di misura, con i relativi vincoli e limiti imposti dalla geometria dell'impianto.

Sono riportati i risultati delle indagini rivolte sia nel settore accademico sia tra i produttori internazionali di strumentazione per l'identificazione dei possibili dispositivi utilizzabili e la definizione di tecniche di misura potenzialmente applicabili.

Un elenco di aziende produttrici di strumentazione e, quando disponibile, la bibliografia di riferimento, composta da articoli, cataloghi, testi specialistici e altro sono riportati alla fine del presente documento.

Infine sono delineati i percorsi di ricerca e le attività future che devono essere intrapresi al fine di misurare la portata bifase di SPES3.

### 3. NECESSITA' DI MISURA

L'impianto SPES3 ha come obiettivo la simulazione dei transitori incidentali previsti per il reattore IRIS, in particolare gli incidenti di perdita di refrigerante, causati da rotture istantanee delle tubazioni connesse direttamente al Reactor Vessel (LOCA), delle linee di alimento dei generatori di vapore e delle linee vapore. Le rotture simulate sono di due tipi: rottura semplice (fessura su un tubo, SPLIT) e rotture a ghigliottina (tranciatura netta del tubo con disassamento delle due parti, DEG). L'analisi degli incidenti previsti è riportata nel documento [4].

In condizioni stazionarie, l'impianto si trova con i circuiti primario, secondari e contenimento alle condizioni nominali del reattore IRIS. L'incidente di rottura viene simulato con l'apertura di opportune valvole attraverso le quali avviene il trasferimento del fluido da una zona all'altra dell'impianto. In serie alle valvole, sono posizionati degli orifizi che riproducono in scala l'area nominale della rottura; in essi si stabilisce solitamente un efflusso critico.

In diversi casi, elencati nel documento [2], il flusso bifase, che transita entro le tubazioni che simulano le rotture, non richiede misurazione con strumentazione speciale per portate bifase, poiché il grado di vuoto rimane sempre pressoché pari a 1 o l'entità della massa è ininfluenza per il sistema nel suo complesso.

La Figura 1 presenta lo schema dell'impianto SPES3 con l'indicazione dei cinque punti di rottura:

- ▶ *Rottura del DVI*, Direct Vessel Injection, che simula la rottura della tubazione più bassa del vessel. Durante la simulazione dell'incidente, l'acqua dal Reactor Vessel si riversa nella Cavity passando da condizioni di alta pressione e alta temperatura (155.5 bar e temperatura 292 °C) a condizioni di pressione e temperatura ambiente. La rottura SPLIT è simulata semplicemente aprendo la valvola sulla linea SPLIT, mentre la rottura DEG è simulata aprendo entrambe le valvole sulle linee SPLIT e DEG e chiudendo la valvola sul DVI, Figura 2. Nel caso della DEG, entrambi i rami del DVI, connessi rispettivamente al Reactor Vessel e al contenimento, sono simulati. Ciascun ramo sperimenta portata bifase, ma solo la linea SPLIT (lato RV) richiede la misurazione della portata, come indicato nel documento [2].
- ▶ *Rottura dell'EBT*, Emergency Boration Tank, che simula la rottura più alta, lato acqua, che si può verificare nel reattore IRIS. Rappresenta il punto di connessione tra il RV e la sommità dell'EBT. Durante la simulazione dell'incidente, il fluido si riversa nel Dry Well, passando da condizioni di alta pressione e temperatura (155.5 bar e 330 °C) a condizioni di pressione e temperatura ambiente. Come per il DVI, è possibile simulare rotture SPLIT e DEG. Nel caso della DEG, entrambi i rami connessi al RV e al contenimento sperimentano portata bifase, ma solo la linea SPLIT richiede la misurazione della portata, come indicato nel documento [2].
- ▶ *Rottura dell'ADS*, Automatic Depressurization System, che simula la rottura dello Stage-I di uno dei tre treni dell'ADS in IRIS. In SPES3, dove i tre treni sono simulati con due treni, Single e Double, la rottura dell'ADS è la rottura del ST. Essa rappresenta la rottura della tubazione più alta del RV, alla sommità del pressurizzatore. Durante la simulazione dell'incidente, il vapore presente nel pressurizzatore (155.5 bar, 345°C) si riversa nel Dry Well, a pressione e temperatura ambiente. Anche per l'ADS, possono essere simulate sia rotture SPLIT che DEG. Nel caso della DEG, entrambi i rami connessi al RV e al contenimento sperimentano portata bifase, ma solo la linea SPLIT richiede la misurazione della portata stessa, come indicato nel documento [2].
- ▶ *Rottura della FL*, Feed Line, che simula la rottura del tubo che alimenta i generatori di vapore. Durante la simulazione dell'incidente, l'acqua del circuito secondario si riversa nella Cavity passando da condizioni di alta pressione e temperatura (58.3 bar, e 224 °C) a pressione e temperatura ambiente. Le rotture SPLIT e DEG possono essere entrambe simulate, ma nessuna richiede la misura di portata con strumentazione speciale, come indicato nel documento [2].
- ▶ *Rottura della SL*, Steam Line, che simula la rottura della linea vapore in uscita dai generatori di vapore. Durante la simulazione dell'incidente, il vapore del circuito secondario si riversa nel DW passando da condizioni di alta pressione e temperatura (58.3 bar, 323°C) a pressione e temperatura ambiente. Le rotture SPLIT e DEG possono essere entrambe simulate, ma nessuna richiede la misura di portata con strumentazione speciale, come indicato nel documento [2].
- ▶ Durante transitori di rottura del DVI, EBT e ADS, si ha la depressurizzazione del circuito primario. In seguito al contemporaneo segnale di alta pressione sul contenimento e bassa pressione sul pressurizzatore, per questi incidenti, si ha l'apertura automatica delle valvole poste sulle linee ADS ST e DT, stadio I e stadio II, come indicato in Figura 3. Queste quattro linee presentano condizioni bifase, ma solo le linee dello stadio I (ST e DT) richiedono la misurazione della portata, come indicato in [2].

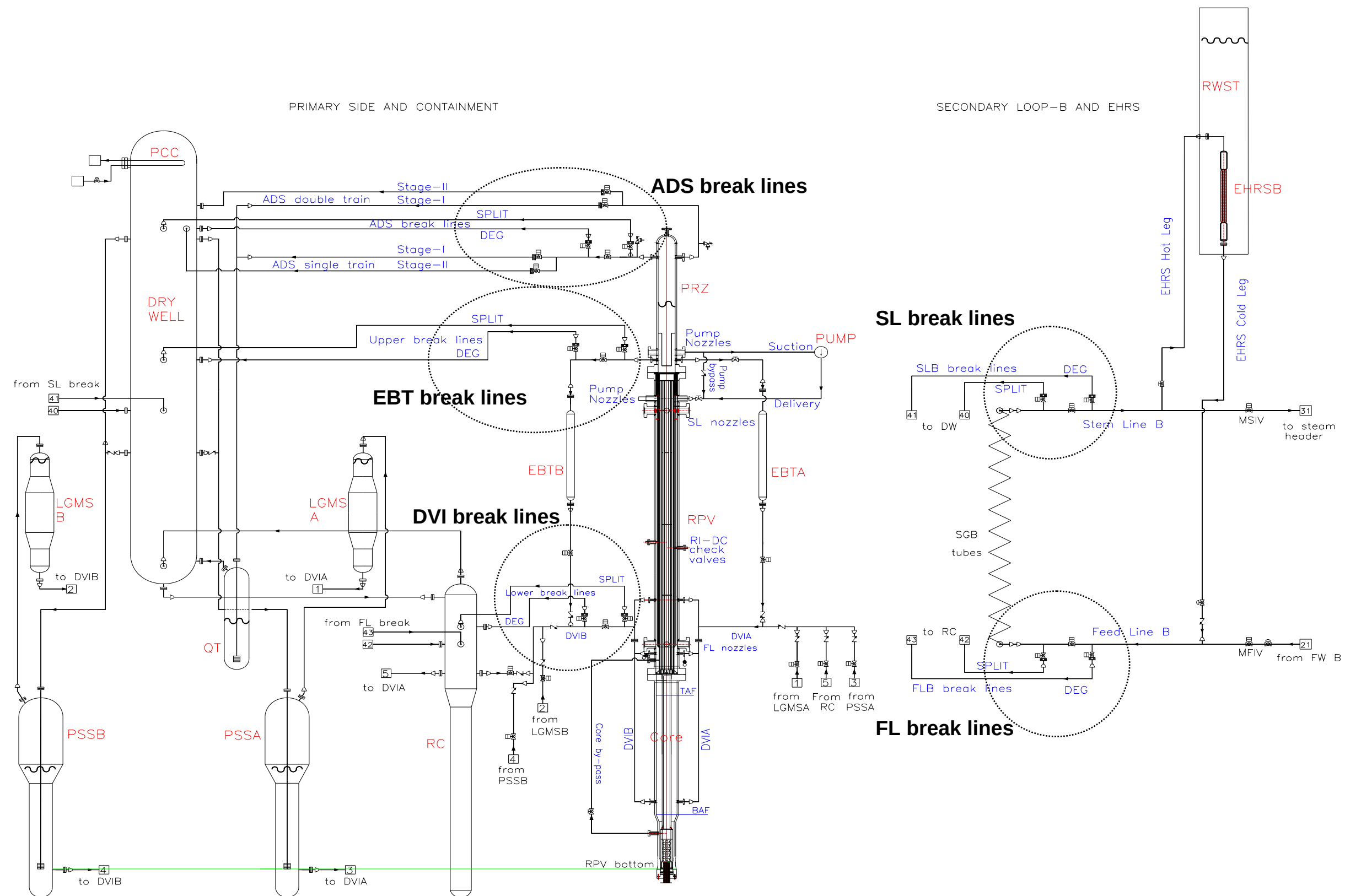


Figura 1: Schema dell'impianto SPES3 e indicazione delle posizioni di rottura

La Figura 2 mostra la simulazione in SPES3 di una generica rottura: in condizioni nominali le valvole 1 e 2 sono chiuse mentre la valvola 3 è aperta. Non c'è fuoriuscita di fluido verso il contenimento. In situazione incidentale, le valvole 1 e 2 vengono aperte, mentre la valvola 3 viene chiusa. Per maggiori dettagli si rimanda al documento [2].

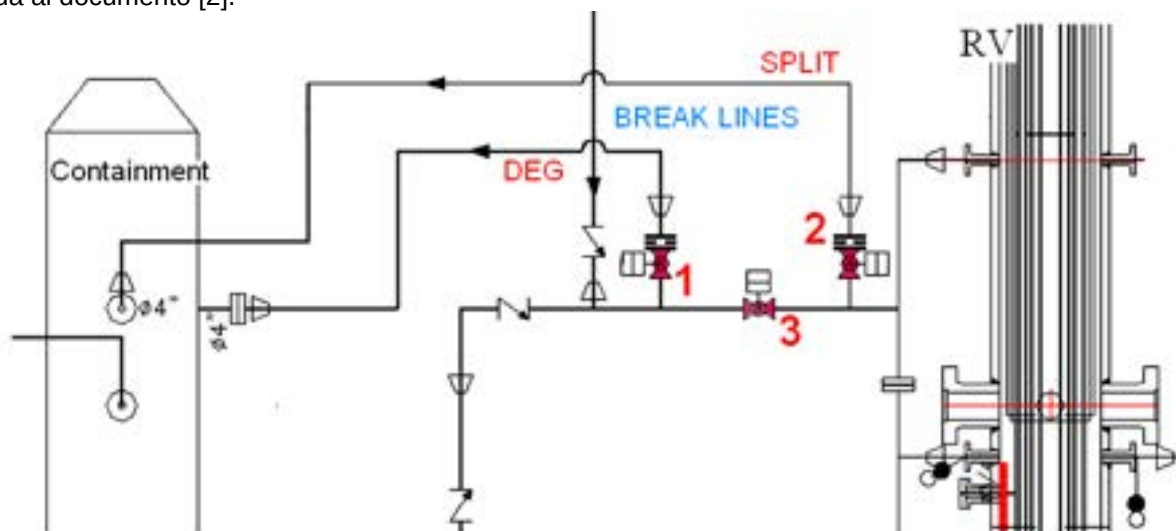


**Figura 2: Simulazione di una tipica rottura su SPES3 con l'indicazione delle 3 valvole coinvolte**

La Figura 3 mostra l'apertura delle valvole del sistema di sicurezza ADS. In condizioni nominali le valvole contrassegnate con 1, 2, 3 e 4 sono chiuse, ma si aprono in condizioni incidentali. Le valvole 5, 6 e 7 simulano la rottura e il loro funzionamento è analogo a quello spiegato in precedenza.

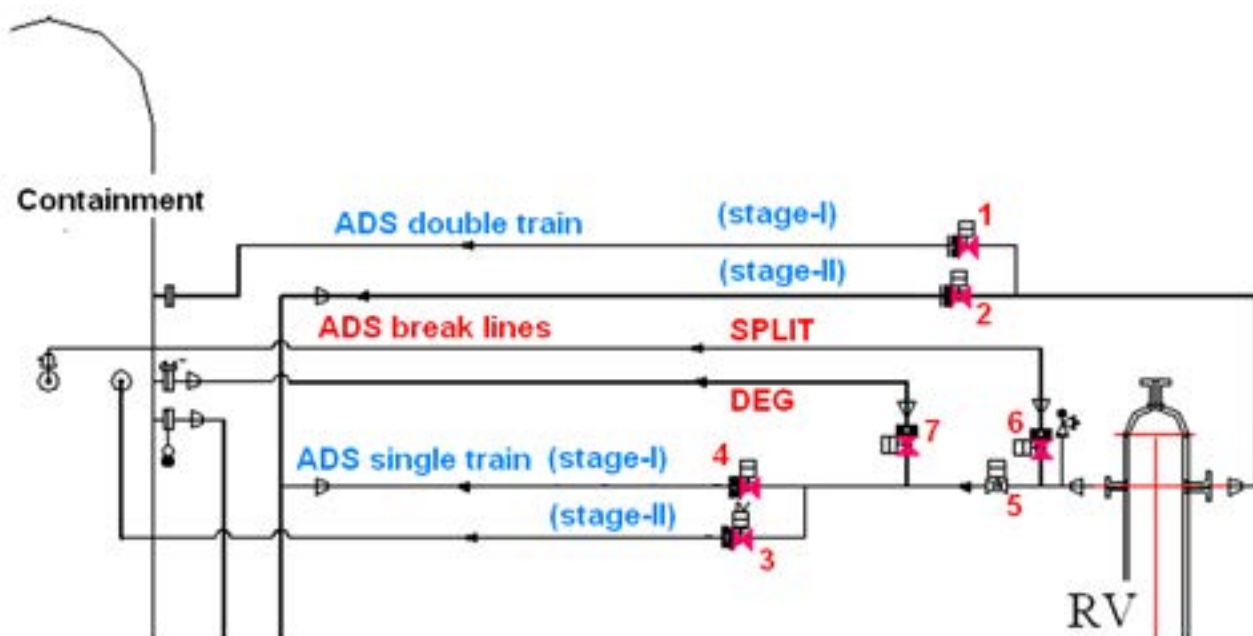


**Figura 3: Simulazione dei condotti dell'ADS con l'indicazione delle valvole coinvolte.**

L'utilizzo del codice termoidraulico RELAP5, che attraverso la nodalizzazione di tutti i circuiti fornisce l'andamento nel tempo dei parametri termoidraulici d'interesse, per ogni volume considerato, ha permesso di individuare le cinque linee maggiormente interessate dalla presenza di miscela bifase, riportate in Tabella 1, per le quali si rendono necessarie le misure.

|                      |
|----------------------|
| DVI SPLIT line       |
| EBT SPLIT line       |
| ADS Stage-I ST SPLIT |
| ADS Stage-I ST       |
| ADS Stage-I DT       |

The diagram illustrates the ADS system layout with the following components and connections:

- ADS break deg:** Features a vertical pipe with a valve (129) at the top, connected to DW 40013-02. It has a horizontal section with valves 128 and 127, and a vertical section with valve 157. A flow indicator (101) is located between valves 127 and 157.
- ADS single train:** A vertical pipe with valves 121, 134, 153, 122, 149, 148, and 157. It has a flow indicator (101) between valves 122 and 149. It is connected to DW 40112-02 at the top and RV 13013-02 at the bottom.
- ADS break split:** A horizontal pipe with valves 159 and 158. It is connected to DW 40013-02 at the top and has a flow indicator (101) between valves 159 and 158.
- Other components:** A vertical pipe with valve 156 at the top and valve 155 in the middle. A horizontal pipe with valve 154 is connected to the vertical pipe at valve 155. A vertical pipe with valve 147 at the bottom is connected to the horizontal pipe at valve 154.

**Figura 4: Linea dell'ADS ST e linee di rottura con nodalizzazione in RELAP5**

#### 4. CONDIZIONI DI ESERCIZIO

I cinque condotti scelti per la simulazione delle rotture sperimentano il passaggio di acqua o di vapore ad alta pressione e temperatura. La forte differenza di pressione tra i circuiti primario e secondario, rispettivamente a 155.5 e 58.3 bar, e la pressione ambiente del sistema di contenimento, determinano nella prima fase della rottura una portata dovuta all'efflusso critico ed in seguito guidata dalla differenza di pressione che si viene a creare tra i due ambienti. Durante il transitorio, la depressurizzazione provoca la vaporizzazione di parte del fluido inizialmente in fase liquida e un incremento delle velocità delle due fasi. Lo stretto accoppiamento tra circuito primario/secondario e il contenimento determina, durante il transitorio, un ritorno di fase liquida verso il RV, favorendo la formazione di miscela bifase.

Durante questa fase è importante misurare la portata di massa e l'energia senza perturbare eccessivamente il moto del fluido, per non alterare la risposta globale del sistema.

Ogni linea di rottura sarà equipaggiata con un venturimetro posto a monte della valvola, per misurare la portata finché il fluido resta monofase.

Al fine di misurare la portata massica bifase e l'energia del sistema sono possibili due posizionamenti della strumentazione: a monte o a valle della valvola e dell'orifizio che simulano la rottura.

Le condizioni presenti nei due punti variano notevolmente, quindi la strumentazione necessaria deve avere caratteristiche diverse. Per valutare le condizioni operative della strumentazione è stato utilizzato il codice di calcolo RELAP5.

La caratteristica bifase del fluido, le velocità di transito, l'incremento di pressione ed il gradiente termico a cui è sottoposto il condotto idraulico in cui installare gli strumenti definiscono le condizioni fisiche operative dei dispositivi.

Dai risultati dei calcoli RELAP5 sono stati ricavati i valori delle seguenti grandezze termoidrauliche di riferimento per la determinazione delle condizioni di esercizio della strumentazione:

- ▶ portata massica
- ▶ pressione
- ▶ velocità della fase liquida
- ▶ velocità della fase gassosa
- ▶ temperatura della fase liquida
- ▶ temperatura della fase gassosa
- ▶ frazione di vuoto superficiale
- ▶ titolo termodinamico

La differenziazione delle velocità e delle temperature per le due fasi deriva dal non equilibrio termodinamico del sistema. Frazione di vuoto, pressione e temperature sono necessarie per determinare la densità della miscela bifase. Il titolo termodinamico, fondamentale per i bilanci di energia, è calcolabile attraverso la conoscenza del rapporto tra le velocità e la frazione di vuoto. La portata massica è calcolabile conoscendo la velocità e la densità della miscela bifase, nonché la sezione di passaggio.

Con l'utilizzo del codice RELAP5 sono stati ricavati i transitori delle grandezze termoidrauliche in funzione del tempo [2] sia a monte sia a valle della valvola di rottura.

La Tabella 2, la Tabella 3, la Tabella 4, la Tabella 5 e la Tabella 6 riportano il valore massimo e minimo di ogni variabile in entrambe le posizioni per ogni linea di Tabella 1.

**Tabella 2: Massimi e minimi valori delle principali variabili termodinamiche a monte e a valle della valvola di rottura sulla linea SPLIT del DVI**

| DVI SPLIT                  |                   | A MONTE (Upstream) |            | A VALLE (Downstream) |            |
|----------------------------|-------------------|--------------------|------------|----------------------|------------|
|                            |                   | ½" Sch. 80         | 13.8 mm    | 2" ½ Sch. 40         | 62.7 mm    |
| ORIFICE: 4.28 mm           |                   | <b>MIN</b>         | <b>MAX</b> | <b>MIN</b>           | <b>MAX</b> |
| void fraction              |                   | 0                  | 0.9994     | 0**                  | 1          |
| volume equilibrium quality |                   | -0.331             | 0.998      | -0.003               | 0.999      |
| mass flowrate              | kg/s              | -0.131             | 1.333      | -0.130               | 1.333      |
| liquid velocity            | m/s               | -4.03              | 12.1       | -5.40                | 55.5       |
| gas velocity               | m/s               | -13.5              | 154        | -0.92                | 188        |
| liquid temperature         | °C                | 102                | 320        | 82                   | 164        |
| gas temperature            | °C                | 102                | 345        | 101                  | 164        |
| pressure                   | MPa               | 0.21               | 15.64      | 0.102                | 0.69       |
| volumetric flow            | m <sup>3</sup> /s | -0.002             | 0.002      | -0.002               | 0.464      |

\*\* Il valore 0 è dovuto all'intervento, intorno a 5000 secondi, dei sistemi di sicurezza che mandano acqua in fase liquida che copre la rottura. La portata massica deve essere valutata prima di questo intervento, con un valore minimo della frazione di vuoto pari a 0.6256

**Tabella 3: Massimi e minimi valori delle principali variabili termodinamiche a monte e a valle della valvola di rottura sulla linea SPLIT del EBT**

| EBT SPLIT                  |                   | A MONTE (Upstream) |            | A VALLE (Downstream) |            |
|----------------------------|-------------------|--------------------|------------|----------------------|------------|
|                            |                   | ¾" Sch. 80         | 18.9 mm    | 1" ¼ Sch. 40         | 35.1 mm    |
| ORIFICE: 8.73 mm           |                   | <b>MIN</b>         | <b>MAX</b> | <b>MIN</b>           | <b>MAX</b> |
| void fraction              |                   | 0                  | 1          | 0.978                | 1          |
| volume equilibrium quality |                   | -0.011             | 1.06       | 0.199                | 1.04       |
| mass flowrate              | kg/s              | -0.020             | 4.67       | -0.021               | 4.67       |
| liquid velocity            | m/s               | -17.2              | 66.7       | -5.69                | 189        |
| gas velocity               | m/s               | -20.9              | 106        | -5.93                | 258        |
| liquid temperature         | °C                | 41.0               | 327        | 129                  | 197        |
| gas temperature            | °C                | 133                | 345        | 133                  | 204        |
| pressure                   | MPa               | 0.34               | 15.52      | 0.102                | 1.39       |
| volumetric flow            | m <sup>3</sup> /s | -0.006             | 0.019      | -0.006               | 0.250      |

**Tabella 4: Massimi e minimi valori delle principali variabili termodinamiche a monte e a valle della valvola di rottura sulla linea SPLIT del ADS ST**

| ADS ST SPLIT               |                   | A MONTE (Upstream) |            | A VALLE (Downstream) |            |
|----------------------------|-------------------|--------------------|------------|----------------------|------------|
|                            |                   | 1" ½ Sch. 80       | 38.1 mm    | 3" Sch. 40           | 77.9 mm    |
| ORIFICE: 13.18 mm          |                   | <b>MIN</b>         | <b>MAX</b> | <b>MIN</b>           | <b>MAX</b> |
| void fraction              |                   | 0.042              | 1          | 0.993                | 1          |
| volume equilibrium quality |                   | -0.112             | 1.090      | 0.434                | 1.076      |
| mass flowrate              | kg/s              | -0.044             | 4.51       | -0.044               | 4.51       |
| liquid velocity            | m/s               | -11.6              | 35.8       | -2.92                | 205        |
| gas velocity               | m/s               | -12.6              | 35.8       | -2.92                | 405        |
| liquid temperature         | °C                | 76                 | 342        | 91                   | 170        |
| gas temperature            | °C                | 76                 | 344        | 94                   | 216        |
| pressure                   | MPa               | 0.264              | 15.50      | 0.102                | 0.79       |
| volumetric flow            | m <sup>3</sup> /s | -0.005             | 0.013      | -0.014               | 1.930      |

**Tabella 5: Massimi e minimi valori delle principali variabili termodinamiche a monte e a valle della valvola sulla linea ADS ST stadio I**

| ADS ST stadio I            |                   | A MONTE (Upstream)<br>1" ½ Sch. 80 38.1 mm |       | A VALLE (Downstream)<br>1"½ Sch. 40 40.9 mm |       |
|----------------------------|-------------------|--------------------------------------------|-------|---------------------------------------------|-------|
|                            |                   | MIN                                        | MAX   | MIN                                         | MAX   |
| ORIFICE: 13.18 mm          |                   |                                            |       |                                             |       |
| void fraction              |                   | 0                                          | 1     | 0**                                         | 1     |
| volume equilibrium quality |                   | -0.068                                     | 1.058 | -0.0002                                     | 1.053 |
| mass flowrate              | kg/s              | -0.269                                     | 0.958 | -0.269                                      | 0.958 |
| liquid velocity            | m/s               | -7.97                                      | 10.63 | -2.97                                       | 25.6  |
| gas velocity               | m/s               | -16.67                                     | 10.25 | -2.97                                       | 66.4  |
| liquid temperature         | °C                | 61                                         | 338   | 36.8                                        | 216   |
| gas temperature            | °C                | 66                                         | 344   | 36.8                                        | 212   |
| pressure                   | MPa               | 0.156                                      | 15.51 | 0.102                                       | 2.05  |
| volumetric flow            | m <sup>3</sup> /s | -0.019                                     | 0.012 | -0.003                                      | 0.075 |

\*\* la frazione di vuoto raggiunge il valore 0 a causa del reflusso dell'acqua risucchiata dalla QT. Per le misure di interesse questo valore deve essere considerato pari a 0.9471.

**Tabella 6: Massimi e minimi valori delle principali variabili termodinamiche a monte e a valle della valvola sulla linea ADS DT stadio I**

| ADS DT stadio I            |                   | A MONTE (Upstream)<br>2" ½ Sch. 80 59.0 mm |        | A VALLE (Downstream)<br>2" ½ Sch. 40 62.7 mm |        |
|----------------------------|-------------------|--------------------------------------------|--------|----------------------------------------------|--------|
|                            |                   | MIN                                        | MAX    | MIN                                          | MAX    |
| ORIFICE: 18.64 mm          |                   |                                            |        |                                              |        |
| void fraction              |                   | 0.379                                      | 1      | 0.949                                        | 1      |
| volume equilibrium quality |                   | 0.051                                      | 1.073  | 0.328                                        | 1.069  |
| mass flowrate              | kg/s              | -0.016                                     | 3.1324 | -0.016                                       | 3.1324 |
| liquid velocity            | m/s               | -2.57                                      | 8.72   | -2.48                                        | 32.9   |
| gas velocity               | m/s               | -2.57                                      | 8.55   | -2.48                                        | 96     |
| liquid temperature         | °C                | 57.3                                       | 344    | 36.8                                         | 216    |
| gas temperature            | °C                | 57.9                                       | 344    | 36.8                                         | 212    |
| pressure                   | MPa               | 0.192                                      | 15.50  | 0.102                                        | 1.84   |
| volumetric flow            | m <sup>3</sup> /s | -0.007                                     | 0.023  | -0.008                                       | 0.261  |

Le considerazioni sulle condizioni termoidrauliche a monte e a valle della rottura sono le seguenti, già riportate in [2]:

- ▶ Frazione di vuoto: range tra 0 e 1 a monte, tra 0.9 e 1 a valle (tranne per il DVI, 0.6 – 1)
- ▶ Velocità della fase liquida: le velocità a valle superano anche di sei volte le velocità a monte, con picchi di 200 m/s
- ▶ Velocità della fase gassosa: le velocità a valle superano anche di dodici volte le velocità a monte, con picchi di 400 m/s
- ▶ Temperature: le temperature di entrambe le fasi, a monte sono circa il doppio delle temperature a valle, con picchi di 345°C
- ▶ Pressioni: le pressioni massime a monte sono legate alla pressione di funzionamento del circuito primario, quindi intorno ai 155.5 bar; le pressioni a valle sono invece legate alla bassa pressione del contenimento e a seguito dello scarico di fluido dalle rotture non superano i 15 bar.

Al fine di simulare le rotture di IRIS (che non prevedono tubazioni intermedie tra la fessura ed il contenimento), si è cercato in SPES3 di limitare il più possibile l'influenza del tubo a monte della valvole di rottura. Pertanto si è cercato di installarle vicine ai punti di attacco con i circuiti primario e secondario. La conseguenza è quella di avere le linee a monte delle valvole di rottura decisamente più corte rispetto alle linee a valle. La non disponibilità dei necessari tratti di calma per certi strumenti può influenzare notevolmente la misura e questo parametro è stato tenuto in conto nella scelta delle posizioni e degli strumenti.

Gli aspetti vantaggiosi nel posizionare la strumentazione a monte sono i seguenti:

- ▶ bassa velocità delle fasi,
- ▶ frazione di vuoto facilmente identificabile perché variabile in un ampio range con forte presenza di fase liquida.

Gli aspetti svantaggiosi sono:

- ▶ alte temperature e pressioni,
- ▶ scarso spazio sulla linea per posizionare la strumentazione,
- ▶ piccoli diametri delle linee.

Gli aspetti vantaggiosi nel posizionare a valle i dispositivi sono:

- ▶ basse temperature e pressioni,
- ▶ diametri maggiori,
- ▶ possibilità di sufficienti tratti di calma sia prima sia dopo lo strumento.

Gli aspetti negativi sono i seguenti:

- ▶ alte velocità,
- ▶ frazioni di vuoto vicine ad 1 (tutta fase gassosa) che richiedono strumenti capaci di individuare scarse tracce/gocce di liquido in un fluido veloce gassoso.

Le condizioni operative e i valori delle grandezze termoidrauliche da misurare evidenziano che deve essere valutata sia l'installazione degli strumenti a valle della rottura, sia quella a monte. L'opzione di installazione degli strumenti a monte della rottura rende necessaria la modifica geometrica delle linee di monte.

## 5. STRUMENTAZIONE DISPONIBILE PER LA MISURA DI PORTATA

L'indagine è stata basata su una panoramica della strumentazione disponibile svolta presso i fornitori di strumentazione ed ha seguito un doppio binario: da una parte sono stati contattati laboratori, che dispongono di strumenti di misura specifici per misure su flussi bifase, dall'altra sono stati contattati produttori e fornitori di strumentazione convenzionale dedicata a fluidi monofase per valutare la possibilità di impiegarli dopo opportune modifiche per misure bifase.

### 5.1 Misure di portata in monofase

Gli strumenti convenzionali, elencati in Tabella 7, rappresentano valide alternative per la misura della portata in presenza di solo liquido o solo vapore; per quanto riguarda la loro idoneità a misurare la portata massica, essi sono suddivisibili in tre gruppi.

#### Volumetrici

Rilevano direttamente la portata volumetrica attraverso la misura della velocità media; per ottenere da essi la portata massica occorre moltiplicare la loro misura per la densità del fluido, determinata in altro modo (dalla conoscenza di pressione, temperatura e tipo del fluido,) mediante la formula:

$$\dot{m} = A \cdot \rho \cdot V \quad (1)$$

dove

- $\dot{m}$  è la portata massica in kg/s
- $A$  è l'area della sezione in m<sup>2</sup>
- $\rho$  è la densità del fluido in kg/m<sup>3</sup>
- $V$  è la velocità media del fluido nella sezione in m/s

#### Massici

Sono sensibili direttamente alla portata massica, quindi non necessitano altri strumenti.

#### A pressione differenziale

Operano rilevando la pressione differenziale agli estremi di una singolarità geometrica. Per questi strumenti la portata massica è ottenuta utilizzando l'equazione di Bernoulli, misurando la differenza di pressione a monte e a valle di uno ostacolo, secondo la seguente relazione

$$\dot{m} = k \cdot \sqrt{\rho \cdot \Delta P} \quad (2)$$

dove

- $k$  è un coefficiente che dipende dal regime di moto, dal numero di Reynolds, dalla geometria e dalla comprimibilità del fluido
- $\Delta P$  è la caduta di pressione in corrispondenza della singolarità geometrica

In presenza di fluido monofase, la densità si ottiene conoscendo pressione e temperatura del fluido, ricavabili da una termocoppia e un trasduttore di pressione relativo.

Sempre basato su una misura di pressione differenziale, vi sono i tubi di Pitot, che restituiscono la velocità del fluido monofase. Per ottenere la portata è necessario ancora una volta moltiplicare l'output dello strumento per l'area di passaggio e la densità.

**Tabella 7: Principali strumenti per la determinazione della portata in monofase**

|                                     |                           |
|-------------------------------------|---------------------------|
| Misuratori a strozzamento           | A pressione differenziale |
| Misuratori a turbina                | Volumetrici               |
| Misuratori a generazione di vortici | Volumetrici               |
| Misuratori ad effetto Coriolis      | Massici                   |
| Misuratori elettromagnetici         | Volumetrici               |
| Misuratori ad ultrasuoni            | Volumetrici               |

### 5.1.1 Misuratori a strozzamento

I misuratori di pressione differenziale più comuni sono:

- Venturimetro (Figura 5 e Figura 6)
- Boccaglio standard
- Diaframma (Figura 7 e Figura 8)
- Tubo di pitot

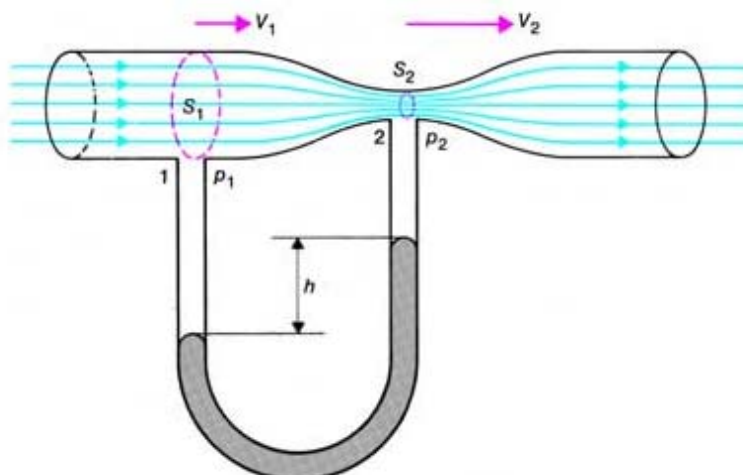

**Figura 5: Venturimetro con manometro ad U**

**Figura 6: Venturimetro con manometro analogico**

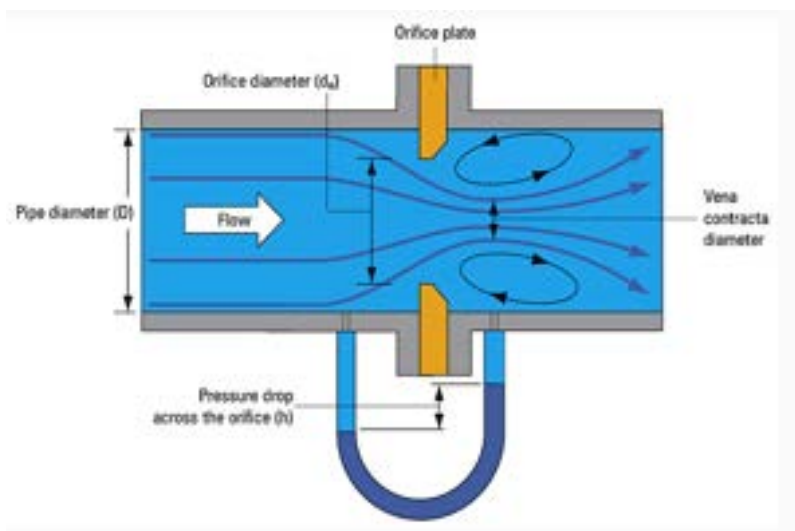


Figura 7: Diaframma con manometro ad U

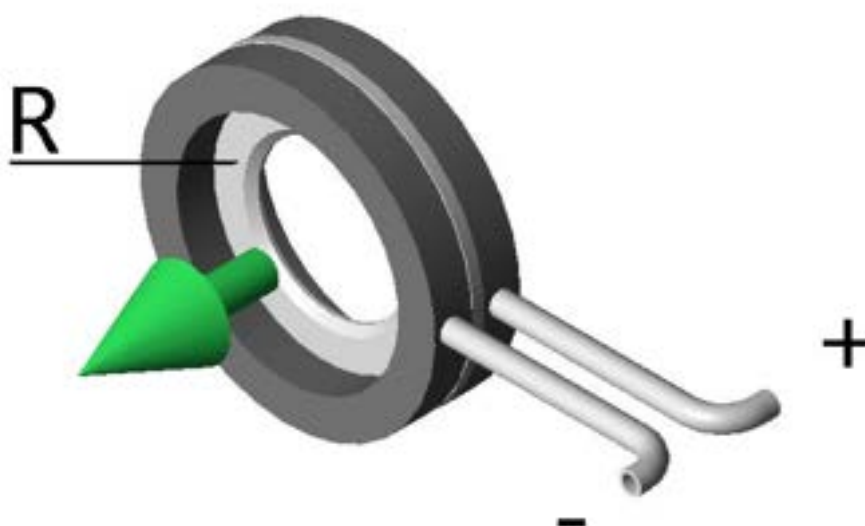


Figura 8: Diaframma – particolare del foro

La portata massica è ottenuta utilizzando l'equazione di Bernoulli, misurando la differenza di pressione a monte e a valle di uno ostacolo, secondo la seguente relazione

$$\dot{m} = \varepsilon \cdot \gamma \cdot a \cdot \sqrt{\rho \cdot \Delta P} \quad (3)$$

dove

$\varepsilon$  è un coefficiente che dipende dalla comprimibilità del fluido (1 per i liquidi)

$a$  è un'area della sezione minima all'interno del dispositivo di strozzamento

$\gamma$  è un coefficiente che dipende dal regime di moto, dal numero di Reynolds e dalla geometria

$\Delta P$  è la caduta di pressione sulla parte del dispositivo a sezione ridotta.

L'impossibilità di utilizzare questi strumenti in bifase è data sia dall'incertezza sulla densità del fluido bifase sia dalla difficoltà a interpretare il valore di pressione differenziale in regime bifase. La presenza di velocità diverse per le due fasi (acqua e vapore), il verificarsi di diversi regimi di moto, la forte variabilità della

frazione di vuoto e della pressione non permettono una diretta correlazione tra la caduta di pressione e la portata massica.

### 5.1.2 Misuratori a turbina

I misuratori a turbina sono composti da un rotore immerso nel fluido che ruota al passaggio del fluido, in modo proporzionale alla velocità dello stesso. Utilizzando l'equazione (1) e conoscendo la densità del fluido, si ricava il valore della portata, in quanto lo strumento restituisce direttamente la portata volumetrica. In Figura 9 è rappresentato un tipico misuratore a turbina.

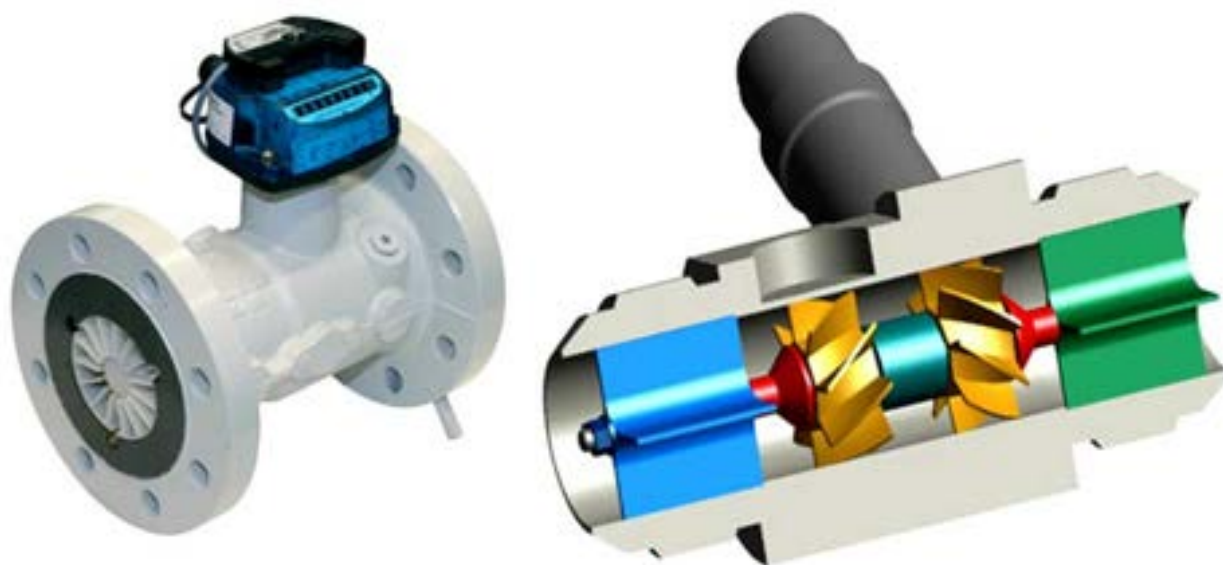


**Figura 9: Misuratore a turbina**

In condizioni bifase, questi strumenti possono teoricamente restituire la velocità media della miscela, ma devono necessariamente essere accoppiati con uno strumento che dia la densità della miscela stessa. In monofase vengono utilizzati sia per la misura di liquido sia per la misura di gas, ma presentano caratteristiche diverse a seconda dell'utilizzazione: per quanto riguarda la misura di gas, le turbine devono sopportare un alto numero di giri ma forze trasversali modeste, mentre per la misura di liquido le velocità sono solitamente basse ma le pale sono soggette a notevoli forze.

### 5.1.3 Misuratori a generazione di vortici

I misuratori a generazione di vortici sono composti da un corpo rigido immerso nel fluido che genera dei vortici (vortici di Von Karman), la cui frequenza è proporzionale alla velocità del fluido stesso. I vortici vengono creati alternativamente sia da una parte sia dall'altra del corpo e rappresentano punti a bassa pressione. Le variazioni locali di pressione sono rilevate da "sensori" di vortici opportunamente posizionati e possono essere:

- ▶ sensori di pressione: estensimetri, piezoelettrici, capacitivi,
- ▶ sensori di velocità: anemometro a filo caldo, rivelatore ultrasonico.

Il sensore può essere di velocità o di pressione. Il grande vantaggio di questi strumenti è la totale assenza di parti mobili, come evidenziato in Figura 10.

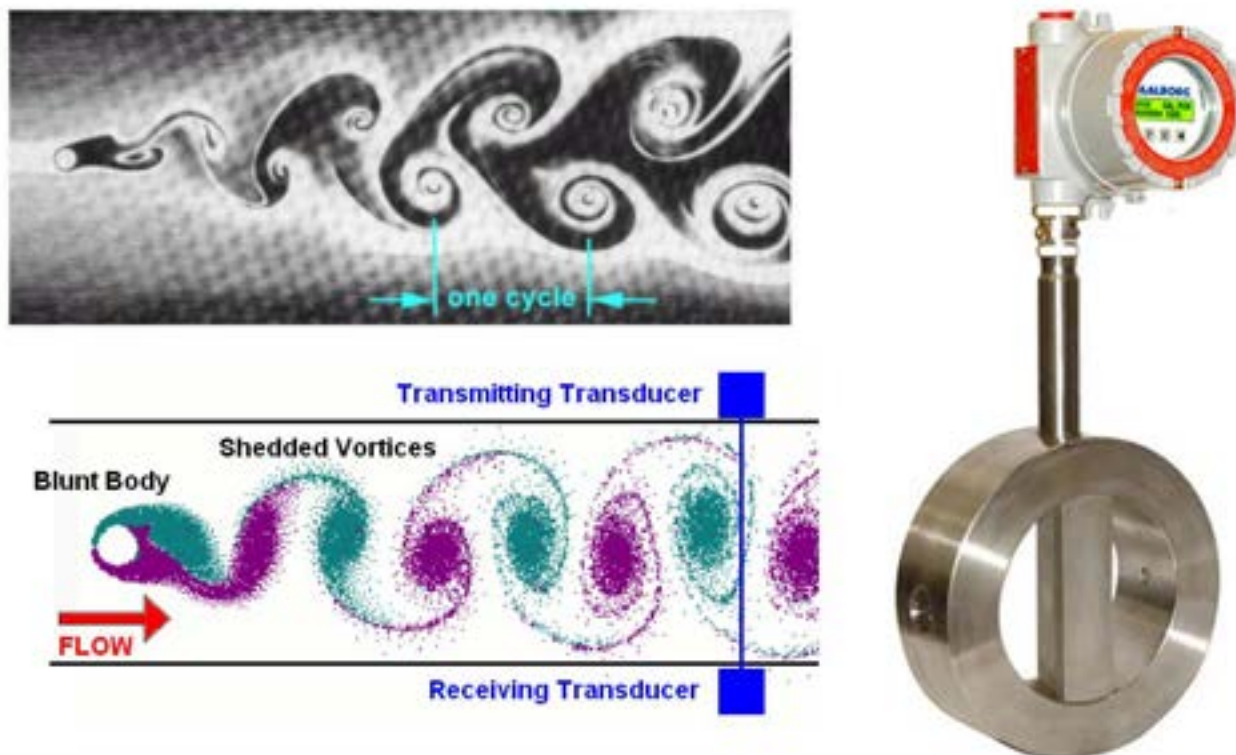


**Figura 10: Misuratore di portata a generazione di vortici e funzionamento**

Come per i misuratori a turbina, i misuratori a generazione di vortici restituiscono direttamente la velocità del fluido, quindi, secondo l'equazione (1), è sufficiente conoscere la densità del fluido.

A livello commerciale questi misuratori sono utilizzati per gas naturale, vapore, sistemi di ventilazione e in generale gas pulito. L'utilizzo per miscele bifase non è stato sviluppato a livello commerciale.

#### 5.1.4 Misuratori ad effetto Coriolis

Il principio di funzionamento si basa sulla formazione di una componente di vibrazione torsionale quando due condotti posti a vibrare alla stessa frequenza rispetto al piano che li contiene sono percorsi da fluido.

Un tipico misuratore è rappresentato in Figura 11. La portata massica è direttamente proporzionale all'ampiezza della vibrazione. Questo tipo di strumento non è idoneo ad individuare la presenza di gocce disperse in un gas e quindi non può essere utilizzato per applicazioni bifase.

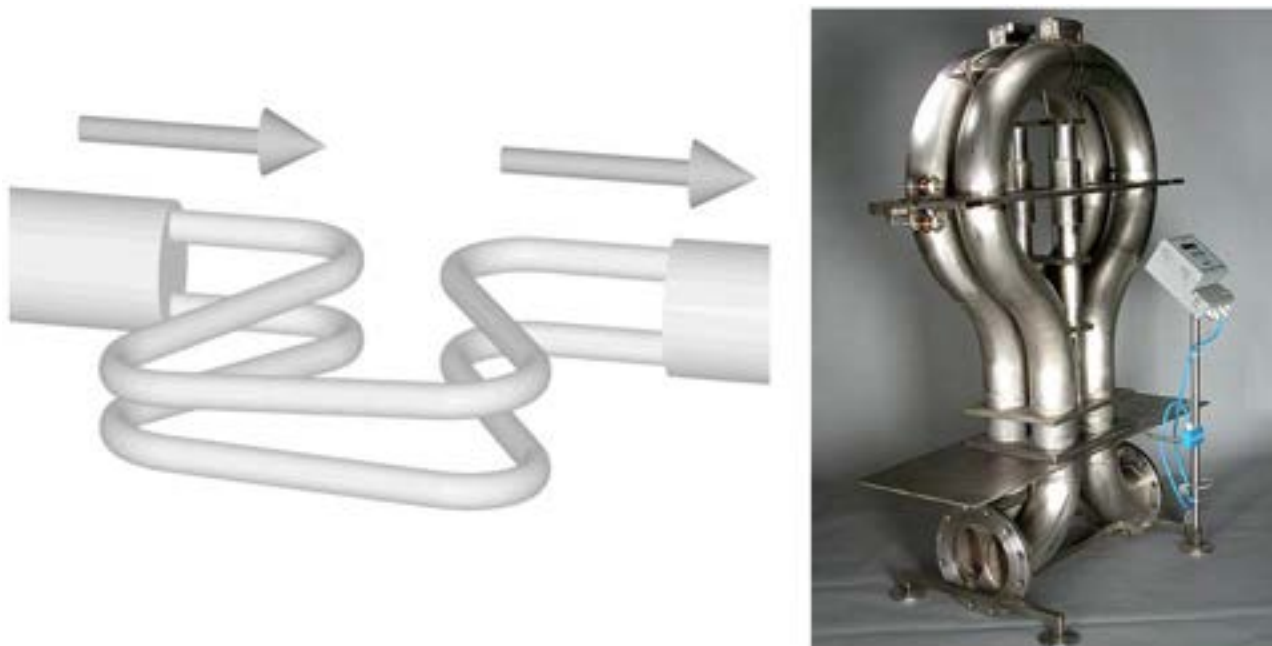


**Figura 11: Misuratore di portata ad effetto Coriolis**

### 5.1.5 Misuratori Magnetici

I misuratori magnetici sono una valida possibilità in presenza di fluidi elettricamente conduttori. Il fluido si comporta come un conduttore elettrico in cui la corrente transita in un campo magnetico perpendicolare al moto del fluido stesso.

Lo spostamento della generica molecola di acqua all'interno del campo magnetico genera una forza elettromotrice nel fluido conduttore proporzionale alla velocità di spostamento, secondo la legge di Faraday. Lo strumento restituisce la velocità del fluido, quindi per avere la portata è necessaria la conoscenza della densità. Il funzionamento è possibile solo per valori di conduttività elettrica superiori a  $5 - 10 \mu\text{S/cm}$ , il che esclude l'applicazione di questo principio di misura alle condizioni di SPES3, dove si utilizza acqua demineralizzata.

### 5.1.6 Misuratori ad ultrasuoni

Esistono due tipi di misuratori ad ultrasuoni:

- ▶ ad effetto doppler
- ▶ a riflessione

I misuratori a riflessione misurano la differenza del tempo di transito di impulsi ultrasonici che si propagano nella direzione del fluido e vengono riflessi in direzione opposta dal fluido stesso fino ad incontrare un rilevatore. Lo spazio percorso dal segnale diviso per questa differenza di tempo consente una misura della velocità media del fluido lungo il percorso del fascio di ultrasuoni.

I misuratori a effetto Doppler si basano sulla variazione della lunghezza d'onda di un suono emesso verso un corpo in movimento.

Nelle condizioni bifase tipiche di SPES3, la forte differenza di densità tra il tubo metallico e la fase gassosa fluente comporta la creazione di onde di riflessione e diffrazione in prossimità delle discontinuità, di conseguenza il trasmettitore e il ricevitore del segnale andrebbero posizionati all'interno del tubo. In ambito commerciale non sono stati trovati strumenti che possano tecnologicamente sopportare le alte temperature e pressioni di SPES3 e che possano rilevare bassissime densità e alte velocità.

## 5.2 Misure di portata massica in bifase

Mentre la disponibilità di strumentazione monofase è varia ed estesa, attualmente, non è possibile reperire commercialmente uno strumento che misuri direttamente la portata bifase o che non comporti elevati errori di misura.

Ricerche sono state effettuate consultando i cataloghi commerciali delle principali aziende produttrici di strumentazione ed attraverso contatti diretti.

Le seguenti aziende sono state contattate direttamente o valutate tramite i prodotti a catalogo.

La società **PIETRO FIORENTINI SPA** ([www.fiorentini.com](http://www.fiorentini.com)), leader nella tecnologia per il gas naturale e impianti petroliferi ha tra gli obiettivi quello di realizzare misuratori di portata di gas in uscita dai pozzi, spesso accompagnata da quantitativi anche rilevanti di olio combustibile e acqua. I dispositivi da loro realizzati sono adatti a misurare in particolare una fase, "sporcata" dalla presenza di gocce o bolle delle altre sostanze, che in generale non vengono rilevate in quanto non interessanti ai fini della misurazione. La società non si è resa disponibile a fornire dati tecnici relativi al principio di misura né elementi sugli aspetti fisici considerati dallo strumento, che nelle condizioni di SPES3 si troverebbe a lavorare a temperature e pressioni maggiori e con diversi fluidi.

Dall'analisi dei cataloghi commerciali della **Emerson Electric Co.** (<http://www.emerson.com/en-US/Pages/Home.aspx>) si è valutato l'utilizzo di un Misuratore ad effetto Coriolis di loro produzione, Coriolis Micro Motion, che misura miscele bifase liquido – gas. Tuttavia anche in questo caso si tratta di misure principalmente di una fase (liquida), anche fortemente influenzata da bolle o gas in genere. Inoltre il sistema non è adatto per le alte velocità sperimentate da SPES3 dovute alle elevate pressioni e alle basse densità.

Nel sistema SPES3 non è possibile considerare per la misura una sola fase con tracce dell'altra, perché la bassa densità del vapore è compensata dalla sua alta velocità, e viceversa la bassa velocità e frazione superficiale del liquido nel canale è bilanciata dall'alta densità. Quindi è necessario individuare della strumentazione capace di valutare entrambe le componenti.

L'utilizzo della tecnica ottica denominata **PIV, Particle Image Velocimetry**, è stata presa in considerazione dopo la partecipazione al Seminario tenuto dall'Ing. Rinaldo Miorini, post-doctor presso il Laboratorio di Fluidodinamica sperimentale della Johns Hopkins University di Baltimora in Aprile 2010. Questa tecnica consente di misurare il campo di moto di un fluido opportunamente inseminato con particelle e illuminato generalmente da un laser. La tecnica permette teoricamente di misurare la portata di un fluido e anche di evidenziare, eventualmente con tomografia computerizzata, i regimi di moto cui è soggetto il fluido. Tuttavia, le difficoltà riscontrate nell'Image Processing, nella visualizzazione delle particelle, nella raccolta dei fasci luminosi dovuta allo scattering della luce da parte delle particelle, già in monofase, rendono il passaggio al bifase molto complicato. Inoltre l'esigenza di superfici trasparenti impedisce il raggiungimento delle condizioni di pressione e temperatura di SPES3 e la presenza di particelle in sospensione nel fluido è inaccettabile.

Altre metodologie dirette che sono state utilizzate in passato, anche in SIET, prevedevano una misura integrale di portata: il **dispositivo Catch Tank** aveva la funzione di raccogliere il fluido scaricato dall'impianto nei punti in cui si intendeva simulare la rottura del circuito, per consentire la misura di massa scaricata ovvero l'integrale della portata [6]. La massa scaricata nel serbatoio veniva misurata utilizzando celle di carico indipendenti. Questo metodo è inapplicabile in SPES3, perché impedirebbe di studiare l'influenza del travaso di fluido primario nel contenimento e l'accoppiamento primario-contenimento nella mitigazione degli incidenti.

L'impossibilità di trovare sia a livello commerciale sia a livello accademico (vedi paragrafo 6.4.2) un solo dispositivo capace di misurare la portata massica in bifase, ha portato alla ricerca di un set di dispositivi eterogenei, solitamente uniti in un'unica sezione chiamata **SPOOL PIECE**, come indicato nel capitolo successivo. Questa strumentazione viene anche denominata STRUMENTAZIONE SPECIALE.

La scelta di un set di dispositivi comporta:

- ▶ definire e trovare gli strumenti adatti, con caratteristiche compatibili alle esigenze dell'impianto SPES3;
- ▶ combinare le risposte dei diversi dispositivi al fine di determinare le grandezze di interesse, in particolare portata massica e titolo termodinamico della miscela;
- ▶ determinare le incertezze e gli errori su ogni singolo strumento e quindi sulla misurazione finale.

## 6. STRUMENTAZIONE SPECIALE: SPOOL PIECE

### 6.1 Generalità

La decisione di utilizzare strumenti eterogenei per determinare la portata massica in bifase richiede l'individuazione delle grandezze fisiche da misurare. Rispetto alla portata massica monofase, data dalla formula (1), in bifase si ha la seguente relazione:

$$\dot{m} = A \cdot \rho \cdot V = A \cdot [\alpha \cdot \rho_G \cdot V_G + (1 - \alpha) \rho_L \cdot V_L] \quad (4)$$

Dove  $\alpha$  è la frazione di vuoto superficiale e i pedici  $G$  e  $L$  indicano rispettivamente la fase gassosa e quella liquida.

Quindi per determinare la portata massica è necessario conoscere:

- ▶ la densità delle due fasi,
- ▶ la frazione di vuoto,
- ▶ le velocità delle due fasi.

Eccetto le densità delle due fasi, ricavabili con strumenti convenzionali per la misura di pressione e temperatura, le altre grandezze richiedono l'utilizzo di due o più strumenti, solitamente raccolti in una sezione chiamata SPOOL PIECE [3].

Per la caratterizzazione di questo dispositivo si è proceduto inizialmente con una ricerca interna su precedenti lavori svolti da SIET inerenti la miscela bifase.

La SIET negli anni 1984 – 1987, nell'ambito del programma di ricerca dell'ENEA sulla sicurezza dei reattori LWR, aveva eseguito esperienze termoidrauliche di tipo integrale su un modello in scala volumetrica 1:427 dell'impianto PWR adottato per il Progetto Unificato Nucleare (PUN). Tali sperimentazioni avevano richiesto la misura di portata bifase. L'impianto, denominato SPES era stato equipaggiato con strumentazione speciale ed in particolare con SPOOL PIECE, come indicato nei documenti [7], [8], [9],[10], [11], [12] e [13]. Le condizioni termoidrauliche del circuito erano del tutto simili a quelle di SPES3, 155.5 bar e 330°C.

Per la determinazione della strumentazione di SPES3, si sono seguiti gli stessi passi indicati nei documenti prima citati:

- ▶ definizione delle necessità di misura sull'impianto,
- ▶ ricerca bibliografica sulla misurazione di portata bifase,
- ▶ ricerca bibliografica sullo SPOOL PIECE e su gli strumenti relativi,
- ▶ analisi delle disponibilità di mercato e dei costi.

Una volta sviluppati i punti precedenti, si potrà procedere come di seguito:

- ▶ acquisto degli strumenti,
- ▶ installazione degli strumenti,
- ▶ taratura degli strumenti,
- ▶ misurazioni.

Dopo aver effettuato la ricerca interna all'azienda sulle procedure attuate in passato, è stata raccolta la bibliografia disponibile a livello internazionale, sia in campo accademico, sia in campo industriale, riguardante la strumentazione speciale. La maggior parte dei documenti e degli articoli ritrovati sono gli stessi reperiti durante la ricerca eseguita negli anni '80 e alla base della strumentazione speciale dello SPES. Questo ha evidenziato lo scarso interesse per lo sviluppo di tali strumenti e metodi analitici negli ultimi venti anni.

I documenti [14], [15], [16], [17], [18], [19] e [20] hanno permesso la scelta degli strumenti dello SPOOL PIECE, della modellizzazione matematica delle risposte dei dispositivi e della loro combinazione al fine di ottenere la portata bifase.

Gli articoli basano la misurazione delle grandezze caratteristiche della portata bifase (densità, frazione di vuoto, velocità delle fasi) sulle informazioni di più strumenti eterogenei in corrispondenza di una sezione di

misura (SPOOL PIECE). Il documento [3] presenta un'analisi matematica che dimostra la necessità di accoppiare i seguenti dispositivi per avere le grandezze fisiche necessarie a ricavare la portata massica bifase:

- ▶ un misuratore di frazione di vuoto o densità della miscela,  $\rho_{AV}$  [kg/m<sup>3</sup>],
- ▶ un misuratore della velocità della miscela,  $V_T$  [m/s],
- ▶ un misuratore del flusso di quantità di moto della miscela,  $\rho V^2$  [Kg/m s<sup>2</sup>].

Il flusso della quantità di moto è definito come la massa moltiplicata per velocità, per unità di superficie e di tempo.

La velocità della miscela è una velocità intermedia tra quella della fase gassosa (solitamente più elevata) e quella della fase liquida. I due valori di velocità del liquido e del gas entrano nel valore di velocità della miscela, pesati a seconda della parte della sezione del tubo occupata dalle due fasi o a seconda della percentuale massica delle due fasi in un determinato volume.

La portata in massa bifase può essere ottenuta nei modi seguenti:

$$\dot{m} = A \cdot [\rho_{AV} \cdot (\rho V^2)]^{1/2} \quad (5)$$

$$\dot{m} = A \cdot \left[ \frac{(\rho V^2)}{V_T} \right] \quad (6)$$

$$\dot{m} = A \cdot [\rho_{AV} \cdot V_T] \quad (7)$$

L'espressione (5) prevede di utilizzare i segnali in uscita da un misuratore di frazione di vuoto e del flusso di quantità di moto della miscela, l'espressione (6) un misuratore del flusso di quantità di moto e della velocità della miscela, l'espressione (7) un misuratore della velocità della miscela e della frazione di vuoto.

L'analisi matematica dell'accoppiamento dei diversi strumenti è stata perfezionata e i risultati sono riportati nel documento SIET [3]. In particolare, il documento non mette in discussione le tre grandezze fisiche indicate sopra, né valuta quali siano gli strumenti più adatti a misurarle, ma descrive l'accoppiamento delle risposte attraverso le equazioni analitiche degli strumenti stessi.

È anche presente una routine implementabile che restituisce la portata bifase e il titolo inserendo le risposte degli strumenti.

Per quanto riguarda la velocità della miscela, nel documento sono riportate le espressioni matematiche che descrivono il funzionamento dello strumento più utilizzato in passato, la turbina; questo perché, mentre gli strumenti che restituiscono il flusso della quantità di moto e la frazione di vuoto sono governati teoricamente da un'unica relazione analitica, per la turbina vi sono tre modelli principali che consentono di ricavare il valore della velocità media sulla base della velocità di rotazione della turbina: il modello di Aya, il modello di Rouhani e il modello volumetrico.

Infine è stata valutata la possibilità di ottenere la portata accoppiando solo due strumenti, al fine di evitare la misurazione della frazione di vuoto, procedura storicamente complessa e costosa.

Le conclusioni del documento [3] sono che a livello analitico, utilizzando tre strumenti che restituiscano le grandezze fisiche sopraindicate, è possibile ottenere la portata massica e il titolo. Infatti, nonostante le equazioni precedenti mostrino che a livello dimensionale la portata in massa può essere ottenuta utilizzando due strumenti, è stato dimostrato che queste relazioni devono essere moltiplicate per un fattore termo-idraulico i cui parametri sono ottenibili solo da un terzo strumento.

L'utilizzazione di due strumenti dipende dalla banda di accettabilità dell'errore.

Negli articoli considerati, per la misura della densità o frazione di vuoto, era indicato l'utilizzo di un *gammadensitometro*, per la misura della velocità era suggerita una *turbina* e per il flusso di quantità di moto un *drag disk*, come evidenziato dalla Figura 12.

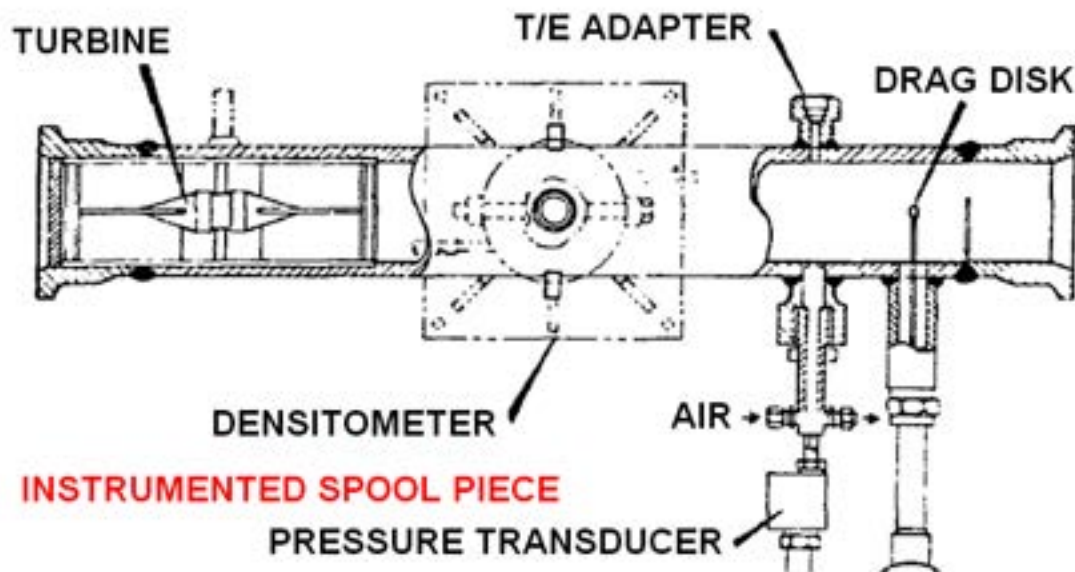


**Figura 12:** Esempio di SPOOL PIECE composto da una turbina, una drag disk e un gammadensitometro

## 6.2 Criteri generali di selezione

Durante i transitori previsti per SPES3, la presenza di condizioni bifase, le alte velocità della fase liquida e gassosa, i differenti regimi di moto, la forte variabilità della frazione di vuoto a monte della valvola di rottura, la presenza predominante di fase gassosa a valle, la temperatura e la pressione influenzano le caratteristiche della strumentazione.

Gli strumenti indicati per la misura delle grandezze fisiche richiamate in precedenza devono soddisfare i seguenti criteri:

- ▶ capacità di operare con fluidi bifase
- ▶ capacità di operare durante i transitori, quindi buon tempo di risposta
- ▶ disturbo minimo al fluido
- ▶ ampio intervallo di misura (high span)
- ▶ capacità di misurazione bidirezionale
- ▶ facilità di installazione
- ▶ capacità di gestire differenti regimi di moto
- ▶ semplicità di acquisizione dati
- ▶ dimensioni fisiche adatte ai condotti
- ▶ semplicità di calibrazione
- ▶ buona reperibilità

Trovare strumenti che soddisfino tutte queste caratteristiche è in pratica impossibile, ma è necessario fare scelte di compromesso che possano rispondere ai vari criteri.

La posizione relativa degli strumenti rispetto alla direzione principale di movimento del fluido deve essere valutata in fase sperimentale; lo strumento che disturba meno il flusso deve essere posizionato prima rispetto agli altri, quindi è necessario conoscere l'ingombro degli strumenti e il loro effetto sul fluido.

## 6.3 Indagine Conoscitiva

Al fine di identificare i tipi di strumenti, il modello, la loro applicazione effettiva nell'impianto SPES3, la tipologia dell'informazione fornita e il trattamento della stessa è stata avviata una campagna di indagine rivolta alla valutazione tecnica ed alla reperibilità commerciale degli strumenti generalmente utilizzati al giorno d'oggi per il tipo di misure necessarie.

Questa indagine è stata svolta sia nell'ambito scientifico e accademico per individuare i laboratori che in passato avevano affrontato e risolto le problematiche legate a queste misure, sia nel mercato internazionale della strumentazione per trovare i potenziali fornitori.

Questa attività è stata condotta in differenti modi:

- ▶ Ricerca di documenti SIET inerenti alla scelta e all'installazione, nonché al funzionamento degli strumenti
- ▶ Ricerca di esperienze in laboratori di ricerca
- ▶ Ricerca di articoli e pubblicazioni relativi ai tipi di strumenti
- ▶ Ricerca di produttori di strumentazione
- ▶ Contatti diretti con i soggetti interessati
- ▶ Partecipazioni a workshop dedicati
- ▶ Visite a laboratori di ricerca

Prima di entrare nel dettaglio delle differenti modalità, in Tabella 8 vengono riportate le alternative possibili per misurare le tre grandezze.

**Tabella 8: Strumentazione utilizzabile per SPOOL PIECE**

| <i>Tipo di misurazione</i>         | <i>Possibile strumentazione utilizzabile</i>                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Velocità di fluido                 | Turbine flowmeter (Misuratore di portata a turbina)<br>Vortex shedding flowmeter (Misuratore di portata a generazione di vortici)<br>Ultrasonic Doppler Velocimeter (Velocimetro ultrasonico ad effetto doppler)<br>Celerity of pressure waves (Celerità delle onde di pressione) |
| Flusso della quantità di moto      | Drag disk<br>Drag plate<br>Load cell                                                                                                                                                                                                                                              |
| Densità di fluido e grado di vuoto | Gamma-densitometer<br>Wire Mesh Sensor<br>Capacitive Wire<br>Ultrasonic Mesh Sensor<br>Inductive Sensor<br>Strumenti capacitivi integrali con elettrodi a parete<br>Photon-laser meter                                                                                            |

È anche possibile ottenere una verifica sullo scambio di massa tra primario/secondario e contenimento andando a misurare lo spessore di film liquido di condensa sulle pareti dei serbatoi che raccolgano il fluido in uscita dalle tubazioni di rottura. La strumentazione adatta è rappresentata da un sensore conduttivo che misura la conducibilità elettrica dello strato di liquido che bagna due elettrodi affiancati.

### 6.3.1 Esperienze SIET

Tra il 1984 e il 1987, in SIET furono studiati, acquistati ed installati diversi SPOOL PIECE per misurare la portata bifase in situazione incidentale sulle 3 HOT LEG dell'impianto SPES; le esperienze sono riportate nei documenti [21], [22], [23], [24],[25], [26] e [27].

Le aziende contattate o di cui si sono cercati documenti riguardanti la strumentazione prodotta o commercializzata sono le seguenti:

Gammadensitometro:

- ▶ Measurements Incorporated (USA)
- ▶ Gammatom (Italia)
- ▶ Scientech Incorporated (USA)
- ▶ Isitec (Germania Federale)
- ▶ Loeffel Verfahrenstechnik GmbH (Germania Federale)

Drag Disk:

- ▶ Measurements Incorporated (USA)
- ▶ Scientech Incorporated (USA)
- ▶ Ramapo Instruments Company (USA)

Turbina:

- ▶ Measurements Incorporated (USA)
- ▶ Scientech Incorporated (USA)
- ▶ Centre d'Etudes Nucleaires di Grenoble (Francia)
- ▶ Thurning Instruments Limited (Gran Bretagna)
- ▶ Flow Technology Incorporated (USA)
- ▶ Quantum Technology Incorporated (USA)

Durante le passate esperienze, gli SPOOL PIECE utilizzati furono scelti in base a criteri di economicità, disponibilità sul mercato e comodità di installazione:

- ▶ fu acquistato *uno* SPOOL PIECE completo da un'azienda specializzata nella misura di portata bifase. La suddetta azienda, **MEASUREMENTS INCORPORATED (USA)**, aveva fornito un tronchetto con tutti e tre gli strumenti: una turbina, un drag disk e un gammadensitometro con sorgente al Cesio – 137 da 10 Curie, 3 raggi e rivelatori a scintillatore in Ioduro di Sodio
- ▶ furono realizzati *due* SPOOL PIECE acquistando da diverse aziende i vari componenti, che furono poi assemblati:
  - o **GAMMADENSITOMETRO**: ne furono acquistati 2 dalla **GAMMATOM (Italia)**
    - Tre raggi, sorgente al Cesio – 137, attività 3 Curie, rivelatori a scintillatore in Ioduro di Sodio attivato al Tallio, range di misura 10 – 1000 kg/m<sup>3</sup>
    - Due raggi, sorgente all'Americio – 241, attività 200 mCi, rivelatori a scintillatore in Ioduro di Sodio, range di misura 2 – 500 kg/m<sup>3</sup>
  - o **DRAG DISK**: ne furono acquistati 2 dalla **RAMAPO INSTRUMENTS COMPANY (USA)**, con caratteristiche identiche, ma diversi diametri: piastra forata, bersaglio intercambiabile, funzionamento bidirezionale, range di misura 10 – 10000 Pa e 5 – 100000 Pa.
  - o **TURBINA**: ne furono acquistate alcune dal **CENTRE d'ETUDES NUCLEAIRES di GRENOBLE (Francia)**, denominate TURBINE CENG.  
I dispositivi si differenziavano per i diversi diametri, ma presentavano caratteristiche identiche: full flow, 0.2 bar di caduta di pressione ammessa con acqua a temperatura ambiente, range di misura 0.1 – 5 m/s (overrange 7 m/s) e 0.6 – 75 m/s (overrange 100 m/s).

A livello operativo, il gammadensitometro della MEASUREMENTS INCORPORATED non dimostrò buona affidabilità e prestazioni, mentre si rimase soddisfatti dalla GAMMATOM.

Le turbine funzionarono bene permettendo anche una valutazione sperimentale dei diversi modelli matematici.

I dischi della RAMAPO INSTRUMENTS COMPANY si danneggiarono durante le prime prove, quindi non dettero risultati validi.

### 6.3.2 Esperienze Politecnico di Torino

Il Politecnico di Torino, nell'ambito delle ricerche sulla sicurezza dei reattori nucleari ad acqua leggera dell'ENEA – Attività NEBH del progetto RISIL, aveva ottenuto risultati sperimentali sul deflusso bifase aria – acqua a freddo con l'utilizzo di misuratori a bersaglio (Drag Disk) e turbinette [28].

La frazione di vuoto era stata simulata con un deflusso bifase bicomponente aria – acqua; la matrice sperimentale indicava il rapporto tra le due fasi. Gli strumenti utilizzati, entrambi volutamente commerciali, furono:

- ▶ Turbina Tylor – Fisher mod. 7286-4012,
- ▶ Bersaglio Ramapo Mark V serie numero 30304.

Le condizioni di temperatura e pressione, come già accennato, erano lontane da quelle di SPES3, come anche le velocità e di conseguenza le forze coinvolte (inferiori).

Questa esperienza permise di concludere che l'accoppiamento di questi due dispositivi consente la misura della portata in massa del deflusso, anche senza conoscere la frazione di vuoto, come affermato dallo studio

analitico/preliminare fatto in SIET [3]. Le prove suggerirono anche particolare attenzione nella calibrazione e nella ricerca delle relazioni funzionali tra i segnali misurati.

### 6.3.3 Contatto con produttori SPOOL PIECE

Sono state contattate le due principali aziende che nel 1984 si erano proposte come costruttori dell'intero SPOOL PIECE per misure di portata massica bifase, quindi potenziali fornitori di tutti e tre gli strumenti:

- ▶ **Measurement Incorporated** (<http://www.measinc.com/>)
- ▶ **Sciencetech Incorporated** (<http://www.sciencetech-inc.com/>)

Entrambe le aziende non producono più tali strumenti; è quindi necessario approvvigionare singolarmente i diversi strumenti che compongono lo SPOOL PIECE.

### 6.3.4 Utilizzo di uno strumento di tipo elettrico per la misura della spessore di film liquido

Come già accennato al paragrafo 6.3, è possibile avere un riscontro sulla massa uscente da una rottura, utilizzando un sensore conduttivo che misura la conducibilità elettrica dello strato di liquido che bagna due elettrodi affiancati, indicati con T (transmitter) e R (receiver) in Figura 13. Lo strumento può essere posto lungo le pareti interne dei contenitori che ricevono la portata bifase.

Il valore di conducibilità è proporzionale allo spessore del film liquido, che dipende dalla condensazione del vapore sulle pareti a più bassa temperatura e dalla fase liquida uscente dalla rottura.

Lo strumento è stato sviluppato in ambito accademico dal Centro di Ricerca Dresden-Rossendorf.

Il dispositivo non può restituire un valore accurato della portata bifase, poiché non considera la parte del fluido rimasta in forma gassosa, ma può essere utilizzato come verifica per altri strumenti e può essere fondamentale per calcolare il grado di condensazione durante il trasferimento di massa dai circuiti primario/secondario al contenimento.

Lo strumento richiede una serie di verifiche e adattamenti per funzionare nell'impianto SPES3.

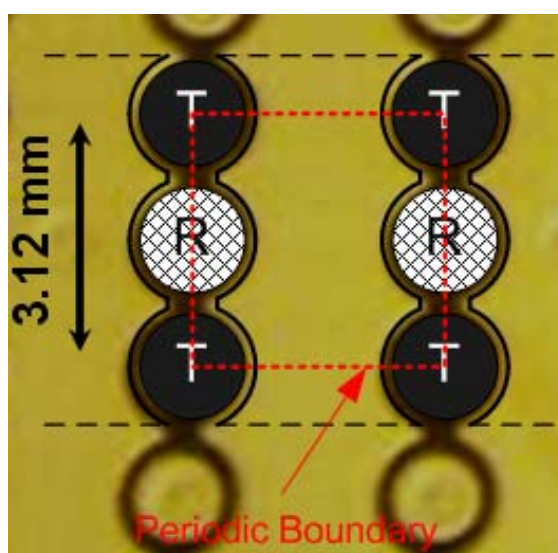


Figura 13: Rappresentazione del dispositivo in grado di misurare lo spessore dello strato di liquido

## 6.4 Misuratore di frazione di vuoto

Come indicato in Tabella 2, Tabella 3, Tabella 4, Tabella 5 e in Tabella 6 il misuratore di frazione di vuoto deve avere caratteristiche diverse se posto a monte o a valle della generica rottura, Tabella 9:

**Tabella 9: Massimi e minimi valori della densità di miscela e della frazione di vuoto a monte e valle della generica rottura**

| Monte                                   |      |       | Valle                                   |       |       |
|-----------------------------------------|------|-------|-----------------------------------------|-------|-------|
|                                         | MIN  | MAX   |                                         | MIN   | MAX   |
| Temperatura [°C]:                       | 41.0 | 345   | Temperatura [°C]:                       | 36.81 | 216   |
| Pressione [MPa]:                        | 0.15 | 15.64 | Pressione [MPa]:                        | 0.10  | 2.0   |
| Densità di miscela [kg/m <sup>3</sup> ] | 0.93 | 956.9 | Densità di miscela [kg/m <sup>3</sup> ] | 0.81  | 949.5 |
| Frazione di vuoto                       | 0    | 1     | Frazione di vuoto                       | 0.62  | 1     |

In generale, a monte si hanno pressioni e temperature più elevate e maggiore variabilità della densità di miscela, mentre a valle si hanno pressioni e temperature inferiori e una densità di miscela più simile alla densità del vapore.

La ricerca di un misuratore di frazione di vuoto rappresenta il punto più delicato e complesso di tutta l'indagine, soprattutto perché si è deciso di tenere la possibilità di usare un gammadensitometro come soluzione ultima. Le motivazioni di questa scelta sono:

- ▶ gli alti costi dello strumento,
- ▶ i costi di gestione dello strumento,
- ▶ le problematiche relative alla radioprotezione.

La ricerca bibliografica sui misuratori di frazione di vuoto si è avvalsa degli articoli [29], [30] e delle tesi di laurea [31], [32].

Gli strumenti presi in considerazione per questa misura sono:

- ▶ Sistemi ad assorbimento di raggi gamma
  - o Gammadensitometro
- ▶ Sistemi di misura della conduttività locale o impedenza capacitiva
  - o Sonde conduttive
  - o Wire Mesh Sensor
  - o Condensatori (Capacitive Wire)
  - o Strumenti capacitivi integrali con elettrodi a parete
- ▶ Sistemi ad ultrasuoni
  - o Ultrasonic Mesh Sensor
- ▶ Sistemi ad assorbimento di luce visibile
  - o Photon-Laser meter
  - o Metodo a fibra ottica

Al momento sembra possibile reperire sul mercato i gammadensitometri, le sonde conduttive e gli strumenti a fibra ottica.

### 6.4.1 Strumenti commerciali

#### Gammadensitometro

Per i gammadensitometri, è stata contattata la **GAMMATOM SRL** ([www.gammatom.it](http://www.gammatom.it)), la quale non produce più questi articoli.

Sempre in Italia è stata contattata la SEMAT S.p.A. (<http://www.sematspa.it>) che produce densitometri a raggi X ma per la valutazione dello spessore di solidi. I prodotti non sono quindi adatti per le nostre applicazioni.

Per il momento non si ritiene utile contattare altri fornitori, dal momento che si vorrebbe evitare l'utilizzo di questi dispositivi. Una rappresentazione schematica di un gammadensitometro a tre raggi è presentata in Figura 14.

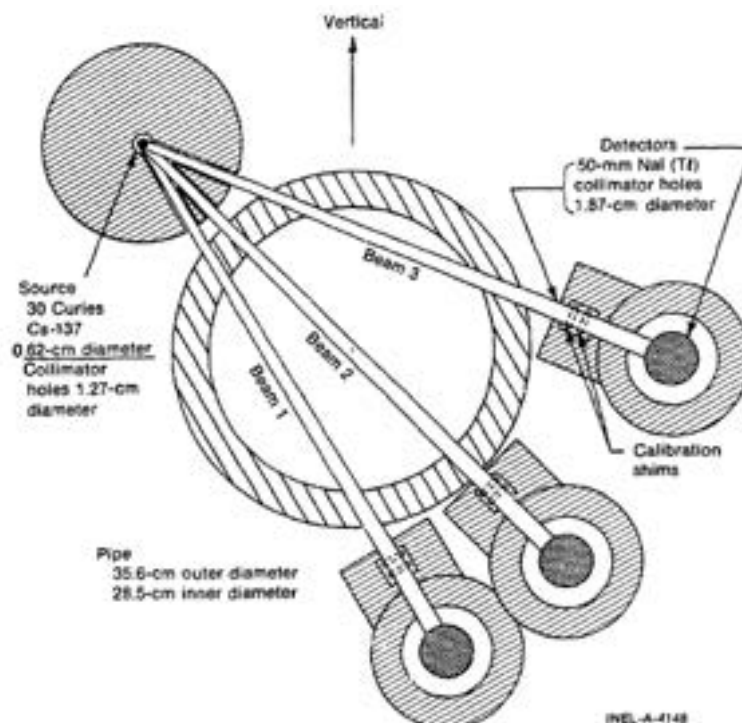


**Figura 14: Gammadensitometro a tre raggi**

I vantaggi ottenibili dalla scelta di questo strumento sarebbero:

- esperienze passate hanno dimostrato la fattibilità della misura della frazione di vuoto con questo dispositivo,
- non risente di pressione e temperatura,
- può misurare qualsiasi frazione di vuoto, da totale fase liquida a totale fase gassosa, quindi può essere posizionato sia a monte sia a valle,
- mancanza di parti mobili, quindi delicate,
- breve tempo di risposta,
- procedure di calibrazione e taratura note

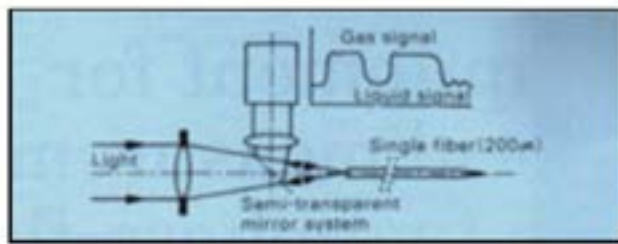
Gli svantaggi sono già stati elencati all'inizio del paragrafo 6.4.

### Sonda per la misura della conduttività locale

Per le sonde conduttive, la **RBI INSTRUMENTATION** (<http://www.rbi-instrumentation.com/>) propone delle sonde ad ago, Figura 15, che misurano la conduttività locale del fluido. Il vantaggio principale è dato dall'alta risoluzione temporale.

A valle, data la presenza dominante della fase gassosa e le alte velocità, la discriminazione tra la presenza di liquido o vapore può essere complicata. Lo strumento potrebbe essere utilizzato a monte, dove la separazione tra le fasi è più netta e le velocità minori.

Tuttavia, per gli scopi della campagna sperimentale su SPES3, una misura locale della frazione di vuoto non è sufficiente per determinare la distribuzione delle due fasi nella sezione. Un incremento del numero delle sonde provocherebbe un eccessivo disturbo al flusso e il rischio di rottura delle sonde stesse. Il posizionamento di più sonde in diverse posizioni del diametro seguendo l'asse del tubo non restituirebbe un'informazione accurata data la variabilità dei regimi di moto.



principle



single probe

Figura 15: Sonda ad ago

### Fibra ottica

Per gli strumenti a fibra ottica, si è trovata la **KANOMAX**, (<http://www.kanomax-usa.com/index.html>). Il principio è simile a quello delle sonde induttive: quando il sensore è attraversato da una bolla, l'intensità della luce riflessa aumenta a seconda dell'area ed aumenta proporzionalmente alla velocità di avvicinamento.

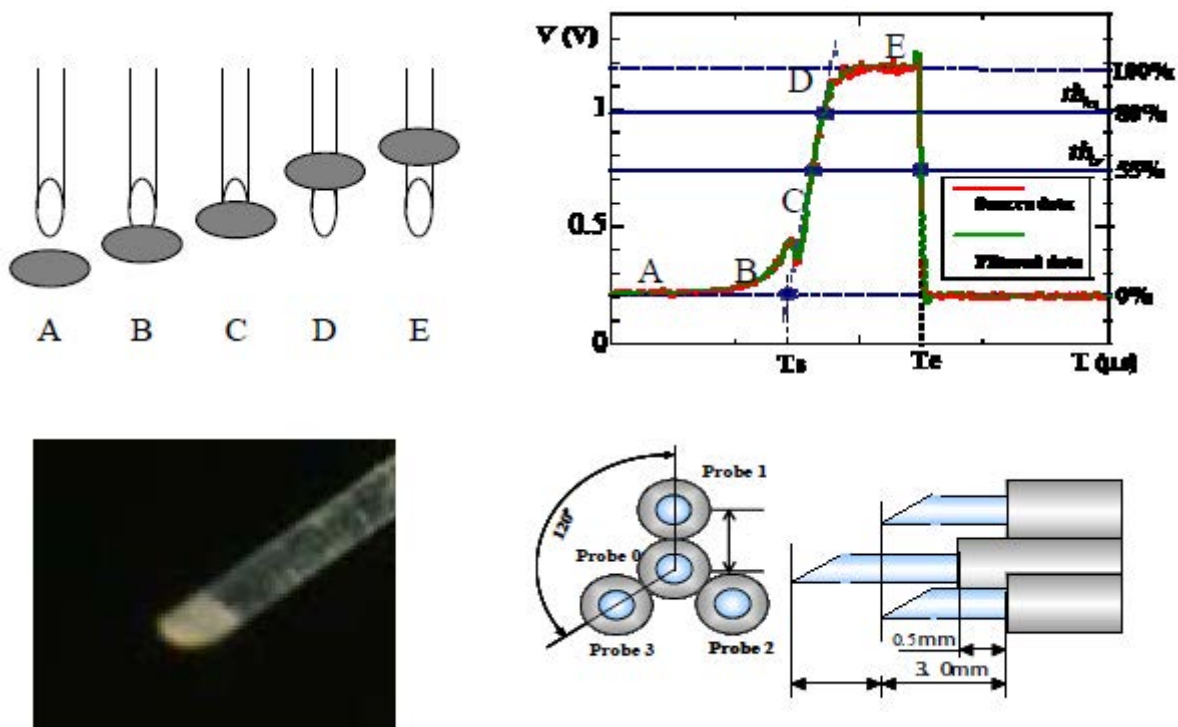


Figura 16: Fibra ottica per la misura di frazione di vuoto e funzionamento

Come mostrato in Figura 16, anche la fibra ottica valuta le condizioni locali. Il vantaggio potrebbe risiedere nelle ridotte dimensioni dei sensori e la sensibilità degli stessi; tuttavia a causa delle alte velocità e dell'elevato grado di rarefazione delle gocce di liquido nella matrice gassosa, la discriminazione tra le due fasi non sembra fattibile.

### 6.4.2 Strumenti sviluppati in ambito accademico

A livello accademico, riguardo la frazione di vuoto, il **Forschungszentrum Dresden-Rossendorf FZD** (Centro di Ricerca Dresden-Rossendorf) è l'istituto di riferimento (<http://www.fzd.de/db/Cms?pNid=360>). Nell'ambito delle ricerche sulla sicurezza, il dipartimento di TermoFluidi dinamica sperimentale presenta varie tecniche ed apparati di misura della frazione di vuoto.

Alcuni ricercatori della SIET hanno avuto un contatto diretto con il Professor. H.-M. Prasser, il responsabile del dipartimento e hanno visitato direttamente i laboratori presso l'università di Zurigo. Il centro propone varie alternative per la misura della frazione di vuoto:

- ▶ Wire-mesh sensors
- ▶ Sonde ad ago
  - o Misura della conduttività locale
  - o Misura dell'impedenza capacitiva
- ▶ Gammadensitometro
- ▶ PET (Positron Electron Tomography)

Inoltre il centro realizza anche la tomografia del volume di controllo con le seguenti tecniche:

- ▶ Optical tomography
- ▶ Gamma-ray computed tomography
- ▶ X-ray- and micro X-ray computed tomography

Il vantaggio della tomografia è la possibilità di conoscere anche i regimi di moto. Nel presente documento questa eventualità non viene presa in considerazione.

### Sonde per la misura della conduttività locale e gammadensitometri

Le sonde ad ago per la misura della conduttività locale e i gammadensitometri presentano gli stessi problemi degli strumenti commerciali, paragrafo 6.4.1, descritti in precedenza. La bibliografia di riferimento, relativa alle sonde per la misura della conduttività locale, è rappresentata dagli articoli [33], [34], [35] e [36].

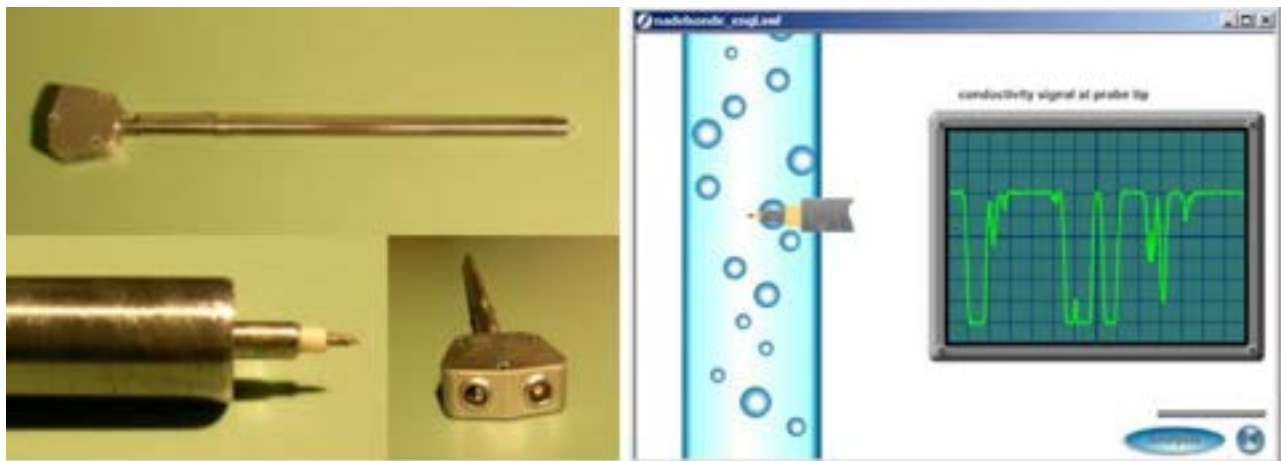


Figura 17: Sonde conduttive ad ago per misura locale e dimostrazione del principio di misura

La bibliografia di riferimento, relativa ai gammadensitometri, è rappresentata dagli articoli [37] e [38].

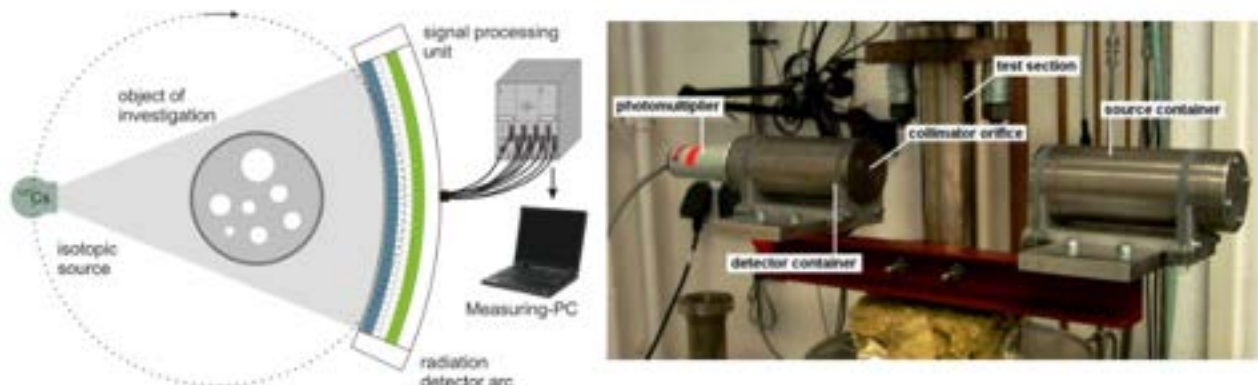


Figura 18: Gammadensitometro e semplice rappresentazione del funzionamento

## PET

La PET, Positron Emission Tomography, presenta come inconveniente la necessità di avere almeno una delle due sostanze o fasi marcata radioattivamente. Questo non è assolutamente possibile nell'impianto SPES3.

### Wire mesh sensor conduttivi

I wire mesh sensor rappresentano, tra le varie possibilità, quella su cui la SIET ha riposto maggiori speranze ed aspettative, infatti la visita ai laboratori di Zurigo ha avuto come scopo principale la valutazione delle capacità di questo strumento. Il principio di misurazione si basa sulla misura della conduttività del fluido. Lo strumento è costituito da due griglie conduttrici uguali distanziate meno di un millimetro che occupano la sezione del tubo. Dove due fili conduttori si incrociano emettono un impulso che viene ricevuto dal corrispondente incrocio sull'altra griglia. I punti della griglia vengono attivati selettivamente.

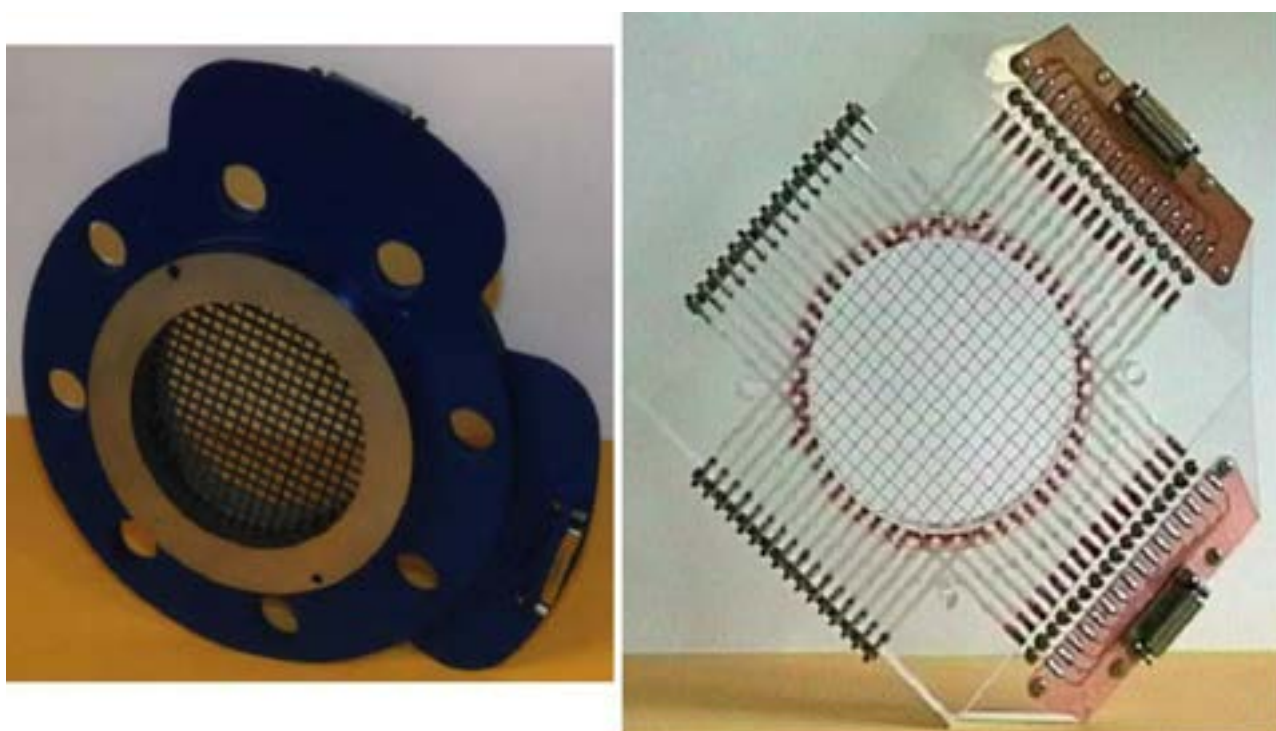


**Figura 19: Wire mesh sensor**

La possibilità di avere griglie molto fitte e quindi una valutazione non solo locale della frazione di vuoto rendono il sistema molto interessante, come mostrato in Figura 19.

Per il momento il sistema è stato sviluppato fino a pressioni di 7 MPa e 286°C, perfettamente in linea con le condizioni a valle della rottura; tuttavia, le alte velocità che si sviluppano comportano notevoli sforzi che la griglia difficilmente può sostenere. Inoltre la prevalenza della fase gassosa a valle della rottura rende lo strumento praticamente inutilizzabile, poiché non è sensibile ad alte frazioni di vuoto e fasi fortemente disperse. Il costo dello strumento si aggira sui 30.000 euro.

Le basse velocità di monte e la frazione di vuoto variabile tra 0 e 1 permettono invece di valutarne l'installazione a monte; tuttavia le alte pressioni e temperature non permettono l'utilizzo a meno di una ricerca ad hoc, effettuata sempre da Prasser al FZD, con un costo di circa 70.000 euro.

La bibliografia di riferimento comprende gli articoli [39], [40], [41], [42], [43] e [44].

### Wire mesh sensor ad ultrasuoni

Il centro ha anche sviluppato i cosiddetti wire mesh sensor ad ultrasuoni, che differiscono dai WMS ad impedenza per la natura dell'impulso inviato: viene misurata la conduttanza acustica. I vantaggi e svantaggi sono i medesimi descritti in precedenza.

La bibliografia di riferimento si avvale dell'articolo [45].

Altri strumenti che sfruttano gli ultrasuoni e l'effetto doppler sono i seguenti:

Schiera di sensori ad ultrasuoni [46]: posto esternamente alla sezione test, illumina la sezione e valuta il tempo di volo tra l'emissione del suono e la riflessione dello stesso. Problemi su alta velocità e impossibilità di cogliere l'intera sezione, a causa della zona cieca che si viene a creare dietro le bolle o gocce.

Metodo di misura ultrasonico ad effetto Doppler [47]: stesso apparato di misura della schiera di sensori, ma lo strumento si basa sull'effetto Doppler. Stesse problematiche e impossibilità dichiarata di misurare miscele con frazioni di vuoto superiori al 7%.

Gli strumenti ad ultrasuoni non hanno attualmente raggiunto uno sviluppo accettabile per i nostri scopi.

### Strumenti capacitivi

L'ultimo metodo considerato per la determinazione della frazione di vuoto o della densità di miscela sono i misuratori di impedenza capacitiva. Lo strumento misura la capacità elettrica o capacitanza del fluido. Ne esistono di due tipi diversi:

- ▶ misuratori locali
- ▶ misuratori integrali

Il centro FZD ha sviluppato delle sonde capacitive locali [48]. Sebbene il principio di funzionamento sia diverso dalla sonde per misura di conduttività locale, i vantaggi e gli svantaggi sono sostanzialmente gli stessi. Quindi non vengono prese in considerazione per i problemi di resistenza meccanica, per il disturbo che provocano al fluido e per il carattere locale della misurazione, che non può cogliere la distribuzione all'interno di tutta la sezione.

Dal contatto diretto con Prasser, l'utilizzo di questi dispositivi è stato escluso.

I misuratori capacitivi integrali invece hanno il vantaggio di considerare un volume di fluido. Lo strumento è costituito da due elettrodi, posti solitamente all'esterno della sezione di prova, che individuano un condensatore e determinano un volume di controllo. Il dispositivo ha quindi lo scopo di misurare la capacità elettrica o capacitanza del condensatore e valutare la variazione nel tempo. Un'opportuna taratura e calibrazione possono infine restituire il valore della frazione di vuoto.

In letteratura, il condensatore è solitamente costituito da due armature ad anello metallico, come mostrato in Figura 20, per questo viene spesso denominato Capacitive Wire.

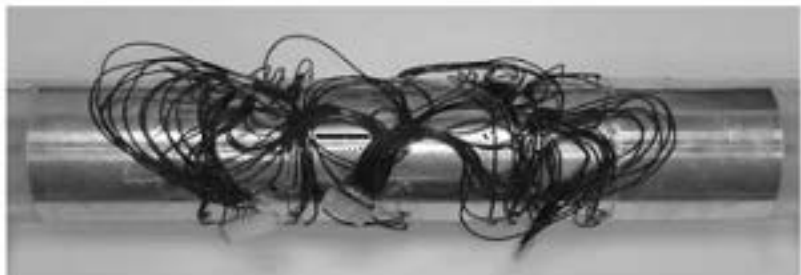
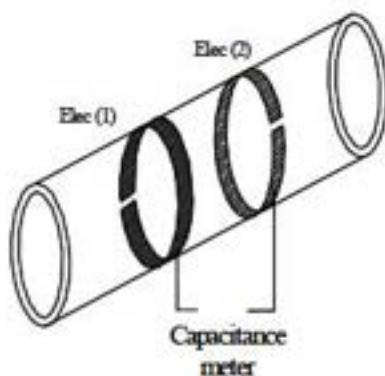


**Figura 20: Tipica configurazione della sonda capacitiva integrale ad anelli o capacitive wire**

Se gli anelli sono posti esteriormente al tubo, è necessario che il condotto non sia in materiale conduttivo. La letteratura di riferimento si avvale degli articoli [49], [50] e [51].

Lo strumento capacitivo integrale, per la sua semplicità, la mancanza di parti mobili e la caratteristica di considerare l'intero volume rappresenta la soluzione migliore per la misura di frazione di vuoto. Inoltre anche i costi di realizzazione, non noti per il momento, sembrano essere contenuti.

Poiché per il momento lo strumento è stato realizzato solo per fini di ricerca e in condizioni inevitabilmente diverse da quelle di SPES3, la SIET ha deciso di proseguire autonomamente il suo sviluppo.

#### 6.4.3 Opzioni per il futuro

Date l'impossibilità di trovare in ambito commerciale degli strumenti per la misura di frazione di vuoto nelle condizioni di SPES3, le difficoltà riscontrate in ambito accademico e gli alti costi, si ritiene consigliabile lo sviluppo di due concetti di sensori:

- ▶ Sensore capacitivo integrale
- ▶ Sensore fotometro a laser

Il sensore capacitivo integrale, come indicato al paragrafo 6.4.2, è solo ai primi stadi di sviluppo in ambito accademico, quindi è necessario dimostrare la possibilità di funzionamento ed utilizzo di questo strumento alle condizioni operative di SPES3.

Il secondo dispositivo è stato completamente pensato in SIET e non ci sono riferimenti in letteratura, né a livello commerciale su strumenti di questo genere. Lo sviluppo, anche per queste motivazioni, sembra richiedere maggiori risorse, quindi in un primo momento si privilegerà il lavoro sui sensori capacitivi.

I motivi alla base della scelta di sviluppare autonomamente i precedenti sensori sono i seguenti:

- ▶ In ambito commerciale non vi sono strumenti adatti ai nostri scopi, eccetto il gammadensitometro che però comporta alti costi di approvvigionamento, di gestione e misure radioprotezionistiche.
- ▶ In ambito accademico appaiono interessanti il WMS ad alta pressione e temperatura e i capacitivi di tipo integrale: i costi di sviluppo del primo sono alti e non si hanno garanzie sul funzionamento del prodotto; gli strumenti capacitivi integrali sono ancora ai primi stadi di sviluppo e per il momento non sono previsti alle condizioni di SPES3.

#### Possibili sviluppi di sensore capacitivo di tipo integrale per la misura di grado di vuoto

Sono state svolte in SIET delle prove preliminari a freddo e in condizioni statiche riempiendo con acqua a diversi livelli una sezione di prova strumentata con elettrodi di varie forme a costituire un condensatore. La sezione di prova era rappresentata da un tubo in plexiglass posto in verticale e con il fluido all'interno a pressione ambiente.

È stato verificato che al variare della quantità d'acqua presente tra le armature si modifica sensibilmente il segnale elettrico relativo alla capacità del condensatore. Dimostrata la validità del metodo in condizioni statiche, i prossimi passi riguardano il fluido in movimento. Una prima verifica della sensibilità del dispositivo alla presenza di fase gassosa fluente in fase liquida ferma è stato fatto generando delle bolle d'aria nel condotto pieno di acqua. Anche in questo caso la variazione del segnale elettrico è stata sensibile e permette di procedere con lo sviluppo.

È necessaria una fase di sviluppo che consenta di valutare i fattori geometrici che influiscono sul legame tra il segnale e i regimi di moto della miscela e che valuti la risposta del dispositivo ai repentini cambiamenti di velocità. Inoltre si provvederà all'attività di sviluppo tecnologico e prova di uno strumento che resista alle condizioni di pressione e temperatura di SPES3 con sufficiente grado di affidabilità.

#### Possibili sviluppi di sensore fotometro a laser per la misura di densità

Sono state svolte in SIET anche delle prove preliminari a freddo per valutare la capacità di ottenere la frazione di vuoto con un sistema fotometrico. La sezione di prova era rappresentata da un tubo in plexiglass posto in verticale. Sono state realizzate principalmente due prove: sezione di prova riempita d'acqua con bolle d'aria ascendenti lungo il condotto e sezione di prova riempita con vapore ascendente e gocce di liquido in fase discendente. Il principio di misura è basato sulla variazione della resistenza di un sensore fotosensibile illuminato da un laser quando il percorso del raggio viene ostacolato da gocce d'acqua o bolle di vapore. Le prove preliminari hanno dimostrato la validità del metodo. Il problema principale di questa tecnica è rappresentata dalla zona d'ombra che si viene a creare dietro ad una discontinuità, ma può essere limitato sviluppando un sistema a tomografia radiale, utilizzando strumentazione commerciale. I limiti di utilizzo sono inoltre legati ai valori di temperatura sopportabili dai componenti elettronici.

## 6.5 Misuratore di velocità del fluido

La scelta del misuratore dipende fortemente dalla velocità delle due fasi: durante i primi secondi di transitorio, a causa dell'espansione del fluido si sviluppano velocità elevate: la velocità con cui si modificano i parametri è un indicatore per la valutazione del tempo di risposta, o di reazione, dei sensori da utilizzare. Come indicato in Tabella 2, Tabella 3, Tabella 4, Tabella 5 e in Tabella 6, lo strumento deve avere caratteristiche diverse se posto a monte o a valle della generica rottura, Tabella 10:

**Tabella 10: Massimi e minimi valori delle velocità della fase liquida e gassosa a monte e valle della generica rottura e del segnale teorico della turbinetta**

| Monte                                |       |      | Valle                                |      |     |
|--------------------------------------|-------|------|--------------------------------------|------|-----|
|                                      | MIN   | MAX  |                                      | MIN  | MAX |
| Temperatura [°C]:                    | 41.0  | 345  | Temperatura [°C]:                    | 36.8 | 216 |
| Pressione [MPa]:                     | 0.15  | 15.6 | Pressione [MPa]:                     | 0.10 | 2.0 |
| Velocità della fase liquida [m/s]    | -17.2 | 66.7 | Velocità della fase liquida [m/s]    | -5.7 | 205 |
| Velocità della fase gassosa [m/s]    | -20.9 | 154  | Velocità della fase gassosa [m/s]    | -5.9 | 405 |
| Velocità stimata della turbina [m/s] | -20.9 | 66.7 | Velocità stimata della turbina [m/s] | -5.9 | 330 |

In generale, a monte le velocità di entrambe le fasi sono nettamente inferiori rispetto a valle. Le temperature e pressioni cui lo strumento deve operare sono invece maggiori prima della rottura.

Sia in letteratura, sia nelle passate esperienze effettuate in SIET, per la misurazione della velocità del fluido è stata usata una *turbina*.

La letteratura di riferimento, oltre a quella già elencata nei paragrafi 6.1 e 6.3.1, è rappresentata dagli articoli [52] e [53].

Gli strumenti presi in considerazione per questa misura sono:

- ▶ Turbine Flowmeter (Misuratore di portata a turbina)
- ▶ Vortex Shedding Flowmeter (Misuratore di portata a generazione di vortici)
- ▶ Ultrasonic Doppler Velocimeter (Velocimetro ultrasonico ad effetto doppler)
- ▶ Celerity of Pressure Waves (Celerità delle onde di pressione)

Gli strumenti reperibili in ambito commerciale sono le turbine e i misuratori di portata a generazione di vortici. I velocimetri ultrasonici ad effetto doppler e i misuratori di celerità delle onde di pressione sono stati sviluppati in ambito accademico e richiedono un'ulteriore fase di ricerca e sviluppo.

### 6.5.1 Strumenti commerciali

#### Turbine

I misuratori di portata a turbina sono uno dei metodi più utilizzati per il calcolo della portata massica in monofase. Come dimostrato dalla letteratura e dalle precedenti esperienze in SIET, questi dispositivi possono essere utilizzati in bifase per il calcolo della velocità della miscela. La Figura 21 presenta alcune tipiche turbine per bifase.

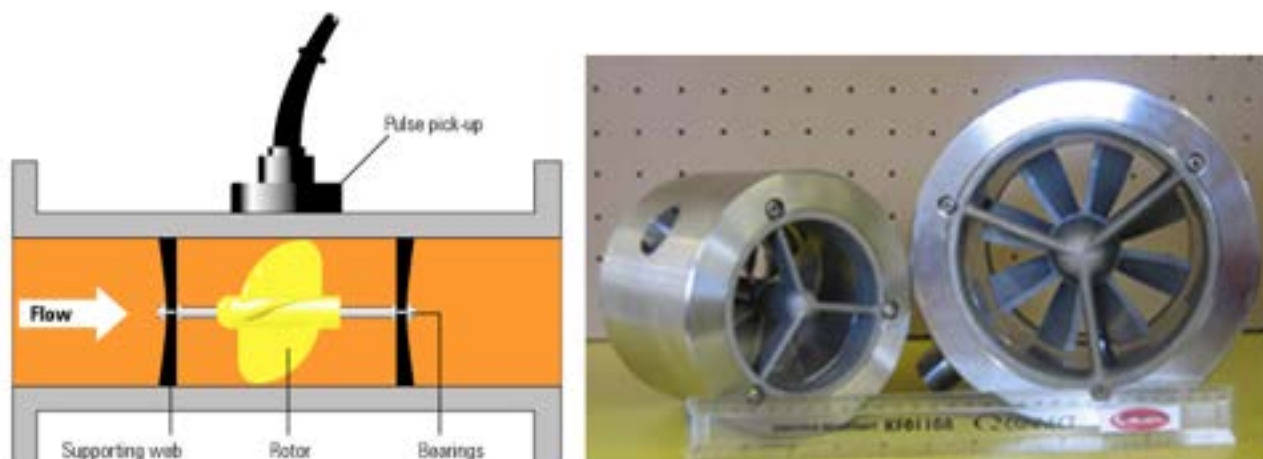


**Figura 21: Turbine per misura di velocità di fluido**

Per le condizioni operative di SPES3 devono essere valutati alcuni aspetti:

- ▶ in caso di miscela bifase acqua liquida – vapore, è necessario dimensionare la turbina in modo da essere sensibile sia a portate interamente costituite da fase gassosa, sia a portate completamente costituite da fase liquida: quindi la girante deve essere capace di ruotare a basse velocità del vapore, contraddistinto da una bassa densità e non deve danneggiarsi ad alte velocità della fase liquida, contraddistinta da un'alta densità.
- ▶ La turbina deve sopportare un rapido incremento di velocità e temperatura all'inizio del transitorio.
- ▶ Se il dispositivo viene posto a monte, la velocità della fase liquida stimata è inferiore ai 70 m/s; tuttavia, in questa posizione, lo strumento deve sopportare alte temperature e pressioni. Inoltre la turbina viene investita sia da portate totalmente in fase liquida, sia da portate totalmente in fase gassosa e tutti gli stadi intermedi.
- ▶ Se il dispositivo viene posto a valle, la velocità della fase liquida stimata è superiore ai 200 m/s; tuttavia pressioni e temperature sono decisamente inferiori rispetto alla posizione prima della rottura. La portata è quasi ininterrottamente costituita da vapore, anche se c'è il rischio di tappi di liquido per alcuni secondi durante il transitorio.
- ▶ È necessaria una campagna di taratura e calibrazione che valuti quale modello analitico descrive meglio la velocità della turbina: il numero di giri del rotore è proporzionale alla velocità della miscela. Per avere informazioni sulla velocità di ogni singola fase, sono stati elaborati tre modelli, Aya, Rouhani e volumetrico ed è necessario determinare quale di questi descriva meglio il comportamento della turbina.

In ambito commerciale, è possibile utilizzare la turbina per determinare la velocità della miscela solo se il dispositivo di misura viene posto a monte della rottura, perché tutte le aziende contattate, di cui si riportano di seguito gli estremi, propongono turbine che difficilmente superano i 60 m/s.

Sono state richieste informazioni alla **HYDROTECHNIK**, (<http://www.hydrotechnik.com/>) ma le soluzioni presenti nei cataloghi e in particolare il datasheet dei misuratori di flusso a turbina che ci hanno fornito non presentano caratteristiche compatibili con i valori di pressione, temperatura e velocità di SPES3.

Si è presa in considerazione anche la **FLOW TECHNOLOGY** (<http://www.ftimeters.com/>), che produce misuratori a turbina e altri dispositivi per la misura di portate. In particolare questa azienda può rivelarsi interessante in quanto ha sviluppato delle turbine per l'industria aerospaziale. Questi prodotti hanno la capacità di misurare alte velocità in condizioni di elevata temperatura, tuttavia non sono previste per miscele bifase. Non si esclude un contatto per ricevere maggiori informazioni, soprattutto sulle ricerche che la società sta portando avanti.

È stato anche contattato il leader mondiale in misuratori di portata a turbina: la **Hoffer Flow Controls, Inc** (<http://www.hofferflow.com>) attraverso la ditta SMERI ([www.smeri.com](http://www.smeri.com)). I prodotti proposti dall'azienda sono diversi a seconda della natura del fluido:

- ▶ Turbine Flowmeter for Gas Service
- ▶ Turbine Flowmeter for Liquid Service

La velocità massima raggiungibile dai due strumenti è di circa 60 – 70 m/s. L'utilizzo di questi strumenti è quindi ristretto a monte della rottura.

Alla sezione RICERCA e SVILUPPO della HOFFER è stata richiesta una valutazione per la realizzazione di turbine ad hoc che possano essere poste a valle della rottura e che possano quindi sopportare velocità superiori ai 200 m/s. L'indagine ha avuto esito negativo. L'unico modo per poter utilizzare questi misuratori a valle della valvola di rottura sembra essere quello di ingrandire localmente i condotti in modo da diminuire la velocità del fluido. Questa soluzione è inaccettabile per lo scopo di simulazione dell'impianto SPES3. Sembra possibile utilizzare le turbine commerciali della HOFFER a monte della rottura, valutando quale modello (Gas o Liquido) sia migliore a seconda delle diverse condizioni previste per i transitori nelle diverse posizioni. Rimane incognita la capacità della turbina di resistere al rapido incremento di velocità iniziale.

### Misuratori di portata a generazione di vortici

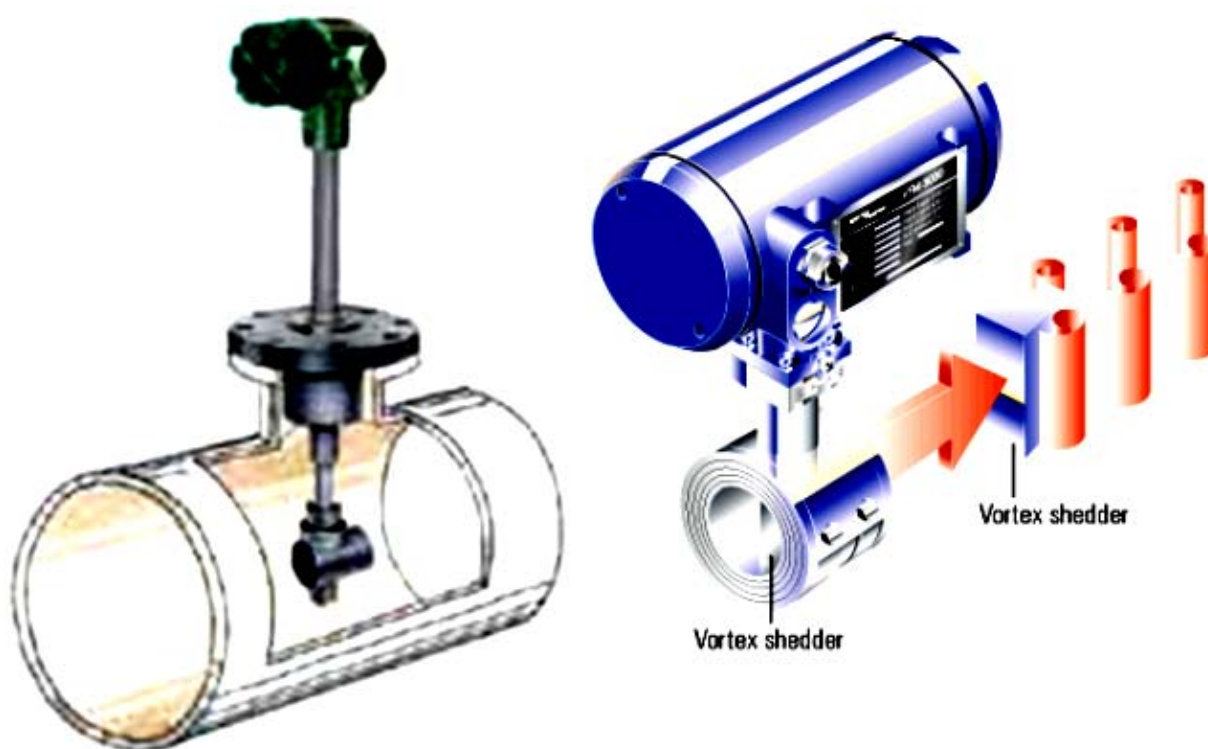


**Figura 22: Misuratori a generazione di vortici per misure bifase**

I vortex shedding meter rappresentano un'altra valida possibilità per la misura della velocità della miscela. Il principio di funzionamento è stato già spiegato al paragrafo 5.1.3.

Il principale vantaggio di questo strumento è l'assenza di parti mobili, quindi è esclusa la possibilità di danneggiamento a causa di portate di solo vapore o solo liquido, a causa di incrementi di pressione e temperatura e delle alte velocità. Gli strumenti disponibili sul mercato misurano velocità massime di 60 m/s e funzionano in monofase, pertanto sarà eventualmente necessaria un'attività di R & S per l'impiego col bifase.

Le aziende contattate sono le seguenti:

- ▶ SIERRA INSTRUMENTS (<http://www.sierrainstruments.com/>) attraverso SMERI ([www.smeri.com](http://www.smeri.com))
- ▶ KROHNE (<http://www.krohne.com/>)
- ▶ ENDRESS+HAUSER (<http://www.it.endress.com/>)
- ▶ BAGGI (<http://www.baggi.com/strumentazione/index.php>)

I dispositivi proposti dalle diverse aziende possono essere presi in considerazione se la strumentazione speciale verrà posta a monte della rottura, dove le velocità sono inferiori ai 70 m/s, anche se deve essere valutato in sede di calibrazione e taratura il comportamento degli strumenti con miscele bifase. A valle della valvola di rottura, le alte velocità rendono difficoltoso il conteggio dei vortici generati.

### **Velocimetro ultrasonico ad effetto doppler**

Per l'Ultrasonic Doppler Velocimeter è stato contatto via e-mail il Sig. Jean-Claude Attiach della **SIGNAL PROCESSING** (<http://www.signal-processing.com/index.html>), leader nel settore. Il sistema misura la velocità del fluido basandosi sull'effetto Doppler, quindi potenzialmente può misurare entrambe. Non si hanno avuto risposte dalla società contattata.

### **6.5.2 Opzioni per il futuro**

Per la misura della velocità della miscela a monte della valvola di rottura di possono prendere in considerazione delle turbine o dei misuratori a generazione di vortici commercialmente offerti dalle aziende citate in precedenza.

Per la misura della velocità a valle della valvola di rottura vi sono diverse possibilità che esulano dal campo commerciale.

### **Turbine CENG**

Per ovviare agli inconvenienti sopradescritti riguardanti le turbine, in passato la SIET le aveva fatte realizzare direttamente dal **Centre d'Etudes Nucleaires di Grenoble** (Francia), che era coinvolto nella realizzazione di un misuratore di portata bifase.

In particolare, questi dispositivi avevano la capacità di raggiungere i 100 m/s e di resistere agli sforzi, agli incrementi di temperatura e pressione previsti.

Il comportamento delle turbine fu soddisfacente e permise la valutazione dei modelli analitici migliori.

Il Politecnico di Torino, come riportato nel paragrafo 6.3.2, ha utilizzato per la misura di portata bifase aria – acqua a freddo turbine di tipo commerciale, con pieno successo.

Nel caso le turbine commerciali non riuscissero a rispondere alle necessità di SPES3 è possibile contattare nuovamente il centro, anche se gli anni trascorsi e la mancanza di ricerca nel ventennio 1988 – 2008 fanno pensare a difficoltà di approvvigionamento.

Si è deciso di adottare preferibilmente altre soluzioni.

### **Misuratori di portata a generazione di vortici modificati**

L'utilizzo dei misuratori di portata a generazione di vortici può essere preso in considerazione per le velocità a valle della rottura solo a seguito di un lavoro di modifica dell'attuale strumentazione in commercio. Lo scarso interesse dimostrato dalle aziende per tale modifica, dovuto alla particolarità della misura, richiede che le variazioni vengano effettuate direttamente dalla SIET o da altri soggetti in grado. È necessario un aumento della conoscenza sul funzionamento degli strumenti stessi, un'elaborazione del segnale in modo da distinguere la presenza di diverse fasi (liquido e vapore) e il miglioramento del sistema di conteggio dei vortici attraverso le celle piezoelettriche, che devono poter misurare alte e basse frequenze. Gli strumenti necessari per tali modifiche sono tutti dispositivi da laboratorio, mentre il generatore di vortici può essere acquistato dalle aziende elencate in precedenza.

### **Velocimetro ultrasonico ad effetto doppler modificato**

Gli Ultrasonic Doppler Velocimeter sono tuttora dispositivi in via di sviluppo in ambito accademico, soprattutto per ampliare l'applicazione a diversi fluidi e in diverse condizioni, anche se gli studi preliminari risalgono agli anni Settanta. La letteratura di riferimento è rappresentata dai seguenti articoli [54], [55] e [56].

Lo strumento è stato utilizzato con liquidi conduttori di corrente, come il sodio e in particolare per applicazioni mediche che richiedono mezzi non intrusivi. Negli esperimenti descritti nei diversi articoli, le velocità sono nell'ordine del cm/s e spesso il problema riscontrato è quello di misurare velocità ancora più basse.

Le caratteristiche del dispositivo lo rendono appetibile, ma è necessaria una ricerca ed uno sviluppo che possano incontrare le esigenze di misura dell'impianto SPES3, quindi alte velocità, presenza di miscela bifase e fluido non conduttore.

Il sistema può essere sviluppato da SIET con strumenti commercialmente disponibili come emettitori e ricevitori di impulsi ad ultrasuoni e trasduttori. Di seguito sono riportate le aziende produttrici:

- General Electric Company (<http://www.gesensing.com/products/GS868.htm>)
- Piezotechnologies (<http://www.piezotechnologies.com/immersion.htm>).

I problemi principali dei sistemi ad ultrasuoni sono dovuti alla bassa densità della fase vapore che rende impossibile il passaggio degli ultrasuoni da testine esterne al fluido attraverso la parete del tubo. L'uso di ultrasuoni richiederebbe quindi emettitori e ricevitori inseriti nel condotto con problemi di resistenza a temperatura e pressione.

### Celerità delle onde di pressione

Rispetto agli ultrasuoni, l'utilizzo di onde sonore nel campo dell'udibile apre maggiori possibilità per la realizzazione di attrezzature costruite in laboratorio. Una possibile soluzione prevede una sorgente di onde sonore posizionata lungo il tubo interessato dal deflusso. Questa sorgente deve essere in grado di produrre un fronte d'onda simmetrico verso monte e verso valle. A uguale distanza dalla sorgente sonora ci saranno due misuratori di pressione differenziale in grado di rilevare il passaggio del fronte.

La velocità di propagazione dell'onda di pressione differirà di un termine proporzionale alla velocità della fase comprimibile, nel nostro caso fase vapore.

La Figura 23 mostra lo schema di principio dell'apparecchio. La generazione dell'onda di pressione potrebbe essere realizzata mediante una membrana metallica attuata da un magnete.

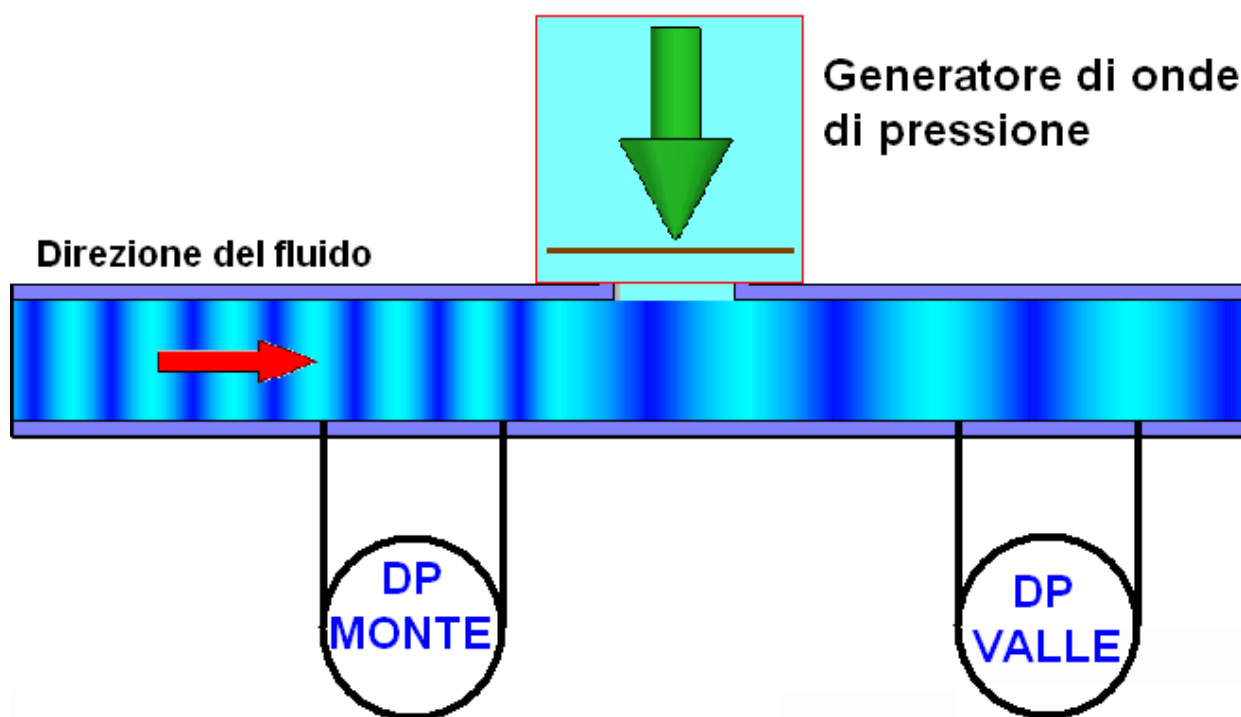


Figura 23: Schema di funzionamento del sistema ad "onde di pressione"

## 6.6 Misura della quantità di moto

Per la misura del flusso di quantità di moto sono stati presi in considerazione i seguenti tipi di strumenti:

- ▶ Drag disk
- ▶ Load cell

Come indicato in Tabella 2, Tabella 3, Tabella 4, Tabella 5 e in Tabella 6, lo strumento deve avere caratteristiche diverse se posto a monte o a valle della generica rottura, Tabella 11:

**Tabella 11: Massimi e minimi valori del flusso della quantità di moto a monte e valle della generica rottura stimato dal drag disk**

| Monte                                   |      |        | Valle                                   |      |        |
|-----------------------------------------|------|--------|-----------------------------------------|------|--------|
|                                         | MIN  | MAX    |                                         | MIN  | MAX    |
| Temperatura [°C]:                       | 41.0 | 345    | Temperatura [°C]:                       | 36.8 | 216    |
| Pressione [MPa]:                        | 0.15 | 15.64  | Pressione [MPa]:                        | 0.10 | 2.0    |
| Flusso di quantità di moto stimato [Pa] | 0    | 415545 | Flusso di quantità di moto stimato [Pa] | 0    | 900796 |

In generale, a monte, il flusso della quantità di moto è inferiore rispetto a valle, tranne che per la linea di rottura DVI SPLIT. Le temperature e pressioni cui lo strumento deve operare sono maggiori prima della rottura.

Sia in letteratura, sia nelle passate esperienze condotte in SIET, per la misurazione della quantità di moto del fluido è stato usato un *drag disk*.

La letteratura di riferimento, oltre a quella già elencata nei paragrafi 6.1 e 6.3.1, è rappresentata dagli articoli [57] e [58].

Il dispositivo di riferimento, anche per la sua semplicità, è il **drag disk**: è costituito da un corpo completamente immerso nel fluido, solitamente a forma di disco o piatto, che ostruisce parzialmente la sezione del condotto. La forma e le dimensioni possono essere decise a seconda delle esigenze di misura, in particolare la geometria dei piatti può variare in base ai regimi di moto attesi.

Il movimento del disco, proporzionale al flusso della quantità di moto, viene valutato da alcuni estensimetri. Lo strumento provoca un notevole disturbo al flusso; la configurazione deve essere quindi decisa in modo da risultare meno intrusiva possibile.

### 6.6.1 Strumenti commerciali

I DRAG DISK hanno raggiunto in passato la commercializzazione, anche se, a causa della mancanza di richieste, non vi sono ora aziende specializzate, né enti di ricerca impegnati nello sviluppo.

È anche possibile valutare l'utilizzo di **load cell** che restituiscono direttamente la forza esercitata dal fluido. Questi dispositivi hanno il vantaggio di essere più resistenti dei DRAG DISK, ma il segnale misurato è meno accurato di quello restituito dagli estensimetri.

### 6.6.2 Opzioni per il futuro

Lo strumento non risente della temperatura né della pressione del sistema, quindi può essere posizionato sia a monte sia a valle; tuttavia, se messo dopo la rottura, all'apertura della valvola, il disco viene investito da una notevole portata di vapore misto ad acqua che può danneggiare gli estensimetri, a causa della spinta generata dalle alte velocità. Questo episodio si è verificato utilizzando gli SPOOL PIECE durante la campagna sperimentale di SPES, con il risultato di avere i DRAG DISK danneggiati e inutilizzabili. Per il futuro si prevede di acquistare il disco e gli estensimetri, mentre si prevede di far realizzare la struttura di ancoraggio ad hoc. È importante valutare la forza d'urto, dovuta alle velocità, che questi strumenti, ed in particolare gli estensimetri, possono sopportare senza modificare il segnale indicante il posizionamento.

## 7. CONCLUSIONI

Per la misura della portata bifase in SPES3 si è deciso di utilizzare un set di strumenti eterogenei chiamato SPOOL PIECE. Le esperienze passate realizzate in SIET, gli esperimenti eseguiti presso il Politecnico di Torino e i risultati della ricerca bibliografica hanno permesso di individuare gli strumenti idonei: un misuratore di frazione di vuoto, un misuratore di velocità di miscela ed un misuratore di quantità di moto.

Data l'attuale impossibilità di comprare SPOOL PIECE, che comprendano tutti i dispositivi necessari, si è deciso di comprare o sviluppare i singoli strumenti.

Lo SPOOL PIECE e i relativi dispositivi devono avere caratteristiche diverse a seconda della posizione prevista: se vengono posti a monte della rottura, sperimenteranno generalmente velocità inferiori, ma alte pressioni e temperature; se vengono posti a valle della rottura, sperimenteranno velocità elevate, ma basse pressioni e temperature.

Per la misura della frazione di vuoto, un gammadensitometro rappresenta l'unico strumento disponibile commercialmente. Può essere posto sia a monte sia a valle della valvola di rottura, ma comporta alti costi e problemi radioprotezionistici. Le sonde ad ago per la misura della conduttività locale e i sistemi a fibra ottica, commercialmente disponibili, restituiscono una misura insoddisfacente per le applicazioni di SPES3. Le opzioni che vengono sviluppate in ambito accademico hanno in generale la caratteristica di non sopportare le alte velocità o le alte pressioni/temperature.

E' necessario sviluppare misuratori di frazione di vuoto con caratteristiche compatibili sia con le condizioni di monte, sia con le condizioni di valle. Si è dunque deciso di sviluppare in SIET due tipi di dispositivi.

Il primo, un sensore capacitivo integrale, misura la capacità di una parte del condotto, delimitata da elettrodi a parete, che varia a seconda della presenza di vapore o acqua liquida.

Il secondo dispositivo, un sensore fotometro a laser, misura la variazione della resistenza di uno o più sensori fotosensibili colpiti da raggi laser che attraversano il fluido.

Per la misura della velocità della miscela, date le basse velocità a monte della valvola di rottura, si possono utilizzare strumenti disponibili commercialmente come misuratori a turbina o a generazione di vortici. A valle della valvola di rottura, le alte velocità richiedono che venga raffinata l'elettronica alla base dei velocimetri ad effetto doppler o dei misuratori a generazione di vortici. Si è anche proposto lo sviluppo di uno strumento che misuri la celerità delle onde di pressione, la cui velocità è influenzata dalla velocità della fase comprimibile.

Per la misura della quantità di moto non sono disponibili commercialmente dei drag disk equipaggiati con estensimetri, come richiesto dagli studi preliminari, ma le esperienze passate condotte in SIET e a livello accademico hanno dimostrato la fattibilità. In alternativa possono essere utilizzate delle load cell.

In conclusione, la realizzazione di uno SPOOL PIECE per la misura di portata bifase richiede lo sviluppo completo di alcuni strumenti e il miglioramento di altri. L'obiettivo rimane quello di contenere i costi e utilizzare strumentazione da laboratorio reperibile a livello commerciale.

In Tabella 12 sono riassunte le conclusioni sulla strumentazione scelta.

**Tabella 12: Situazione degli strumenti idonei per SPOOL PIECE**

|                                       | MONTE                                                        |                                                               | VALLE                                                        |                                                                           |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
|                                       | STRUMENTO                                                    | SITUAZIONE                                                    | STRUMENTO                                                    | SITUAZIONE                                                                |
| <b>Misuratore frazione di vuoto</b>   | <i>Gammadensitometro</i>                                     | Disponibile commercialmente                                   | <i>Gammadensitometro</i>                                     | Disponibile commercialmente                                               |
|                                       | <i>Strumento capacitivo integrale con elettrodi a parete</i> | Necessario sviluppo totale                                    | <i>Strumento capacitivo integrale con elettrodi a parete</i> | Necessario sviluppo totale                                                |
|                                       | <i>Strumenti ottici</i>                                      | Necessario sviluppo totale                                    | <i>Strumenti ottici</i>                                      | Necessario sviluppo totale                                                |
| <b>Misuratore velocità di miscela</b> | <i>Misuratore a turbina</i>                                  | Disponibile commercialmente                                   | <i>Velocimetro ultrasonico ad effetto doppler</i>            | Richieste piccole modifiche da parte di SIET                              |
|                                       | <i>Misuratore a generazione di vortici</i>                   | Disponibile commercialmente                                   | <i>Misuratore di celerità delle onde di pressione</i>        | Necessario sviluppo totale                                                |
|                                       |                                                              |                                                               | <i>Misuratore a generazione di vortici</i>                   | Necessarie alcune modifiche a strumento disponibile a livello commerciale |
| <b>Misuratore quantità di moto</b>    | <i>Drag Disk</i>                                             | Richiesto solo assemblaggio di parti disponibili in commercio | <i>Drag Disk</i>                                             | Richiesto solo assemblaggio di parti disponibili in commercio             |

## ELENCO POTENZIALI COSTRUTTORI E FORNITORI per dispositivi SPOOL PIECE

| TURBINE                            |         |                                                                                   |                            |                                                                                                                                              |                        |
|------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Manufacturer                       | Country | Address                                                                           | Phone                      | Web & mail                                                                                                                                   | Fax                    |
| KEY INSTRUMENTS                    | USA     | 250 Andrews Road<br>Trevose, PA 19053-3491 USA                                    | (215) 357-0893             | <a href="http://www.keyinstruments.com">www.keyinstruments.com</a><br><a href="mailto:sales@KeyInstruments.com">sales@KeyInstruments.com</a> | (215) 357-9239         |
| FLOWTECHNIC                        | UK      | Unit 10 Easter Park, Lenton,<br>Lane, Nottingham, NG7 2PX – UK                    | +44 (0)1159 003550         | <a href="http://www.flowtechnik.co.uk">www.flowtechnik.co.uk</a><br><a href="mailto:sales@flowtechnik.co.uk">sales@flowtechnik.co.uk</a>     |                        |
| SIERRA INSTRUMENTS                 | USA     | 5 Harris Court, Building. L<br>Monterey, CA 93940                                 | +31 72 5071400             | <a href="http://www.sierrainstruments.com">www.sierrainstruments.com</a>                                                                     |                        |
| LITRE METER                        | UK      | Hart Hill Barn, Granborough<br>Road, North Marston,<br>Buckinghamshire, MK18 3RZ. | +44 (0) 1296 670200        | <a href="http://www.litremeter.com">www.litremeter.com</a><br><a href="mailto:sales@litremeter.com">sales@litremeter.com</a>                 | +44 (0) 1296 670999    |
| LAKE MONITORS                      | USA     | 8809 Industrial Drive,<br>Franksville, WI 53126                                   | 262-884-9800               | <a href="http://www.lakemonitors.com">www.lakemonitors.com</a><br><a href="mailto:info@lakemonitors.com">info@lakemonitors.com</a>           | 262-884-9810           |
| HYDAC                              | ITALY   | Via Archimede, 76<br>I-20041 Agrate Brianza (Mi)                                  | Tel.: +39 - 039 - 64 22 11 | <a href="http://www.hydac.it">www.hydac.it</a><br><a href="mailto:hydac@hydac.it">hydac@hydac.it</a>                                         | +39 - 039 - 68 99 68 2 |
| FLOW TECHNOLOGY                    | USA     | 8930 S. Beck Avenue, Suite 107<br>Tempe, AZ 85284 USA                             | (480) 240-3400             | <a href="http://www.ftimeters.com">www.ftimeters.com</a>                                                                                     |                        |
| ROXPUR                             | UK      | 2 Downgate Drive, Sheffield,<br>South Yorkshire, S4 8BT                           | 0114 244 2521              | <a href="http://www.roxpur.com">www.roxpur.com</a>                                                                                           |                        |
| OMEGA Engineering, INC.            | USA     | One Omega Drive Stamford,<br>Connecticut 06907-0047<br>P.O. Box 4047              | (203)-359-1660             | <a href="http://www.omega.com">www.omega.com</a><br><a href="mailto:custom@omega.com">custom@omega.com</a>                                   | (203)-359-7700         |
| Cole-Parmer Instrument<br>Co. Ltd. | UK      | Unit 3, River Brent Business Park<br>Trumpers Way Hanwell,<br>London W7 2QA       | +20 8574 7556              | <a href="http://www.coleparmer.co.uk">www.coleparmer.co.uk</a><br><a href="mailto:sales@coleparmer.co.uk">sales@coleparmer.co.uk</a>         | 020 8574 7543          |

|                                     |        |                                                        |                       |                                                                                                                                         |                       |
|-------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Hoffer Flow Controls, Inc.          | USA    | 107 Kitty Hawk Lane,<br>Elizabeth City NC 27909        | (252) 331-1997        | <a href="http://www.hofferflow.com">www.hofferflow.com</a><br><a href="mailto:info@hofferflow.com">info@hofferflow.com</a>              | (252) 331-2886        |
| IMSYSTEM                            | ITALY  | via G.ssa Benedetta, 26<br>09131 Cagliari (CA)         | +39 070 402252        | <a href="http://www.imsystem.com">www.imsystem.com</a><br><a href="mailto:info@imsystem.com">info@imsystem.com</a>                      | +39 06 23314562       |
| SATEMA s.a.s.                       | ITALY  | Via Milano, 395<br>13856 Vigliano Biellese, Biella     | +39 015 811102        | <a href="http://www.satema.it">www.satema.it</a><br><a href="mailto:info@satema.it">info@satema.it</a>                                  | +39 015 510156        |
| KOBOLD Instruments S.r.l.           | ITALY  | Via C.R. Darwin, 2<br>20019 Settimo M.se Milano        | +39 02 33 572 101     | <a href="http://www.kobold.com">www.kobold.com</a><br><a href="mailto:info.it@kobold.com">info.it@kobold.com</a>                        | +39 02 33501-983      |
| ABB Instrumentation<br>& Analytical | ITALY  | Via Statale 113<br>22016 Lenno, Como                   | +39 0344 58369        |                                                                                                                                         |                       |
| B.A.G.G.I. Srl                      | ITALY  | V.le Campania, 29<br>20133 Milano (MI)                 | +39 02 715547         | <a href="http://www.baggi.com">www.baggi.com</a><br><a href="mailto:info@baggi.com">info@baggi.com</a>                                  | 02 7490571            |
| TECNOVA HT                          | ITALY  | via G. Di Vittorio 20/22<br>10016 Pero - MI            | +39 02 33910551       | <a href="http://www.tecnovaht.it">www.tecnovaht.it</a><br><a href="mailto:web@tecnovaht.it">web@tecnovaht.it</a>                        | 02 33910563           |
| ISOIL INDUSTRIA SpA                 | ITALY  | via F.lli Gracchi, 27<br>20092 Cinisello Balsamo (MI)  | +39 02 66027.1        | <a href="http://www.isoil.com">www.isoil.com</a><br><a href="mailto:vendite@isoil.it">vendite@isoil.it</a>                              | +39 02 6123202        |
| MAS AUTOMAZIONE                     | ITALY  | Via G. Galilei, 20<br>20090 SEGRATE (MI)               | +39 (02) 26922090     | <a href="http://www.masautomazione.it">www.masautomazione.it</a><br><a href="mailto:info@masautomazione.it">info@masautomazione.it</a>  | +39 (02) 2135420      |
| Ampere S.p.A.                       | ITALY  | via Scarlatti 26,<br>20124 Milano (Italy)              | +39 02 67849.1        | <a href="http://www.amperespa.it">www.amperespa.it</a>                                                                                  | +39 02 66981363       |
| FAURE HERMAN                        | FRANCE | Route de Bonnetable BP 20154<br>72406 LA FERTE BERNARD | +33 (0)2 43 60 28 60  | <a href="http://www.faureherman.com">www.faureherman.com</a>                                                                            | +33 (0)2 43 60 28 70  |
| Hydrotechnik Italia S.R.L.          | ITALY  | Via Trento, 59 • 21047 Saronno                         | +39 (0) 2 96 70 81 32 | <a href="http://www.hydrotechnik.it/">http://www.hydrotechnik.it/</a><br><a href="mailto:info@hydrotechnik.it">info@hydrotechnik.it</a> | +39 (0) 2 96 36 95 11 |

**MISURATORE a GENERAZIONE DI VORTICI**

| Manufacturer       | Country | Address                                                             | Phone              | Web & mail                                                               | Fax                    |
|--------------------|---------|---------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| KRHONE             | Germany | KROHNE Messtechnik GmbH<br>Ludwig-Krohne-Str. 5<br>D-47058 Duisburg | +49 (0) 203 301-0  | <a href="http://www.krohne.com/">http://www.krohne.com/</a>              | +49 (0)203 301- 10 389 |
| ENDRESS+HAUSER     | Italy   | Via Donat Cattin 2/a<br>20063 Cernusco s/Naviglio MI                | +39 02 92192.1     | <a href="http://www.it.endress.com/">http://www.it.endress.com/</a>      | +39 02 92107153        |
| SIERRA INSTRUMENTS | USA     | 5 Harris Court, Building. L<br>Monterey, CA 93940                   | +31 (0) 72 5071400 | <a href="http://www.sierrainstruments.com">www.sierrainstruments.com</a> |                        |
| BAGGI              | Italy   | Viale Campania, 29<br>20133 - Milano                                | +39-02-715547      | <a href="http://www.baggi.com/">http://www.baggi.com/</a>                | +39-02-7490571         |

**MISURATORI DI FRAZIONE DI VUOTO**

| Manufacturer    | Country | Address                                                                                | Phone              | Web & mail                                                                                        | Fax                |
|-----------------|---------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| RBI instruments |         | AVENUE DU MOULIN Chez vival<br>30960 LES MAGES                                         | + 33 (0) 981676830 | <a href="http://www.rbi-fr.com/accueil_contact.htm">http://www.rbi-fr.com/accueil_contact.htm</a> | +33 (0) 466246830  |
| FZD             | Germany | Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e. V.<br>Bautzner Landstraße 400<br>01328 Dresden | +49 351 260 - 0    | <a href="http://www.fzd.de">http://www.fzd.de</a>                                                 | +49 351 269 - 0461 |
| GAMMATOM        | Italy   | Via XXIV Maggio, 14<br>22070 Guanzate, Como                                            | +39 031976035      | <a href="http://www.gammatom.it">www.gammatom.it</a>                                              | +39 031976524      |
| KANOMAX         | USA     | 219 US Hwy. 206, PO Box 372,<br>Andover, NJ 07821                                      | (973) 786-6386     | <a href="http://www.kanomax-usa.com/">http://www.kanomax-usa.com/</a>                             | (973) 786-7586     |
| GE              | Italy   | General Electric Company<br>Via Magenta, 77 - Edificio 5, 20017<br>Rho, Milano         | +39 02 932061      | <a href="http://www.ge.com/it/">http://www.ge.com/it/</a>                                         | +39 02 93206299    |
| PiezoTechnology | USA     | 8431 Georgetown Rd., Suite 300<br>Indianapolis, IN 46268                               | (317) 876-4670     | <a href="http://www.piezotechnologies.com/">www.piezotechnologies.com/</a>                        | (317) 876-4681     |

**VELOCIMETRO AD ULTRASUONI AD EFFETTO DOPPLER**

| Manufacturer      | Country     | Address                                                    | Phone            | Web & mail                                                                        | Fax              |
|-------------------|-------------|------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Signal-Processing | Switzerland | Signal Processing SA - ch. du Crêt Rouge 6<br>1073 Savigny | +41-21-683.17.17 | <a href="http://www.signal-processing.com/">http://www.signal-processing.com/</a> | +41-21-683.17.18 |

## BIBLIOGRAFIA

- [1] G. D. Storricks: IRIS integral system test specification. Westinghouse Electric Company STD-AR-08-01 Rev.1, November 2008
- [2] SIET document 01 525 ST 09 Rev.0: SPES3 - Two-phase Mass Flow Measurements: Technical Specifications, 14/07/2010
- [3] SIET document 01 572 RT 09 Rev.0: Two-phase flow measurement for SPES3 facility: spool piece mathematical correlations, 14/07/2010
- [4] SIET document 01 489 RT 09 Rev.0: SPES3-IRIS facility RELAP5 base case transient analyses for design support, April 2009
- [5] SIET document 01 423 RT 08 Rev.0: SPES3-IRIS facility nodalization for RELAP5 Mod.3.3 code and steady state qualification, January 2009.
- [6] IMPIANTO SPES: DISPOSITIVI "CATCH TANK" PER MISURE DI PORTATA INTEGRALE NEL TRANSITORIO LOWF E NEI LOCA DA 2" E 4" EQUIVALENTI, O Vescovi, A. Schivi, SIET – RT/049, 30.06.87
- [7] CIRCUITO SPES: DEFINIZIONE DELLE SPECIFICHE DI MASSIMA DELLE TECNICHE SPERIMENTALI E DELLA STRUMENTAZIONE SPECIALE, L. Mazzocchi, CISE 2447, dicembre 1984
- [8] STRUMENTAZIONE SPECIALE SPES: ANALISI DELLE NECESSITÀ, DEFINIZIONE DELLE PRIORITÀ E PRIME VALUTAZIONI DI MERCATO, A. Annunziato, G. Cattadori, L. Mazzocchi, SIET – NT/022, 27.12.85
- [9] STUDIO DI UNA SOLUZIONE NAZIONALE PER APPROVVIGIONAMENTO DI SPOOL PIECE PER IMPIANTO SPES, M. Pezzani, SIET – NT/016, 28.06.85
- [10] SISTEMA STRUMENTALE (SPOOL PIECE) PER LE MISURE DI PORTATA E TITOLO IN MISCELE BIFASE ACQUA-VAPORE: PROGRAMMA DI CALIBRAZIONE AD ALTE TEMPERATURE E PRESSIONI, V. Marcolongo, CISE 2697, Luglio 1985
- [11] MISURA DELLA PORTATA BIFASE CON SPOOL PIECES: CALIBRAZIONE E QUALIFICAZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE, M. Pezzani, O. Vescovi, SIET – NT/041, 30.06.87
- [12] INSTALLAZIONE SPOOL PIECES SU HOT LEG N° 2 N° 3 E TURBINA DI MISURA SU DOWNCOMER DELL'IMPIANTO SPES, S. Gandolfi, O. Vescovi, SIET – NT/052, 30.09.87
- [13] IMPIANTO SPES: INSTALLAZIONE III SPOOL PIECE E STRUMENTAZIONE SPECIALE, S. Gandolfi, SIET – RT/054, 31.12.87
- [14] N.C.J. Chen, D.K. Felde: Two phase flux uncertainty analysis for thermal-hydraulic test facility instrumented spool pieces. Prepared for the U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, under interagency agreements DOE 40-551-75 and 40-552-75 ; prepared by the Oak Ridge National Laboratory
- [15] K. G. Turnage, C. E. Davis: Two-phase flow measurements with advanced instrumented spool piece and local conductivity probes. Presented at Reactor Safety Instrumentation Review Group Meeting, Silver Spring, Md., 25 Jul. 1979
- [16] K. G. Turnage, C. E. Davis: Advanced spool piece development. Presented at the 7th Water Reactor Safety Research Information Meeting, Gaithersburg, Maryland, November 1979.

- [17] Izuo Aya: A Model to Calculate Mass Flowrate and Other Quantities of Two-Phase Flow in a Pipe with a Densitometer, a Drag Disk, and a Turbine Meter. ORNL/TM-4759 November 1975.
- [18] S. Z. Rouhani: Application of the Turbine Type Flowmeters in the Measurements of Steam Quality and Void. Symposium of in-core Instrumentation, Oslo, Norway, June 1974.
- [19] C. Bertani, N. De Salve, M. Malandrone, A.M. Masetto, B. Panella: Analysis of the two-phase flow meters and densitometers with the reference to the SPES-3 facility. CIRTEN – P9LU-002.
- [20] M. Furrer: Strumentazione, metodi e analisi impiegati per la misura della portata in massa in regime bifase. Enea. Maggio 1986.
- [21] STUDIO DELLE TECNICHE DI MISURA DEL GRADO DI VUOTO LOCALE UTILIZZABILI NELLA SEZIONE DI PROVA DELL'IMPIANTO GEST-GEN, G. Masini, E. Vocino, CISE – NT 82.023, 22.02.82
- [22] SPECIFICHE TECNICHE DI ACQUISTO DI UN GAMMADENSITOMETRO DI FORMITURA NAZIONALE PER MISURE DI DENSITÀ DI DEFLUSSI BIFASE ACQUA-VAPORE SUL CIRCUITO SPES, M. Pezzani, ST – 019, 27.09.85
- [23] ACQUISTO TURBINA E DRAG DISK 2° SPOOL PIECE, SIET – RT/048, 30.06.87
- [24] CONSIDERAZIONI SUI DRAG DISK INSTALLATI SULLO SPES, Appunti Siet
- [25] ACQUISTO GAMMADENSITOMETRI GAMMATOM A TRE RAGGI (PER HOT LEG) E A DUE RAGGI (PER DIPOSITIVO DI ROTTURA), SIET RT/050 , 31.08.87
- [26] ACQUISTO TURBINE CENG DA INSTALLARE SUL DOWNCOMER SURGE LINE HTO LEG E DISPOSITIVO DI ROTTURA, SIET – RT/051, 31.08.87
- [27] A GAMMADENSITOMETER APPLICATION TO MEASURE ALONG THE BEAM PATH TIME-AVERAGE DENSITY AND INSTANTANEOUS DENSITY OF WATER – STEAM MIXTURES, G. Franzoni, C. Lombardi, M. Pastorino, M. Pezzani, R. Ravetta, International Journal of HEAT & TECHNOLOGY, Vol. 7, No.2, 1989, pagg 45 – 59
- [28] MISURATORI A TURBINA E A BERSAGLIO IN UN DEFLUSSO BIFASE BICOMPONENTE, B. PANELLA, V. POLSINELLI, R. VALFRÉ, POLITECNICO DI TORINO, DIPARTIMENTO DI ENERGETICA, DE 055/IN, DICEMBRE 1984.
- [29] Methods to investigate the RPV exterior two-phase flow behavior in the event of a core melt, H. Schmidt, W. Brettschuh, J. Meseth, E. Friesen, O. Herbst, W. Kastner, W. Köhler and J.Miettinen, Siemens Nuclear Power GmbH.
- [30] A Comparison of Four Methods for Bubble Size and Void Fraction Measurements, Svein Vagle and David M. Farmer, IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, VOL. 23, NO. 3, JULY 1998.
- [31] ANALYSIS OF THE TWO-PHASE FLOW METERS AND DENSITOMETERS WITH THE REFERENCE TO THE SPES-3 FACILITY, C. Bertani, M. De Salve, M. Malandrone, A. Masetto, B. Panella (CIRTEN), Dicembre 2008
- [32] METODI E STRUMENTI DI INDAGINE PER LA VISUALIZZAZIONE DI FRAZIONE DI VUOTO IN MISCELE BIFASE ACQUA – VAPORE: RADIOGRAFIA NEUTRONICA, M. Stasi, M. Greco, M. E. Ricotti, A. Cesana, M. Terrani, Luglio 2006.
- [33] A novel needle probe based on high-speed complex permittivity measurements for investigation of dynamic fluid flows, Da Silva, M. J.; Schleicher, E.; Hampel, U., IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 56(2007)4, 1249-1256

- [34] Analysis of two-Phase Flow Phenomena with Conductivity Probes in Integral Reactor Safety Experiments, Weber, P.; Kusch, S.; Prasser, H.-M., Contribution to foreign collected edition (Proceeding ...): European, Two-Phase Flow Group Meeting, Piacenza, Italy, June 6 - 8, 1994.
- [35] Investigation of two-phase flow phenomena at integral test facilities using needle conductivity probes, Maroti, L.; Prasser, H.-M.; Windberg, P., Lecture (Conference): 8th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry, Budapest, 2.-4.6.93
- [36] Measurement Of Local Void Fraction At Elevated Temperature And Pressure, D. Duncan and T.A. Trabold, C.L. Mohr and M.K. Berrett (Electrical Field Perturbation)
- [37] X-RAY AND GAMMA RAY TRANSMISSION DENSITOMETRY, G. D. Lassahn, A. G. Stephens, D. J. Taylor, D. B. Wood Idaho National Engineering Laboratory EG&G Idaho, nc. P.O. Box 1625 Idaho Falls, Idaho
- [38] Development of an X-ray computed tomography (CT) system with sparse sources: application to three-phase pipe flow visualization, Bin Hu, Colin Stewart, Colin P. Hale, Christopher J. Lawrence, Andrew R. W. Hall, Holger Zwiens, Geoffrey F. Hewitt, Experiments in Fluids (2005) 39: 667–678
- [39] A New wire-mesh tomography for gas-liquid flows, H.-M. Prasser, A. Böttger, J. Zschau. Annual Report 1996, Institute for Safety Research, FZR.
- [40] Grid sensor for the two-dimensional measurement of different components in the cross section of a multiphase flow, Da Silva, M.J.; Schleicher, E.; Hampel, U.; Prasser, H.-M.
- [41] Bubble size measurement using wire-mesh sensors, Prasser, H.-M.; Scholz, D.; Zippe, C.
- [42] Miniature conductivity wire-mesh sensor for gas-liquid two-phase flow measurement, U. Hampela, J. Otahalb, S. Bodena, M. Beyera, E. Schleicher, W. Zimmermann and M. Jichab, Institute of Safety Research, Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstraße
- [43] A new electrode-mesh topography for gas-liquid flows: flow measurement and Instrumentation, H-M Prasser, A. Bottger, J. Zschau, 1998.
- [44] Wire-mesh sensors for high-resolving two-phase flow studies at high pressures and temperatures Heiko Pietruska and Horst-Michael Prasser Forschungszentrum Rossendorf e.V., Institute of Safety Research, P.O. Box 510119, Dresden, Germany
- [45] AN ULTRASONIC MESH SENSOR FOR TWO-PHASE FLOW VISUALISATION, V. V. Kontelev, V. I. Melnikov, fz-rossendorf.de, Technical State University of Nishny Novgorod, Russian Federation
- [46] Application of an Ultrasonic Array Sensor to Air-water Bubbly Flow Measurement, D Ito, H Kikura, M Aritomi, M Mori, The 6th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series 147 (2009) 012005
- [47] Ultrasonic Doppler Method For Bubbly Flow Measurement, Masanori Aritomi, Hiroshige Kikura and Yumiko Suzuki, 4th Workshop on Measurement Technique for Stationary and Transient Two-Phase Flows Rossendorf, Germany, November 16-17, 2000
- [48] A novel needle probe based on high-speed complex permittivity measurements for investigation of dynamic fluid flows, Da Silva, M. J.; Schleicher, E.; Hampel, U., IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 56(2007)4, 1249-1256 doi:10.1109/TIM.2007.900419
- [49] Design of capacitance sensor system for void fraction measurement, LIU Yi-ping, NIU Gang, WANG Jing, Journal of Zhejiang University SCIENCE, ISSN 1009-3095, Univ SCI 2005 6A(12):1424-1429

- [50] Application of Electrical Capacitance Tomography to the Void Fraction Measurement of Two-Phase Flow, Zhiyao Huang, Baoliang Wang, and Haiqing Li, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 52, NO. 1, FEBRUARY 2003
- [51] Innovative Techniques For Two-Phase Flow Measurements, Wael H. Ahmed and Basel I. Ismail, Recent Patents on Electrical Engineering 2008, 1, 1-13 1
- [52] MASS FLOW MEASUREMENTS UNDER PWR REFLOOD CONDITIONS IN A DOWNCOMER AND AT A CORE BARREL VENT VALVE LOCATION, J.E. Hardy, Oak Ridge national Laboratory, Oak Ridge, Tennessee
- [53] DRAG-DISC TURBINE TRANSDUCER DATA EVALUATION METHODS FOR DYNAMIC STEAM-WATER MASS FLOW MEASUREMENTS, C.E. Winsel, J.R. Fincke, V A. Deason, EG&G Idaho, Inc.
- [54] Multiple Crossed-Beam Ultrasound Doppler Velocimetry, Martin D. Fox, IEEE TRANSACTIONS ON SONICS AND ULTRASONICS, VOL. SU-25, NO. 5, SEPTEMBER 1978 281
- [55] Method and apparatus for ultrasonic doppler velocimetry using speed of sound and reflection mode pulsed wideband Doppler, Shekarriz, Alireza (Kennewick, WA), Sheen, David M. (Richland, WA)
- [56] Ultrasonic Doppler Velocimetry Measurements on the Madison Dynamo Experiment, Craig Jacobson
- [57] DRAG-DISC TURBINE TRANSDUCER DATA EVALUATION METHODS FOR DYNAMIC STEAM-WATER MASS FLOW MEASUREMENTS, C.E. Winsel, J.R. Fincke, V A. Deason, EG&G Idaho, Inc.
- [58] MEASUREMENT OF TWO-PHASE FLOW MOMENTUM WITH FORCE TRANSDUCERS, J.E. Hardy, J.E. Smith, Oak Ridge national Laboratory, Oak Ridge, Tennessee