

Ricerca di Sistema elettrico



Soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP - Utilizzo di tecnologie ad ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore (LA1.20)

Elio Di Giulio, Raffaele Dragonetti, Rosario Aniello Romano



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

Soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP - Utilizzo di tecnologie ad ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore (LA1.20)

E. Di Giulio, R. Dragonetti, R.A. Romano - Università degli Studi di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Industriale

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: 1.9 "Solare termodinamico"

Linea di attività: LA1.20

Responsabile del Progetto: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile del Work Package: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Prof. Rosario Aniello Romano, Università degli Studi di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Industriale

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di Collaborazione, tra ENEA e Università degli Studi di Napoli Federico II - Dipartimento di Ingegneria Industriale, per una attività di ricerca dal titolo: *"Soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP - Utilizzo di tecnologie ad ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore"*

Responsabile scientifico ENEA: Valeria Russo

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Prof. Rosario Aniello, Romano

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi	6
4	Prodotti sviluppati	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	9
7	Dettaglio delle attività svolte.....	10
7.1	Fondamenti teorici	10
7.2	Valutazioni preliminari	10
7.3	Modello numerico	10
7.4	Analisi statistica e risultati	13
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	16
9	Pubblicazioni scientifiche	17
10	Eventi di disseminazione	18

Indice delle figure

Figura 1 – Modello numerico. (a) dominio fluido, solido e PML; (b) condizioni al contorno	11
Figura 2 – Andamento dell'analisi di convergenza dei risultati e dei gradi di libertà del modello numerico in funzione della risoluzione spaziale della mesh	12
Figura 3 – Esempi di tratti curvi considerati nelle simulazioni numeriche	13
Figura 4 – Attenuazione adimensionale α in funzione della porosità della sezione ϕ e della posizione adimensionale dell'inclusione solida x_p	14
Figura 5 – Rappresentazione schematica della procedura del meccanismo di intervento basato sulla mappa delle probabilità.....	14

1 Risultati attesi

Nell'ambito della presente linea di ricerca, in base a quanto indicato nel capitolato del progetto, i principali risultati attesi sono rappresentati da:

- 1) verifica, mediante analisi teorico-numeriche, della possibilità di impiegare efficacemente le tecnologie ad ultrasuoni per la rilevazione della presenza di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi, con riferimento sia ai tratti di tubazione rettilinea a sezione costante sia in prossimità di curve del sistema di tubazioni dell'impianto;
- 2) individuazione dei trasduttori più idonei per la realizzazione di un apposito dispositivo per la diagnosi dello stato dei sali fusi negli impianti CSP.

2 Risultati ottenuti

Con riferimento al punto 1) del precedente paragrafo, i risultati delle simulazioni numeriche eseguite e la metodologia di analisi dei dati, specificatamente sviluppata, hanno fornito delle indicazioni, sebbene preliminari, comunque fondamentali ed incoraggianti per lo sviluppo di un dispositivo prototipale agli ultrasuoni per la rilevazione della presenza di inclusioni solide nelle tubazioni degli impianti CSP che utilizzano sali fusi come fluido termovettore e/o mezzo di accumulo, sia in corrispondenza di tratti rettilinei della tubazione che in presenza di curve. In particolare i principali aspetti indagati hanno riguardato la metodologia di analisi da impiegare, la frequenza operativa più idonea per l'applicazione in oggetto e l'individuazione delle caratteristiche dei trasduttori da utilizzare. Lo sviluppo di soluzioni tecniche per la diagnosi, anche in remoto, del piping di impianti CSP a sali fusi e di procedure per la gestione operativa di nuove miscele di sali fusi bassofondenti fornisce un contributo significativo per il sistema energetico finalizzato al conseguimento di benefici ambientali, agevolando e promuovendo la diffusione di tecnologie CSP che utilizzano miscele di sali fusi, sicure e non dannose per l'ambiente, come fluidi termovettori e mezzi di accumulo, in luogo dei comuni oli diatermici, infiammabili e inquinanti. Oltre alle positive ricadute ambientali, lo sviluppo di un dispositivo basato sull'utilizzo della tecnologia ad ultrasuoni per la determinazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP a sali fusi può presentare, altresì, concrete ed interessanti ricadute applicative per gli operatori del sistema energetico che costruiscono e/o gestiscono impianti CSP a sali fusi.

Con riferimento al punto 2) del precedente paragrafo, i trasduttori piezoelettrici costituiti da materiale ceramico ferroelettrico sono stati giudicati, per le loro caratteristiche, i sensori agli ultrasuoni più adatti all'applicazione in oggetto. Ulteriori dettagli sono riportati nel documento tecnico allegato alla presente relazione.

3 Prodotti attesi

Nell'ambito della presente linea di ricerca, in base a quanto indicato nel capitolato del progetto, i principali prodotti attesi sono rappresentati da:

- 1) report tecnico sull'attività svolta;
- 2) configurazione preliminare (progetto di massima) di un dispositivo di diagnosi ad ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni di miscele di Sali solidificati nel piping di impianti CSP a sali fusi.

4 Prodotti sviluppati

Al termine della LA1.20, entrambi i prodotti attesi ed elencati al paragrafo precedente sono stati sviluppati.

In particolare la descrizione delle attività svolte è illustrata, nel dettaglio, nel presente report tecnico:

- E. Di Giulio, R. Dragonetti, R.A. Romano, "Soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP - Utilizzo di tecnologie ad ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore", Dicembre 2024, Report RdS_PTR22-24_PR1.9_LA1.20_310.

Inoltre, le specifiche tecniche inerenti alla componentistica necessaria per la realizzazione di una configurazione preliminare (progetto di massima) di un dispositivo basato sull'utilizzo della tecnologia ad ultrasuoni per la determinazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP a sali fusi sono riportate nel documento tecnico allegato al presente report.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Come evidenziato sinteticamente nei paragrafi precedenti e, più dettagliatamente, nel successivo paragrafo 7, da un punto di vista tecnico non ci sono stati significativi scostamenti in relazione alle attività previste per la LA1.20 in base a quanto definito nel capitolato. Le simulazioni numeriche eseguite hanno consentito di valutare e quantificare, inizialmente, gli effetti derivanti dai processi dissipativi di natura termica e viscosa che si manifestano nella miscela di sali fusi durante la propagazione al suo interno di un campo ultrasonoro e, successivamente, le modifiche della conformazione spaziale del campo prodotto da un trasduttore ad ultrasuoni nella miscela di sali fusi, in seguito alla formazione di occlusioni solide. Quest'ultimo aspetto è stato analizzato con riferimento sia alla configurazione geometrica rettilinea a sezione costante, sia in prossimità di curve del sistema di tubazioni dell'impianto CSP, dal momento che in corrispondenza di tali discontinuità di natura geometrica, rispetto alla configurazione geometrica costituita da una tubazione rettilinea a sezione costante, gli effetti derivanti dai processi dissipativi e quelli derivanti dai fenomeni di diffusione sono significativamente modificati, comportando non solo un sostanziale cambiamento sull'attenuazione complessiva dell'intensità dell'onda ultrasonora, ma, soprattutto, una significativa modifica della struttura spaziale del campo di pressione prodotto da un generatore di ultrasuoni nella miscela di sali fusi. In particolare gli effetti delle discontinuità intrinseche presenti nella miscela di sali fusi in corrispondenza delle discontinuità geometriche del piping e responsabili di effetti di possibile mascheramento del campo prodotto da un trasduttore ad ultrasuoni e riflesso dalla presenza delle occlusioni solide sono stati attenuati scegliendo opportunamente la frequenza del segnale ultrasonico e la tipologia dei trasduttori da utilizzare. Nello specifico, per la frequenza di indagine, è stato adottato il valore di 2,5 MHz che, considerate le dimensioni in oggetto, rappresenta un buon compromesso tra la profondità di penetrazione del segnale ultrasonico e la risoluzione temporale necessaria per la visualizzazione dei singoli dettagli dei segnali acquisiti dal ricevitore nel dominio del tempo. Invece per la tipologia di trasduttori, a valle di un'analisi dei diversi meccanismi e modalità di trasduzione per la generazione e la ricezione degli ultrasuoni, la scelta è caduta su trasduttori piezoelettrici che, per l'applicazione inerente alla presente attività di ricerca, hanno evidenziato caratteristiche tecniche maggiormente performanti rispetto ad altri meccanismi, come l'effetto magnetostriattivo, la scarica elettrica, la generazione elettromagnetica, la generazione laser e l'effetto elettrostatico.

Anche con riferimento alla rendicontazione economica, per la presente attività, non si sono verificati significativi scostamenti rispetto a quanto, preventivamente, indicato nel capitolato. Nello specifico il costo totale della LA1.20, al netto delle spese generali, costituito esclusivamente da "Costi di personale" e preventivato in 46.120,00 €, è stato rendicontato, secondo il metodo dei "costi standard", prevedendo il coinvolgimento di due professori associati, ciascuno per un impegno orario complessivo di 317 ore, ed un assegnista di ricerca per un impegno orario complessivo di 506 ore.

6 Sintesi delle attività svolte

Nell'ambito della LA1.20 sono state condotte, esclusivamente attraverso simulazioni numeriche FEM, valutazioni finalizzate a modellare la propagazione degli ultrasuoni in una miscela binaria di sali fusi contenuti all'interno delle tubazioni di un impianto CSP, nonché le interazioni degli impulsi ultrasonori con le inclusioni solide in essa presenti.

I risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche e la metodologia di analisi appositamente sviluppata nel corso dell'attività di ricerca hanno fornito, in linea con i risultati attesi dalla presente LA, indicazioni fondamentali per l'impiego della tecnologia ad ultrasuoni per la determinazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP a sali fusi, consentendo, altresì, di individuare, sebbene in maniera preliminare, la componentistica necessaria e le rispettive specifiche tecniche per la realizzazione di un dispositivo prototipale per la diagnosi dello stato dei sali fusi negli impianti CSP.

7 Dettaglio delle attività svolte

La presente LA si è posta l'obiettivo di valutare la possibilità di applicare le tecniche non invasive, basate sull'impiego di dispositivi agli ultrasuoni, per la rilevazione della presenza di inclusioni solide nelle tubazioni di un impianto di energia solare a concentrazione (CSP) che utilizza una miscela di sali fusi come fluido termovettore e per l'accumulo di energia termica. Le valutazioni sono state condotte esclusivamente attraverso simulazioni numeriche basate sul metodo agli elementi finiti (FEM) finalizzate a modellare la propagazione delle onde ultrasoniche nella miscela di sali fusi, nonché le interazioni degli impulsi ultrasonori con le inclusioni solide in essa presenti. Nei sotto-paragrafi seguenti sono descritte nel dettaglio le attività svolte.

7.1 Fondamenti teorici

Gli ultrasuoni rappresentano una tecnologia ampiamente utilizzata per il monitoraggio non distruttivo di materiali e per scopi diagnostici e terapeutici in campo medico. Un parametro fondamentale che influenza il comportamento delle onde ultrasoniche, oltre all'impedenza acustica, è costituito dal coefficiente di attenuazione (α), espresso in dB/m, che descrive la perdita di energia dell'impulso ultrasonoro per metro dovuta ai fenomeni dell'assorbimento e della dispersione causati, rispettivamente, dalla conversione dell'energia del segnale ultrasonico in calore, a causa di processi viscosi e di rilassamento termico, e dalla diffusione delle onde ultrasoniche, a causa di eterogeneità e disomogeneità presenti nel mezzo di propagazione. La valutazione delle due componenti del coefficiente di attenuazione ha svolto un ruolo cruciale nella presente LA, dal momento che conoscendo la perdita di energia ultrasonica dovuta all'assorbimento, è possibile identificare le inclusioni solide all'interno del sale fuso, confrontando i modelli di attenuazione delle onde ultrasoniche che viaggiano attraverso un mezzo omogeneo con quelli che tengono conto dell'interazione con regioni eterogenee del mezzo.

7.2 Valutazioni preliminari

Inizialmente l'attività si è focalizzata sulla individuazione delle proprietà chimico-fisiche delle miscele di sali fusi impiegate come fluido termovettore, sulle caratteristiche geometriche e funzionali delle parti dell'impianto CSP in cui si manifesta la solidificazione della miscela di sali fusi, nonché sulle caratteristiche dei materiali impiegati per l'isolamento termico del piping. A valle della suddetta attività, condotta in collaborazione con ENEA, si è deciso di eseguire le valutazioni prendendo in considerazione, tenuto conto anche della maggiore temperatura di solidificazione, una miscela binaria di sali fusi comunemente impiegata negli impianti CSP per la sua elevata capacità di accumulo termico e costituita per il 60 % da nitrato di sodio (NaNO_3) e per il 40 % da nitrato di potassio (KNO_3). Per le principali proprietà del sale fuso, densità e velocità di propagazione degli ultrasuoni, sono state assunti, rispettivamente, i seguenti valori: $2090-0.636T$ kg/m^3 e $2478-1.150T$ m/s per la fase liquida, nonché 2100 kg/m^3 e 3000 m/s per la fase solida.

7.3 Modello numerico

Preliminarmente le analisi numeriche FEM sono state indirizzate alla valutazione degli effetti derivanti dai processi dissipativi di natura termica, viscosa e di rilassamento molecolare che si manifestano nella miscela di sali fusi considerata durante la propagazione al suo interno di un campo ultrasonoro. Tale attività è stata condotta considerando un tratto di tubazione rettilinea a sezione costante ed utilizzando la piattaforma COMSOL MULTIPHYSICS per le simulazioni

numeriche, nonché programmi appositamente sviluppati in ambiente MATLAB per le opportune elaborazioni dei risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche. Ciò ha consentito di realizzare un modello numerico FEM che, una volta validato eseguendo delle analisi considerando le specifiche proprietà chimico-fisiche di fluidi come l'acqua pura e l'acqua con una fissata percentuale di sale disciolto per i quali, da dati disponibili in letteratura, si conosce il coefficiente di attenuazione complessiva del campo ultrasonoro, è in grado di tener conto dell'attenuazione dovuta al fenomeno dell'assorbimento, per unità di lunghezza, del campo ultrasonoro propagantesi, in funzione della frequenza e della temperatura della miscela binaria di sali fusi. Il modello FEM così realizzato è stato, poi, impiegato per la valutazione della modifica della conformazione spaziale del campo di pressione prodotto da un trasduttore ad ultrasuoni nella miscela di sali fusi in presenza della formazione di occlusioni solide di diversa dimensione e posizione rispetto all'assenza di fenomeni di solidificazione.

Il modello numerico realizzato riproduce una sezione di tubazione con un dispositivo ultrasonico a trasmissione diretta (trasmettitore-ricevitore), come mostrato nella Figura 1a. La griglia computazionale utilizzata per risolvere lo schema numerico all'interno del dominio fluido è stata realizzata con elementi tetraedrici che utilizzano funzioni di forma del quarto ordine per la risoluzione della pressione acustica e dei campi di velocità. La mesh è stata strutturata in modo uniforme in tutto il dominio e la dimensione degli elementi è stata scelta in base alla lunghezza d'onda associata al dominio liquido. Per ridurre la dimensione del dominio computazionale e il numero di gradi di libertà del sistema, è stata considerata solo una metà del dominio di calcolo, applicando una condizione di simmetria sulla superficie mostrata in arancione chiaro nella Figura 1b. Alle due estremità del dominio fluido sono stati introdotti due domini PML (Perfectly Matched Layer) per simulare una propagazione di campo libero entro la tubazione, escludendo riflessioni ritardate e, inoltre, per facilitare la convergenza della condizione di campo libero ai confini estremi del domini PML, è stata imposta una condizione di impedenza uguale all'impedenza del mezzo fluido.

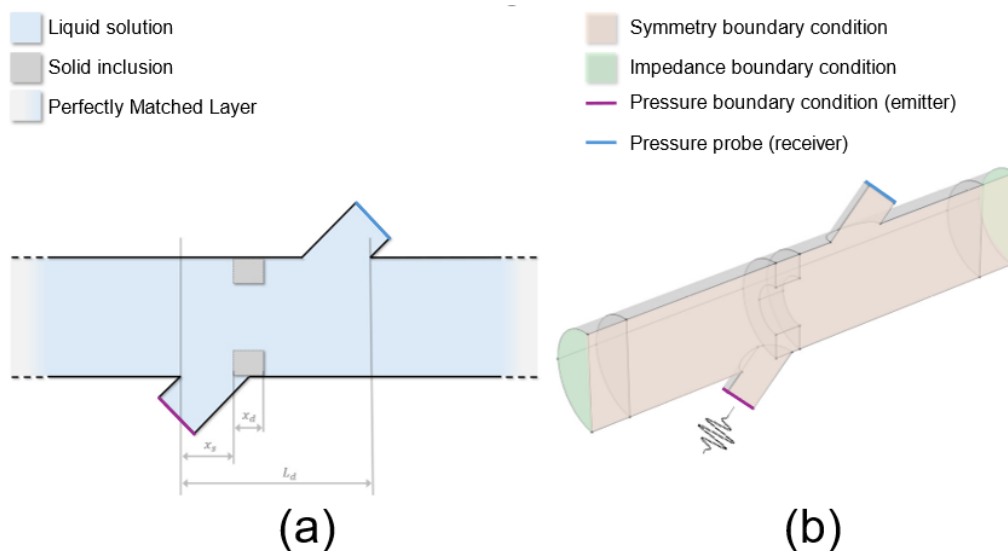


Figura 1 - Modello numerico. (a) dominio fluido, solido e PML; (b) condizioni al contorno

Per garantire la convergenza dei risultati numerici, sono state eseguite due analisi di sensibilità: un'analisi della risoluzione spaziale (affinamento della mesh) e un'analisi della risoluzione temporale (regolazione del passo temporale).

Nell'analisi di sensibilità della mesh, considerando il parametro differenza di attenuazione adimensionale $\Delta\alpha$ (definito come il rapporto percentuale tra la differenza dell'attenuazione,

valutata considerando la mesh "approssimata" e quella "fine", e l'attenuazione ottenuta considerando solo la mesh "approssimata") è stato evidenziato che la sua variazione rimane inferiore al 5 % fino a una dimensione degli elementi pari alla lunghezza d'onda considerata relativamente alla fase liquida; ciò ha consentito di ridurre significativamente il costo computazionale.

La Figura 2 mostra l'andamento dell'analisi di convergenza dei risultati e dei gradi di libertà del modello numerico in funzione della risoluzione spaziale della mesh, espressa in termini della lunghezza d'onda considerata.

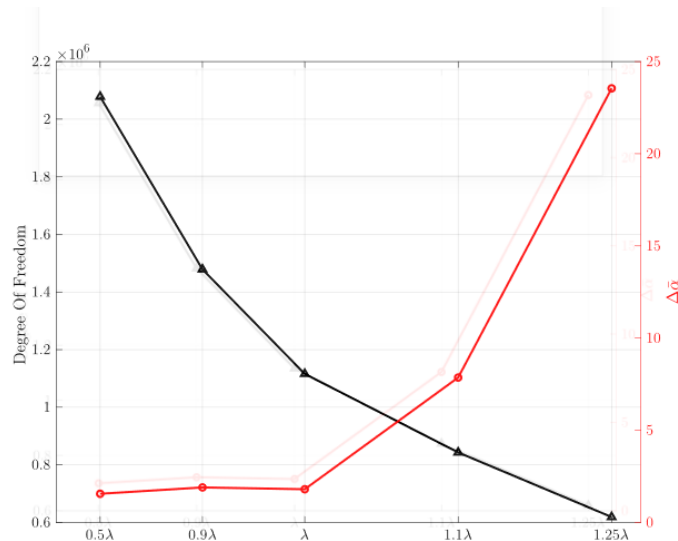


Figura 2 - Andamento dell'analisi di convergenza dei risultati e dei gradi di libertà del modello numerico in funzione della risoluzione spaziale della mesh

L'analisi della risoluzione temporale, invece, ha evidenziato che per mantenere il parametro differenza di attenuazione adimensionale $\Delta\alpha$ al di sotto della soglia accettabile del 5% è necessario considerare un passo temporale non superiore ad 1/5 del periodo corrispondente alla frequenza di indagine considerata.

Il modello FEM, realizzato e validato come precedentemente descritto, è stato, successivamente, impiegato per svolgere analoghe valutazioni numeriche sia in corrispondenza di tratti rettilinei che in prossimità di curve del sistema di tubazioni dell'impianto CSP. In particolare, nel caso di tratti curvi, le simulazioni numeriche sono state eseguite considerando curve caratterizzate da diversi raggi di curvatura dal momento che gli effetti derivanti da fenomeni di diffusione e riflessione degli ultrasuoni sono significativamente influenzati dalla tipologia di discontinuità geometrica, comportando una significativa modifica della struttura spaziale del campo di pressione prodotto da un generatore di ultrasuoni nella miscela di sali fusi rispetto ai tratti rettilinei a sezione costante. La Figura 3 mostra due esempi di configurazioni di tratti curvi considerati nelle simulazioni numeriche.

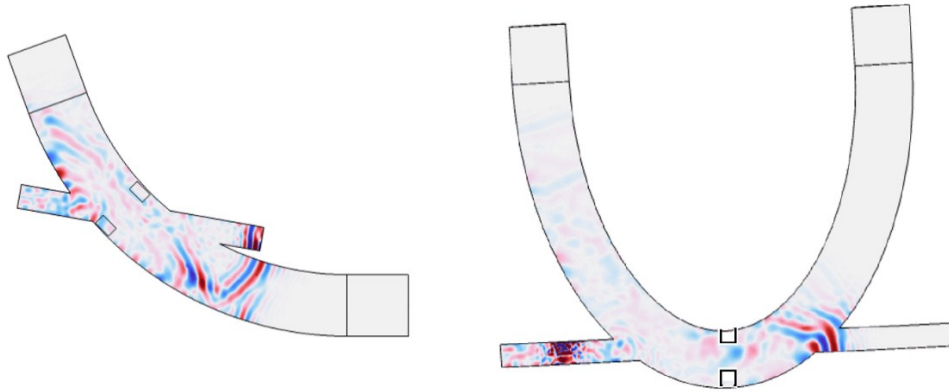


Figura 3 - Esempi di tratti curvi considerati nelle simulazioni numeriche

7.4 Analisi statistica e risultati

A valle di opportune valutazioni, le simulazioni numeriche sono state condotte considerando una frequenza del segnale ultrasonico pari a 2,5 MHz che, nello studio in oggetto, rappresenta un compromesso ottimale tra la profondità di penetrazione e la risoluzione temporale, nonché una temperatura di 240 °C. L'obiettivo delle simulazioni numeriche è stato, essenzialmente, quello di valutare, quale principale parametro di analisi, il coefficiente di attenuazione complessivo adimensionalizzato $\bar{\alpha}$ dato dal prodotto del coefficiente di attenuazione complessivo α per il cammino di trasmissione diretto tra sensore trasmittente e sensore ricevente. Le analisi numeriche hanno previsto oltre 7000 simulazioni parametriche nell'ambito delle quali la posizione dell'inclusione solida è stata variata, in maniera sistematica, tra i due sensori ultrasonori (trasmettitore e ricevitore), modificando il valore della coordinata adimensionalizzata x_p espressa dal rapporto tra le lunghezze x_s e L_d indicate nella Figura 1a, rispettivamente, distanza assiale dell'occlusione solida dalla sorgente ultrasonora e distanza assiale tra la sorgente ultrasonica e il ricevitore. Le analisi numeriche sono state condotte anche variando un ulteriore parametro e, precisamente, la percentuale di inclusione solida nella sezione trasversale della tubazione, definita come porosità di sezione ϕ ed espressa come il complemento all'unità del rapporto tra le sezioni S_s ed S_t , rispettivamente, area occupata dall'inclusione solida e area totale della sezione trasversale della tubazione.

Le simulazioni hanno mostrato che l'attenuazione del segnale ultrasonico dipende sia dalla posizione che dalla dimensione delle inclusioni solide. In particolare, due picchi di attenuazione si verificano quando l'inclusione solida si forma in corrispondenza dell'emettitore e del ricevitore rispetto ai casi in cui la solidificazione si verifica nelle zone intermedie tra sorgente e ricevitore.

L'esame dei diversi scenari associati alla formazione di occlusioni solide nel sistema di tubazioni ha consentito di ottenere una curva rappresentativa dell'attenuazione adimensionale in funzione della posizione e del grado di occlusione mostrata nella Figura 4.

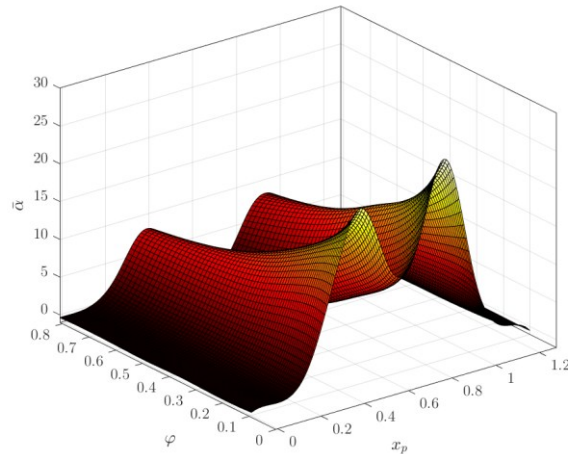


Figura 4 - Attenuazione adimensionale $\bar{\alpha}$ in funzione della porosità della sezione ϕ e della posizione adimensionale dell'inclusione solida x_p

I risultati mostrati nella Figura 4 evidenziano come un fissato valore dell'attenuazione adimensionale dipenda da coppie diverse dei valori corrispondenti alla posizione e al grado di occlusione solida e, inoltre, è evidente che, durante l'impiego sperimentale del dispositivo agli ultrasuoni schematizzato in Figura 1, si misura il valore dell'attenuazione, ma la posizione e il grado dell'occlusione solida rimangono sconosciuti. Pertanto, utilizzando i risultati delle simulazioni numeriche, unitamente ad un'analisi statistica dei dati, è stato possibile determinare una mappa che rappresenta, per ciascun valore di ϕ , la probabilità della porosità di sezione ϕ (o, in modo equivalente, la probabilità del grado di inclusione solida) corrispondente ad un assegnato valore di attenuazione. Tale mappa, misurato un valore di attenuazione e fissato un valore considerato accettabile per la porosità della sezione, consente di identificare la probabilità P che l'attenuazione rilevata sia causata da un'inclusione corrispondente al valore accettabile per la porosità della sezione. Se la probabilità P è maggiore di un valore minimo ritenuto accettabile P_{min} , i meccanismi di intervento per il passaggio dalla fase solida a quella liquida attraverso l'innalzamento della temperatura e, quindi, con un conseguente consumo energetico, rimangono inattivi; in caso contrario vengono attivati. Tale mappa di probabilità funge, pertanto, da supporto decisionale per l'attivazione dei meccanismi di intervento, secondo la procedura schematizzata nella Figura 5. Curve tridimensionali simili a quella indicata in Figura 4 per i tratti rettilinei e le corrispondenti mappe di probabilità sono state ottenute anche per i tratti curvi.

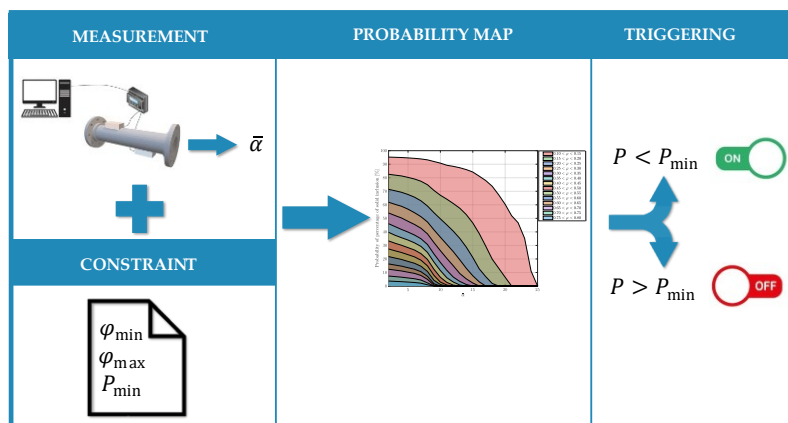


Figura 5 - Rappresentazione schematica della procedura del meccanismo di intervento basato sulla mappa delle probabilità

La presente linea di attività è stata completata con un'analisi dei diversi meccanismi e modalità di trasduzione per la generazione e la ricezione di ultrasuoni finalizzata all'individuazione della tipologia di trasduttori più idonei per l'applicazione in oggetto. In tale ambito il meccanismo piezoelettrico ha evidenziato le maggiori potenzialità rispetto ad altri meccanismi, quali l'effetto magnetostrittivo, la scarica elettrica, la generazione elettromagnetica, la generazione laser e l'effetto elettrostatico. In particolare la scelta è caduta su trasduttori ceramici ferroelettrici, considerate le caratteristiche meccaniche, elettriche e piezoelettriche di questi ultimi in termini di coefficiente di deformazione, coefficiente di tensione e coefficiente di accoppiamento ed il valore della loro impedenza acustica che consente di realizzare un più favorevole accoppiamento del trasduttore con il sistema in oggetto.

I risultati delle simulazioni eseguite e la metodologia di analisi specificatamente sviluppata, basata sullo sviluppo di mappe di probabilità che collegano i livelli di attenuazione misurati ai possibili valori di porosità della sezione, costituendo la base per le decisioni operative, hanno fornito, unitamente all'analisi delle diverse tipologie di sensori, indicazioni incoraggianti per lo sviluppo di un dispositivo prototipale agli ultrasuoni per la rilevazione della presenza di inclusioni solide nelle tubazioni degli impianti CSP che utilizzano sali fusi. Tale attività ha fornito, altresì, indicazioni fondamentali in grado di condizionare scelte importanti per la realizzazione del dispositivo agli ultrasuoni come la metodologia di analisi da utilizzare, la frequenza operativa più idonea per l'applicazione in oggetto, le caratteristiche tecniche dei trasduttori da impiegare, consentendo di individuare, sebbene in maniera preliminare, la configurazione di un dispositivo basato sull'utilizzo della tecnologia ad ultrasuoni per la determinazione di occlusioni solide all'interno del piping di impianti CSP a sali fusi il cui costo è stato quantificato in 50.000,00 € - 60.000,00 € come, più dettagliatamente, desumibile documento tecnico allegato alla presente relazione.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nell'ambito della LA1.20 non è stato fatto ricorso a specifiche consulenze per lo svolgimento delle attività previste, ma queste ultime sono state svolte, esclusivamente, dagli Autori del presente report.

9 Pubblicazioni scientifiche

I risultati maggiormente significativi conseguiti al termine della presente linea di attività sono stati pubblicati sulla rivista Applied Sciences nell'articolo di cui, di seguito, si riportano i riferimenti:

Raffaele Dragonetti, Rosario Aniello Romano, Elio Di Giulio - "Numerical Evaluation of Ultrasonic Detection of Solid Occlusions in CSP Molten Salt Piping" - Applied Sciences 2025, 15(3), 1373; <https://doi.org/10.3390/app15031373>

10 Eventi di disseminazione

La LA1.20, non prevedendo costi di esercizio per informazione, pubblicità e diffusione correlate alle attività di progetto, non ha dato luogo a specifici eventi di disseminazione, ma ha, comunque, partecipato ad alcuni eventi di disseminazione organizzati dall'ENEA nell'ambito delle attività di diffusione dei risultati di ricerca previste dal capitolato del Progetto e, in particolare, all'evento di disseminazione finale del Progetto 1.9 "Solare termodinamico" del PTR 2022-2024 della Ricerca di Sistema tenutosi a Roma in data 16/12/2024.