

Bando di gara per progetti di ricerca di cui all'art. 10, comma 2, lettera b) del decreto 26 gennaio 2000
Decreto direttoriale 30 giugno 2014 - Ministero dello sviluppo economico

RELAZIONE FINALE del PROGETTO SIRIO

Codice Proposta	CCSEB_00045		
Titolo completo	Sistema di rimozione della potenza di decadimento per reattori nucleari innovativi		
Tema di ricerca	B.3.1.1 - Componenti innovativi per reattori dimostrativi LFR e SMR		
Capofila	S.R.S. Servizi di Ricerche e Sviluppo S.r.l.		
Proponente 2	ENEA - Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile		
Proponente 3	Ansaldo Nucleare S.p.A.		
Proponente 4	Società Informazioni Esperienze Termoidrauliche S.p.A.		
Data inizio progetto	03/04/2017	Data fine progetto	23/06/2021

COSTI E CONTRIBUTI

COSTO FINALE DEL PROGETTO APPROVATO		1.299.623,48 €
<i>di cui: Ricerca Industriale</i>	240.826,31 €	<i>Sviluppo sperimentale</i> 1.058.797,17 €
CONTRIBUTO AMMESSO SENZA MAGGIORAZIONI		533.563,16 €
CONTRIBUTO AMMESSO COMPLESSIVO (incluse maggiorazioni)		675.330,90 €

SINTESI DEL PROGETTO

Nel contesto degli impianti nucleari di IV generazione la tecnologia che adotta piombo liquido come refrigerante del sistema primario è riconosciuta come una delle più promettenti grazie alle caratteristiche termodinamiche del fluido termovettore e alle semplificazioni di impianto che ne derivano dall'uso. Tra i principi di innovazione dei reattori di IV generazione vi è l'applicazione estensiva di sistemi a funzionamento passivo, capaci di svolgere le proprie funzioni adottando principi fisici semplici e conosciuti, senza l'elettricità o l'intervento umano, entrambi possibili sorgenti di fallimento. Uno dei progetti sui reattori a piombo più importanti nel panorama europeo è denominato ALFRED (Advanced lead Cooled Fast Reactor European Demonstrator) che si prefigge l'obiettivo di costruire il dimostratore della tecnologia dei lead Fast Reactors (LFR). Il progetto SIRIO (Sistema di rimozione della potenza di decadimento per reattori nucleari innovativi) si inserisce nel contesto di sviluppo dei reattori LFR ed è finalizzato alla progettazione, acquisto materiali, costruzione, commissioning e testing di un impianto sperimentale per provare il sistema di sicurezza passivo del reattore ALFRED per la rimozione del calore residuo di decadimento in condizioni incidentali. L'obiettivo di verificare il

funzionamento del sistema di sicurezza è stato ottenuto progettando un impianto sperimentale in scala ridotta che rappresentasse tutti i fenomeni fisici attesi del sistema reale. Inoltre, la validità della progettazione è stata sostenuta da analisi numeriche mediante codici di calcolo qualificati in ambito nucleare. In ultimo, gli stessi codici sono stati utilizzati a fine progetto per analizzare i dati sperimentali ottenuti a seguito della prima campagna sperimentale.

In the context of Generation IV nuclear power plants, the technology that adopts liquid lead as the primary coolant is recognized as one of the most promising due to the thermodynamic characteristics of the heat transfer fluid and the plant simplifications that result from its use. Among the innovation principles of Generation IV reactors is the extensive application of passive systems, capable of performing their functions using simple and well-known physical principles, without electricity or human intervention, both of which are possible sources of failure. One of the most important lead reactor projects on the European scene is called ALFRED (Advanced Lead Cooled Fast Reactor European Demonstrator), which aims to build a demonstrator of lead fast reactor (LFR) technology. The SIRIO project (Sistema di rimozione della potenza di decadimento per reattori nucleari innovativi) is part of the LFR reactor development context and is aimed at the design, procurement of materials, construction, commissioning and testing of an experimental facility to test the passive safety system of the ALFRED reactor for the removal of decay heat in accident conditions. The objective of verifying the functioning of the safety system was achieved by designing a relevant-scale experimental facility that represented all the expected physical phenomena of the real system. Furthermore, the validity of the design was supported by numerical analyses using nuclear-qualified calculation codes. Finally, the same codes were used at the end of the project to analyze the experimental data obtained following the first experimental campaign.

1. INQUADRAMENTO DEL PROGETTO E OBIETTIVI

Le attività odierne di ricerca e sviluppo nell'ambito della produzione di energia sono polarizzate verso la definizione di un mix energetico decarbonizzato che consenta la produzione di energia accessibile, affidabile e nel rispetto delle risorse naturali. Il settore energetico nucleare, producendo energia senza la formazione di gas serra o altri prodotti che causano il cambiamento climatico, ha visto negli ultimi anni il proliferare di diverse linee di ricerca per concepire impianti che rispettino i requisiti di sicurezza moderni tralasciando costi di produzione competitivi rispetto ad altre fonti. A livello internazionale, a partire dai primi anni 2000 è stato istituito il Generation IV International Forum che promuove lo sviluppo di tecnologie nucleari innovative che si discostano dallo stato dell'arte per un migliore uso delle risorse naturali, anche attraverso la minimizzazione delle scorie. Una delle tecnologie promosse dall'istituto è quella dei reattori veloci refrigerati a piombo (Lead Fast Reactor, LFR), che utilizzano piombo liquido al posto dell'acqua per raffreddare il nocciolo del reattore. In Europa, il pilota della tecnologia è il progetto ALFRED, finalizzato alla costruzione di un dimostratore LFR e promosso dal consorzio FALCON, all'interno del quale fanno parte Ansaldo Nucleare, ENEA e RATEN ICN. Le potenzialità di questa tecnologia sono innumerevoli; una di esse è la possibilità di raggiungere livelli di sicurezza confacenti agli standard internazionali minimizzando il numero di sistemi e componenti necessari, con immediate ricadute sui costi di produzione. In particolare, la tecnologia LFR consente di avvalersi di sistemi di sicurezza passivi: si tratta di sistemi che svolgono la propria funzione di protezione adottando principi fisici semplici come la gravità, e non richiedono fonti di energia esterne o procedure da parte degli operatori.

ALFRED, nel suo ruolo di dimostratore della tecnologia LFR, adotta sistemi di sicurezza passivi per garantire l'integrità di impianto. In particolare, la rimozione del calore di decadimento a seguito di un evento incidentale è demandata ad un sistema che prevede di collegare termicamente il sistema primario del reattore, con l'ambiente esterno, tramite un circuito intermedio di acqua entro cui il fluido evapora e condensa tra una sorgente termica (il generatore di vapore) e un pozzo ultimo di calore (uno scambiatore di calore immerso in una piscina). Le versioni concettuali del sistema di sicurezza sono state studiate in diversi progetti di ricerca Europei e hanno evidenziato in passato una criticità dovuta alla alta temperatura di solidificazione del piombo, comparata con le temperature ambientali del pozzo ultimo di calore. La problematica principale derivava dal fatto che nel corso dell'incidente il sistema portava il piombo del circuito primario a congelare nelle regioni fredde, impedendo l'asportazione continua del calore dal nocciolo.

A partire dal 2016, Ansaldo Nucleare ha proposto una modifica del sistema, successivamente culminata in un brevetto, che proponeva di utilizzare gas incondensabili collezionati nel sistema di sicurezza per modulare la potenza asportata dal sistema nel tempo, così da soddisfare i requisiti contrastanti di rimozione della potenza nelle fasi iniziali dell'incidente e mantenimento del piombo allo stato liquido nel medio termine. L'idea si basa sul principio fisico per cui un vapore che condensa ha una efficienza inferiore in un ambiente con gas incondensabili (azoto, elio o argon). Questi ultimi sono inizialmente intrappolati in un serbatoio, e nel corso dell'incidente espandono autonomamente andando a ridurre progressivamente la potenza rimossa.

Utilizzare gas incondensabili per modulare la potenza asportata da un sistema è un'idea innovativa che non trova riscontro applicativo in sistemi tradizionali. Il progetto SIRIO è nato con l'obiettivo di verificare il corretto funzionamento del sistema avvalorando le ipotesi di progettazione, attraverso il completamento delle seguenti attività:

1. Progettazione di un impianto sperimentale su scala ridotta ma rilevante, che rappresenti il sistema di sicurezza di ALFRED per geometria e fenomeni fisici attesi.
2. Approvvigionamento dei componenti di impianto, alcuni di essi dotati di caratteristiche meccaniche prototipiche e ad alto grado di innovazione, o dotate di condizioni di processo caratteristiche di impianti di potenza (alta pressione, alta temperatura).
3. Costruzione della facility sperimentale presso una struttura dotata di vincoli preesistenti
4. Messa in marcia dell'impianto con test sui componenti per verificare il corretto funzionamento
5. Esecuzione di prove sperimentali simulanti l'evento incidentale di perdita della corrente elettrica dell'impianto nucleare, con attuazione e funzionamento del sistema di sicurezza
6. Analisi dei dati sperimentali e verifica attraverso codici di calcolo predittivi

Le attività sono state svolte in un contesto di innovazione tecnologica rilevante, che ha permesso di raggiungere l'obiettivo di aumentare la letteratura scientifica in materia di sistemi di sicurezza passivi per reattori innovativi. In aggiunta, le analisi numeriche svolte all'interno del progetto hanno consentito di incrementare la conoscenza sui codici di calcolo di sicurezza nucleare, e nella loro capacità di simulare sistemi di sicurezza innovativi dotati di fenomenologie fisiche complesse.

2. RISULTATI RAGGIUNTI

Le attività del progetto SIRIO sono state svolte attraverso il completamento di Work Packages (WP) che hanno attraversato tutte le fasi di sviluppo dell'impianto, dalla concettualizzazione all'operazione. Di seguito sono richiamati i WP e per ognuno di essi sono riassunti gli obiettivi raggiunti:

WP1 - Progettazione Concettuale Della Facility

Il primo obiettivo del progetto è stato la concettualizzazione della facility con il relativo processo di scaling. Mediante analisi parametrica del sistema proposto, si è completata la concettualizzazione termoidraulica della facility sperimentale. In questa fase si è provveduto alla definizione dei criteri di scala e all'individuazione dei parametri di impianto da monitorare durante la fase sperimentale, sia per la validazione del sistema sia per la qualifica dei codici di calcolo.

E' stato elaborato il piping & instrumentations diagram (P&ID) concettuale, definendo tutti i componenti di impianto, le interfacce con la Hall esistente presso SIET, con relativo dimensionamento termoidraulico, i sistemi ausiliari, i punti di misura, le logiche di controllo.

E' stata, inoltre, realizzata una analisi funzionale dell'impianto sperimentale e una nodalizzazione di pre-test necessaria per la elaborazione della specifica di prova.

Mediante la nodalizzazione realizzata e le simulazioni di pre-test realizzate con il codice RELAP5-3D si è analizzato il funzionamento del sistema concettuale dal punto di vista termico e idraulico mediante analisi numerica, identificando le fenomenologie fisiche più rilevanti e i parametri caratteristici/critici per il funzionamento del sistema.

Si è inoltre verificato, avviando le fasi di riqualificazione normativa, l'utilizzo di componenti a disposizione dei partners (con particolare riferimento a due tanche per incondensabili di proprietà ENEA presso SIET), valutando l'integrazione di tali elementi all'interno della facility (tenendo conto delle limitazioni esistenti in termini di temperatura e pressione di design) e adattando la scalatura risultante dall'utilizzo di tali componenti al fine di rappresentare correttamente le fenomenologie fisiche di interesse attese sul sistema reale.

WP2 - Progettazione Costruttiva Della Facility

Le attività del WP2 di Responsabilità SRS riguardavano la progettazione costruttiva finalizzata alla predisposizione di documenti ed elaborati grafici in cui fossero definiti in dettaglio i requisiti delle apparecchiature, componenti ed accessori identificati nella fase di concettualizzazione della facility. Tali elaborati hanno avuto lo scopo di fornire e dettagliare tutte le informazioni necessarie all'approvvigionamento ed al montaggio degli impianti meccanici ed elettrici della facility tenendo conto delle verifiche di compatibilità con le infrastrutture esistenti realizzate nel WP2/LA3 e con i componenti/materiali esistenti e da riutilizzare (ad esempio, i Gas Tank).

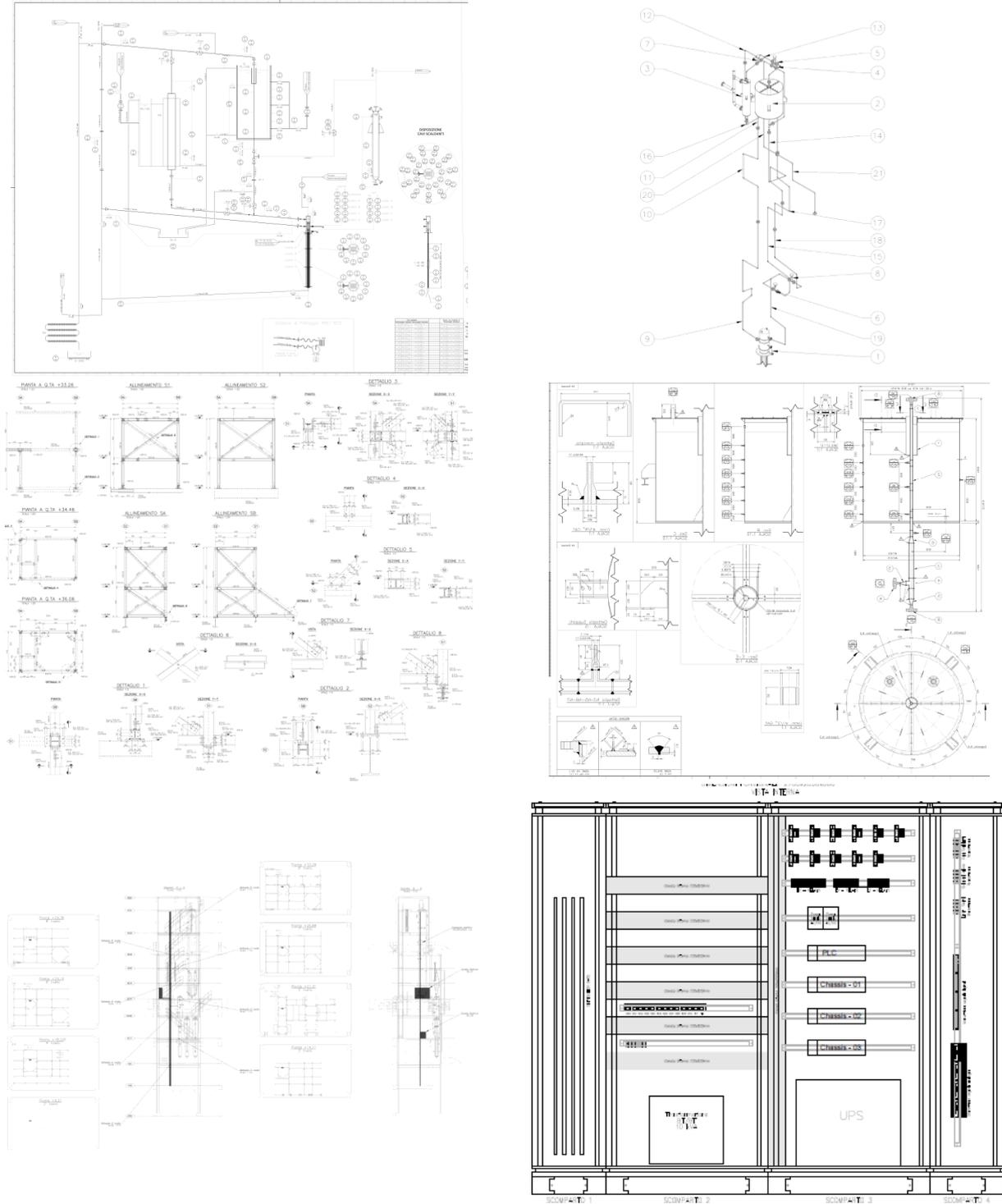


Figura 1 - Immagini di elaborati di progetto - P&ID, layout, schemi e disegni.

Nelle immagini sopra elencate un resoconto generale dei P&ID, schemi, disegni e layout con i quali è stata montata la facility SIRIO.

WP3 - Fornitura ed Installazione Della Facility

Le attività hanno riguardato l'approvvigionamento, la prefabbricazione in officina ed il montaggio in opera di tutte le apparecchiature (meccaniche ed elettriche) della facility. In officina sono stati realizzati e collaudati i componenti principali (Isolation Condenser, tubazioni e quadro elettrico) che poi sono stati spediti e montati secondo le procedure pianificate. Di seguito nella Figura 2 sono riportate alcune immagini riguardanti la realizzazione e il montaggio in opera dei componenti con il disegno di partenza e il componente montato in campo.

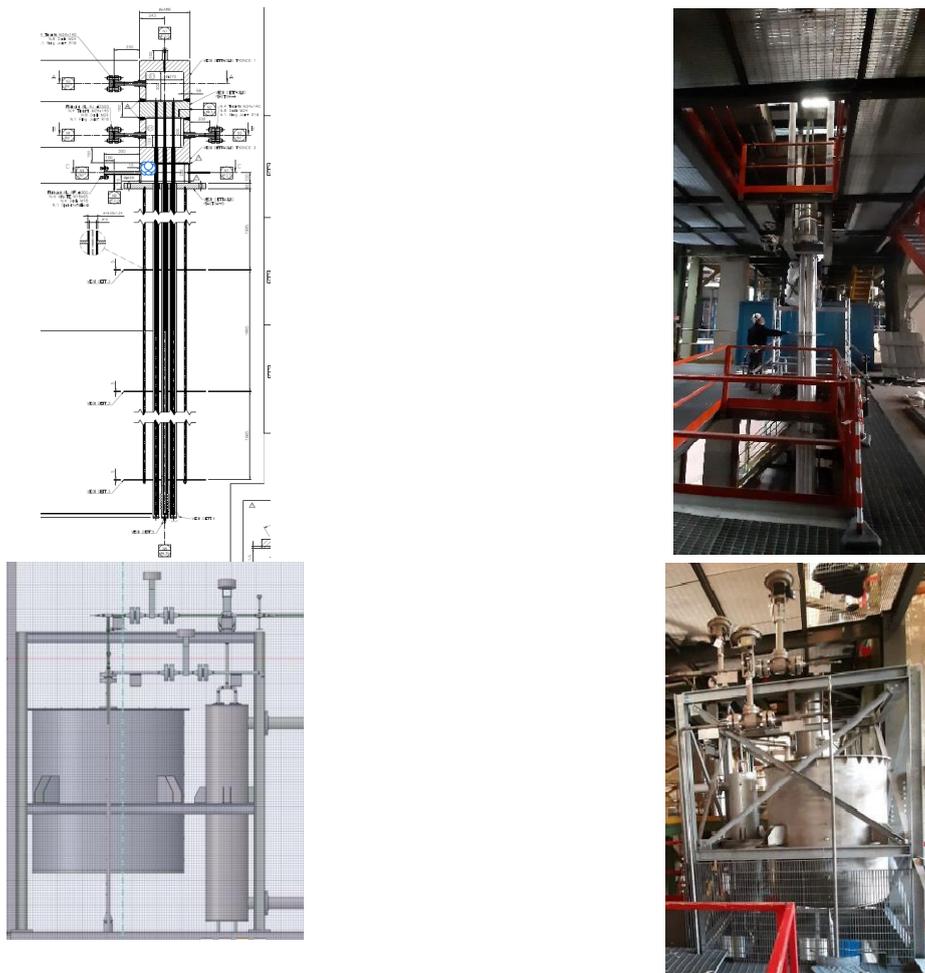


Figura 2- Modelli, disegni e Immagini di scambiatore di calore, isolation condenser

I montaggi in sito sono iniziati con l'installazione delle strutture metalliche di supporto e con l'adeguamento delle infrastrutture esistenti. Al termine di queste operazioni, sono stati montati i principali componenti meccanici (Steam Generator, Gas Tank ed Isolation Condenser) che poi sono stati collegati tramite tubazioni. Le attività di montaggio sono poi proseguite con l'installazione della strumentazione di impianto, con la posa del quadro elettrico ed infine con il cablaggio elettrico e di controllo della facility. Al termine delle attività sono stati effettuati dei controlli circuitali e funzionali (misure di isolamento, tarature, prova azionamento apparecchiature etc) per la verifica della funzionalità delle singole apparecchiature.

WP4 - Commissioning & Testing Della Facility

Diverse attività di commissioning sono state eseguite durante le fasi finali di costruzione di SIRIO e durante la messa in servizio per caratterizzare alcune grandezze as-built dell'impianto.

In particolare, le principali attività svolte sono state: la misura dell'effettiva capacità dell'impianto, la misura del coefficiente di perdite di carico dell'orifizio installato sulla linea IC e la prova del controllo software per fornire una curva di potenza durante il transitorio. In aggiunta l'impianto è stato modificato in alcune parti al fine di operarlo in condizioni di maggiore sicurezza e per gli operatori e per i sensori.

Come parte del testing, a causa dei tempi stringenti, solo due test sono stati eseguiti secondo procedura. In entrambi i casi l'impianto è stato spinto al limite delle proprie condizioni operative.

Il primo test è stata la prima istanza del raggiungimento delle elevate condizioni di pressione e temperatura per l'impianto. Conseguentemente, si è assistito al cedimento di un raccordo filettato con rilascio di vapore ad alta temperatura dall'impianto. La perdita di massa è stata consistente e pertanto la prova è stata annullata.

Una seconda prova è stata eseguita. Anche in questo caso le estreme condizioni di temperatura e pressione hanno portato alla cricatura di una valvola di non ritorno.

Poiché la perdita era contenuta e a causa dei summenzionati limiti di tempo, la prova è proseguita nonostante la presenza di tale perdita. Successivamente si è pressurizzato l'impianto con aria per cercare di caratterizzare la perdita alla rottura. I dati misurati sia durante la prova che nel test di perdita sono stati forniti ai partners per svolgere il lavoro di post-test analisi.

Nonostante la perdita, nelle fasi iniziali della prova l'impianto ha operato come atteso, con la pressione del sistema rimasta a valori elevati anche a fronte di una riduzione considerevole della potenza fornita al generatore di vapore (vedi Figura 1). Successivamente, la perdita ha causato una riduzione di pressione dell'impianto.

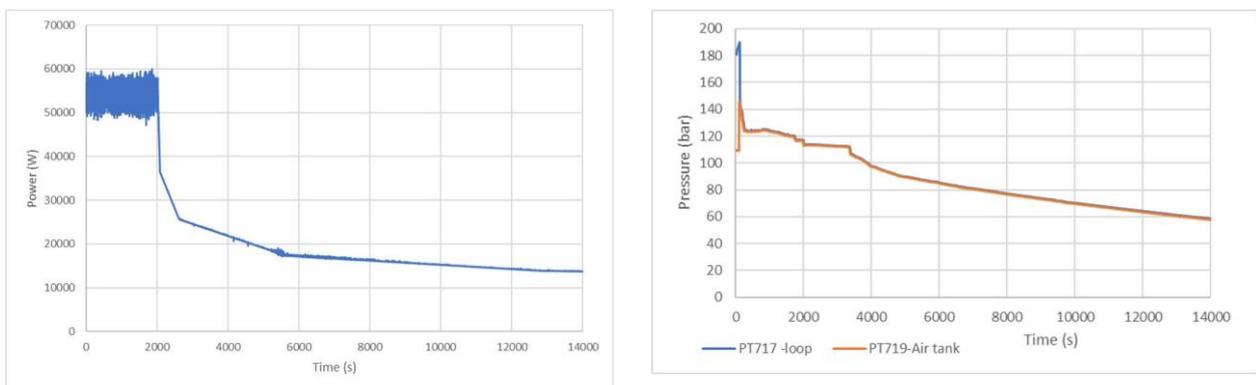


Figura 3 - Andamento di potenza e pressione durante la prova

WP5 - Analisi Di Post-Test E Validazione Codici

Scopo di questo WP è stato di analizzare i dati sperimentali ottenuti nel corso della campagna, confrontare l'andamento rispetto alle predizioni dei codici di calcolo e infine utilizzare le competenze apprese per simulare il funzionamento del sistema di ALFRED su piena scala.

All'interno della prima attività i dati sperimentali sono stati collezionati in un database e suddivisi per tipologia. Sulla base dell'evento incidentale testato, gli andamenti sono stati criticamente valutati confrontandoli con le fenomenologie attese, al fine di validare la bontà dei risultati. I dati mostrano una prima fase di funzionamento stazionario per l'impianto, a cui segue il test effettivo, nel quale i fenomeni fisici attesi da progetto sul sistema di sicurezza di ALFRED sono identificabili.

Per la seconda fase di lavoro i dati sperimentali sono stati utilizzati come input per valutare la bontà dei codici di calcolo nel riprodurre l'andamento del test. Una rappresentazione fedele della facility sperimentale SIRIO è stata sviluppata per mezzo dei codici di calcolo RELAP5, RELAP5-3D e CATHARE. I modelli sono stati in seguito utilizzati per simulare il transitorio di test, ed i risultati numerici sono stati comparati con i dati dell'esperimento. I risultati più rilevanti sono:

- Il codice di calcolo CATHARE risulta inadeguato per simulare il sistema di sicurezza, a causa di limitazioni intrinseche nei modelli numerici.
- Le simulazioni svolte mediante i codici RELAP5 e RELAP5-3D mostrano capacità predittive discrete rispetto agli esperimenti, con un grado di incertezza variabile in funzione delle ipotesi fatte nella costruzione dei modelli
- Alcuni dati sperimentali risultano in contrasto con le predizioni numeriche, suggerendo la necessità di ulteriori studi al fine di identificarne le cause, siano esse di tipo sperimentale o limitazione numerica.

All'interno dell'ultima fase di lavoro del WP, le competenze apprese sono state applicate per la progettazione del sistema di sicurezza applicato ad ALFRED, in particolare definendo le caratteristiche di progetto principali per i componenti di cui è composto (Isolation condenser, piping, valvole). Il progetto è stato successivamente modellato tramite il codice di calcolo RELAP5-3D, e il modello è stato utilizzato per simulare un transitorio di perdita di corrente elettrica sull'impianto, per verificare la funzionalità del sistema di sicurezza. La Figura 4 mostra l'andamento di temperatura del piombo durante il transitorio incidentale. Si nota come in una prima fase la temperatura del circuito primario si raffreddi, grazie all'asportazione di potenza del sistema di sicurezza. In una seconda fase, le temperature del piombo assumono un andamento costante, e rimangono tali per tutto il periodo simulazione, grazie alla capacità del sistema di ridurre la potenza asportata, allineandola alla potenza di decadimento prodotta nel nocciolo.

In sintesi, i risultati ottenuti all'interno del WP5 sono i seguenti:

1. Comprensione dei dati sperimentali ottenuti, con una valutazione dei fenomeni fisici intercorsi, e comparazione con quanto atteso sul sistema a piena scala
2. Validazione della capacità predittiva dei codici di calcolo, identificazione delle discrepanze e dei possibili miglioramenti
3. Progettazione concettuale del sistema di sicurezza a piena scala, con analisi numerica del funzionamento.

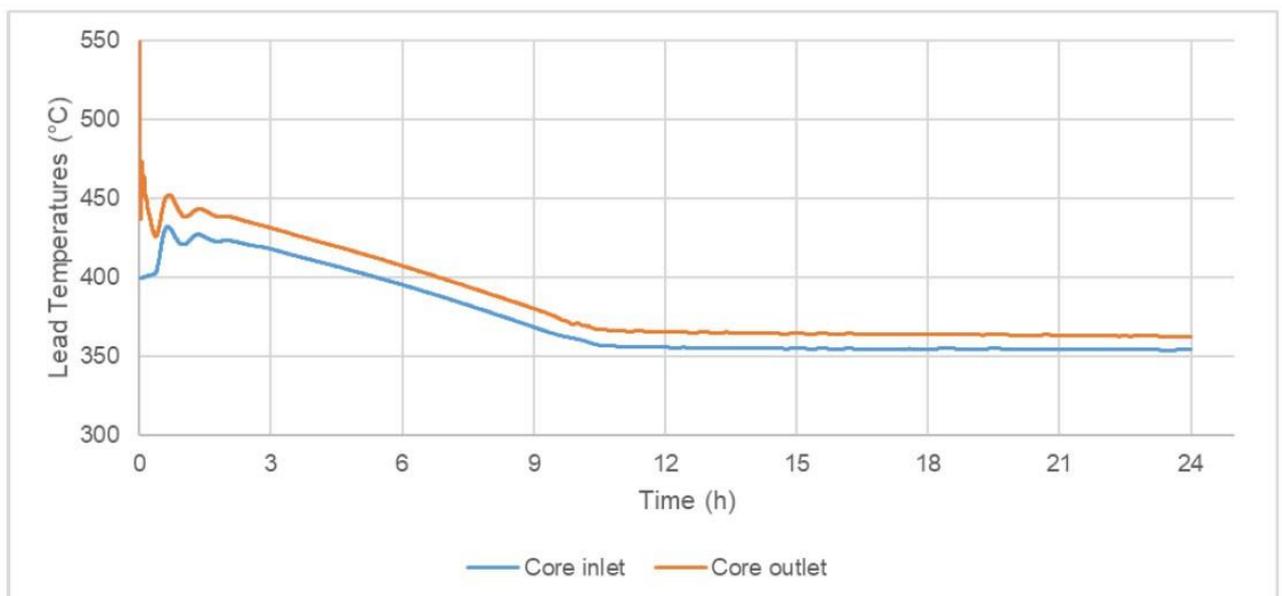


Figura 4. Risultati dal codice RELAP5-3D applicato ad ALFRED

WP6 – Dissemination

Per quanto riguarda la diffusione dei risultati ottenuti dal progetto, questa si è sviluppata sia in fase di attuazione (concettualizzazione e analisi pre-test) che in fase di analisi post-test, validazione del codice.

La diffusione ha avuto luogo attraverso la pubblicazione di articoli scientifici in atti di conferenze internazionali, tra le quali:

1. ICONE 26“International Conference on Nuclear Engineering”, tenutasi a Londra nel mese di luglio 2018. La conferenza è stata una conferenza virtuale a causa dell'epidemia di COVID.
2. IAEA - Conferenza internazionale sui reattori veloci e relativi cicli del combustibile “Sustainable Clean Energy for the Future (FR22)”, 25–28 aprile 2022, Pechino, Cina. L'evento era stato inizialmente pianificato nell'aprile 2021, poi rinviato a causa dell'epidemia di COVID, tenutosi in remoto nel 2022.
3. IAEA - Technical Meeting on State-of-the-art Thermal Hydraulics of Fast Reactors, previsto in ENEA Brasimone (Italia), 20-24 settembre 2021. A causa dell'epidemia di COVID l'evento è stato rinviato a settembre 2022, sempre in ENEA- Brasimone.

Tutti i lavori sono stati rivisti e approvati da un gruppo di revisori internazionali.

3. IMPATTO SUL SISTEMA ELETTRICO E BENEFICI ATTESI

Le ricadute e gli impatti del progetto SIRIO coinvolgono il tessuto di ricerca e quello di progettazione e manifatturiero nazionale, che nel breve termine sono stati beneficiari dei seguenti risultati:

1. Consolidamento e crescita di know-how nella progettazione di sistemi di sicurezza innovativi per impianti nucleari
2. Miglioramento nella capacità di utilizzo di codici di calcolo nucleare per la verifica di sicurezza di impianto
3. Estensione di validità dei codici di calcolo nella predizione di fenomeni fisici complessi
4. Costruzione di componenti ad alto contenuto tecnologico, prototipici dei componenti attesi su impianti nucleari futuri

Grazie allo sviluppo del progetto SIRIO, i proponenti della compagine hanno potuto accedere a ulteriori fondi di ricerca finalizzati ad estendere la campagna di test sull'impianto SIRIO (Progetto PIACE), per valutare l'applicabilità del sistema di sicurezza a ulteriori impianti nucleari innovativi, nonché su impianti attualmente in operazione sul territorio europeo. Questa opportunità ha ulteriormente accresciuto il valore aggiunto dell'investimento.

Nel medio periodo, le competenze e gli asset sviluppati nel progetto pongono la compagine e l'indotto in una posizione strategica di rilevanza per concorrere a ulteriori attività di ricerca e sviluppo nell'ambito dei reattori nucleari innovativi.

A più ampio respiro, lo sviluppo di un sistema di sicurezza innovativo è parte delle iniziative di mantenimento e accrescimento competenze nucleari che pongono il settore industriale italiano nella posizione di concorrere alla costruzione dei futuri impianti nucleari sul territorio Europeo.