

STUDIO SPERIMENTALE DI UN SISTEMA DI EMERGENZA PASSIVO PER L'ASPORTAZIONE DEL CALORE IN CASO DI *RUNAWAY REACTIONS*

G. CARUSO, A. NAVIGLIO, G. MINERVINI, S. GIRARDI
Università di Roma "La Sapienza" - DINCE
Corso Vittorio Emanuele II, 244 - 00186 ROME (ITALY)
e-mail: gianfranco.caruso@uniroma1.it

SOMMARIO

Il Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia dell'Università di Roma "La Sapienza" ha realizzato l'impianto sperimentale NICOLE (Naturally Induced Circulation cooling Loop for Emergency), per lo studio termoidraulico di un sistema passivo di asportazione del calore in situazioni di emergenza, quali quelle che possono potenzialmente verificarsi in reattori chimici a causa di *runaway reactions*. L'impianto, quasi in piena scala relativamente alle reazioni chimiche simulate, è stato oggetto di una ampia campagna sperimentale, con 27 prove sperimentali variando, oltre al tipo di reazione chimica e alla sua cinetica, anche diversi parametri di processo. La sperimentazione è stata finalizzata a valutare i limiti di intervento del sistema, determinando le condizioni per le quali la reazione tende comunque a divergere, malgrado il sistema di rimozione del calore ritardi notevolmente l'evoluzione del fenomeno, consentendo il consumo dei reagenti presenti. Le analisi di simulazione svolte utilizzando un adatto codice di calcolo e, soprattutto, le numerose prove sperimentali effettuate, hanno dimostrato come il sistema di sicurezza proposto sia in grado di far fronte con successo a incidenti caratterizzati da tempistiche molto differenti, da pochi minuti a diverse ore, nonché da diverse temperature nel recipiente di processo. L'estrema versatilità del sistema è dovuta alla sua modesta inerzia termica e alla possibilità di adattare sensibilmente le sue prestazioni alle diverse tipologie di evento incidentale, variando i suoi principali parametri funzionali: superfici di scambio termico, capacità termica del refrigerante secondario, sviluppo verticale del sistema.

INTRODUZIONE

Gli incidenti di *runaway* consistono in reazioni indesiderate e fortemente esotermiche, le quali interessano diversi settori industriali e, qualora innescate, provocano una escursione divergente della potenza generata. Possono essere causati da guasti meccanici, ma più frequentemente da errori degli operatori di impianto o da malfunzionamenti delle apparecchiature di controllo. In relazione alla pericolosità delle sostanze coinvolte, possono costituire un problema non solo sotto il profilo della funzionalità e disponibilità di impianto, ma anche sotto il profilo della sicurezza per gli operatori e – nei casi più gravi – per le popolazioni. Diversi sono i processi chimici potenzialmente interessati da *runaway reactions*; le conoscenze sulle modalità di innesco e di evoluzione degli incidenti sono solo parzialmente note o costituiscono un patrimonio di conoscenza per tutti gli operatori di impianto: a titolo esemplificativo, in Inghilterra la produzione delle resine fenolo-formaldeide negli ultimi anni è stata interessata da un numero così elevato di fenomeni di *runaway*, da indurre l'associazione dei produttori delle resine a stilare e a diffondere un documento contenente un elenco delle possibili cause di incidente e delle eventuali modalità di intervento, [1].

In quest'ottica si inserisce l'attività di ricerca svolta dal Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia (DINCE) dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza", in collaborazione con l'ANSALDO NUCLEARE e il C.N.R.- Istituto di Ricerche sulla Combustione, finalizzata a definire e a sviluppare un sistema innovativo di refrigerazione di sicurezza da impiegare nell'industria di processo per far fronte, appunto, a situazioni tipiche delle *runaway reactions* [2].

Il sistema in fase di studio deve essere in grado di asportare potenza termica in modo passivo e intrinsecamente affidabile da reattori chimici, senza il rilascio nell'ambiente del fluido di processo o anche semplicemente il suo trasferimento fisico da un recipiente ad un altro.

In base a queste considerazioni, il C.N.R.-IRC di Napoli [3] ha selezionato alcuni processi suscettibili di deviazioni di *runaway*, in base alla pericolosità e alla frequenza di ricorrenza. La ricerca ha costituito il punto di partenza per il dimensionamento di un sistema di sicurezza passivo, condotto con particolare riferimento a due reazioni: l'amminazione del cloronitrobenzene e la produzione dell'idroperossido di cumene [4].

Una volta dimostrata la piena applicabilità del progetto sotto il profilo funzionale, tecnico ed economico, esso potrebbe essere impiegato in tutti quei casi in cui vi sia la possibilità di una generazione o cessione incontrollata di calore all'interno di reattori contenenti fluidi altamente pericolosi dal punto di vista di tossicità, incendiabilità o esplosività, nonché come parte di un sistema passivo di asportazione del calore residuo in reattori nucleari a sicurezza avanzata.

L'IMPIANTO SPERIMENTALE

L'impianto sperimentale NICOLE (Naturally Induced Circulation cooling Loop for Emergency), quasi in piena scala relativamente alle reazioni chimiche simulate (fattore di scaling pari a circa 0.85), è costituito essenzialmente da un generatore di calore (GC) ad olio diatermico (Fig. 1), con una potenza di 35 kW, da un circuito a circolazione naturale che si sviluppa per un'altezza di circa 8 m, che chiameremo d'ora in poi per brevità CRSP (Circuito di Refrigerazione di Sicurezza Primario), e da una piscina con le funzioni di pozzo termico, avente una capacità massima di circa 3 m³ di acqua. In derivazione dalla gamba calda è posta la linea di collegamento a due vasi di espansione in parallelo del tipo a bolla di gas, con azoto quale gas di copertura del pelo libero di acqua: il dimensionamento di questi ultimi garantisce il mantenimento del CRSP in condizione monofasica per l'intera evoluzione dei transitori incidentali esaminati.

L'apparecchiatura sperimentale comprende anche quattro circuiti ausiliari: quello di alimentazione e svuotamento acqua, quello di caricamento e drenaggio olio, quello di alimentazione e scarico dell'azoto e quello di emergenza, il quale evita che la pressione nel CRSP superi una soglia di sicurezza prefissata.



Fig. 1 – Generatore di Calore: in evidenza gli alloggiamenti per le termoresistenze sulla superficie laterale

La strumentazione installata comprende:

- 25 termoresistenze Pt 100;
- 5 misuratori di pressione;
- 3 misuratori di livello capacitivi;
- 1 misuratore di portata massica "Coriolis";

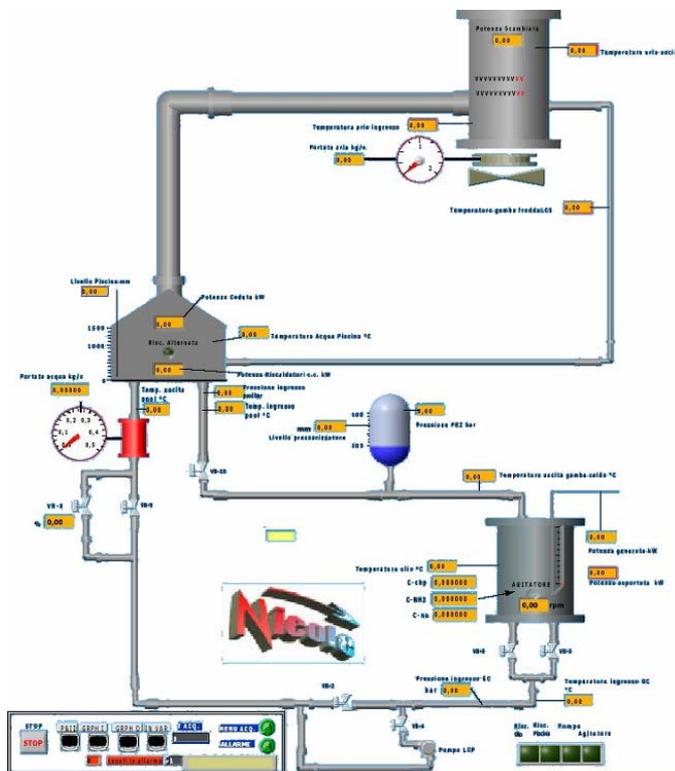


Fig. 2 – Schema di controllo semplificato

I risultati ottenuti dalle simulazioni sono stati registrati da un software appositamente sviluppato mediante il linguaggio di programmazione LabView della National Instruments. Lo stesso software è adibito alla regolazione della potenza termica erogata da 8 gruppi riscaldatori immersi nel generatore di calore in funzione della temperatura media dell'olio diatermico (al fine di simulare le reazioni esotermiche), nonché al controllo automatico delle grandezze significative ai fini della sicurezza dell'impianto (Fig. 2). In Fig. 3 è mostrato il P&ID dell'impianto.

Sono state effettuate 27 prove sperimentali complete in condizioni monofase nel circuito, (ciascuna con una durata variabile da 3 ore a 10 ore) variando, oltre al tipo di reazione chimica e alla sua cinetica, anche la temperatura iniziale e la massa d'acqua contenuta in piscina e le perdite di carico nel circuito tramite un'apposita valvola di regolazione.

La sperimentazione è stata finalizzata a valutare anche i limiti di intervento del sistema, determinando le condizioni per le quali la reazione tende comunque a divergere, malgrado il sistema di rimozione del calore ritardi notevolmente l'evoluzione del fenomeno, consentendo il consumo dei reagenti presenti.

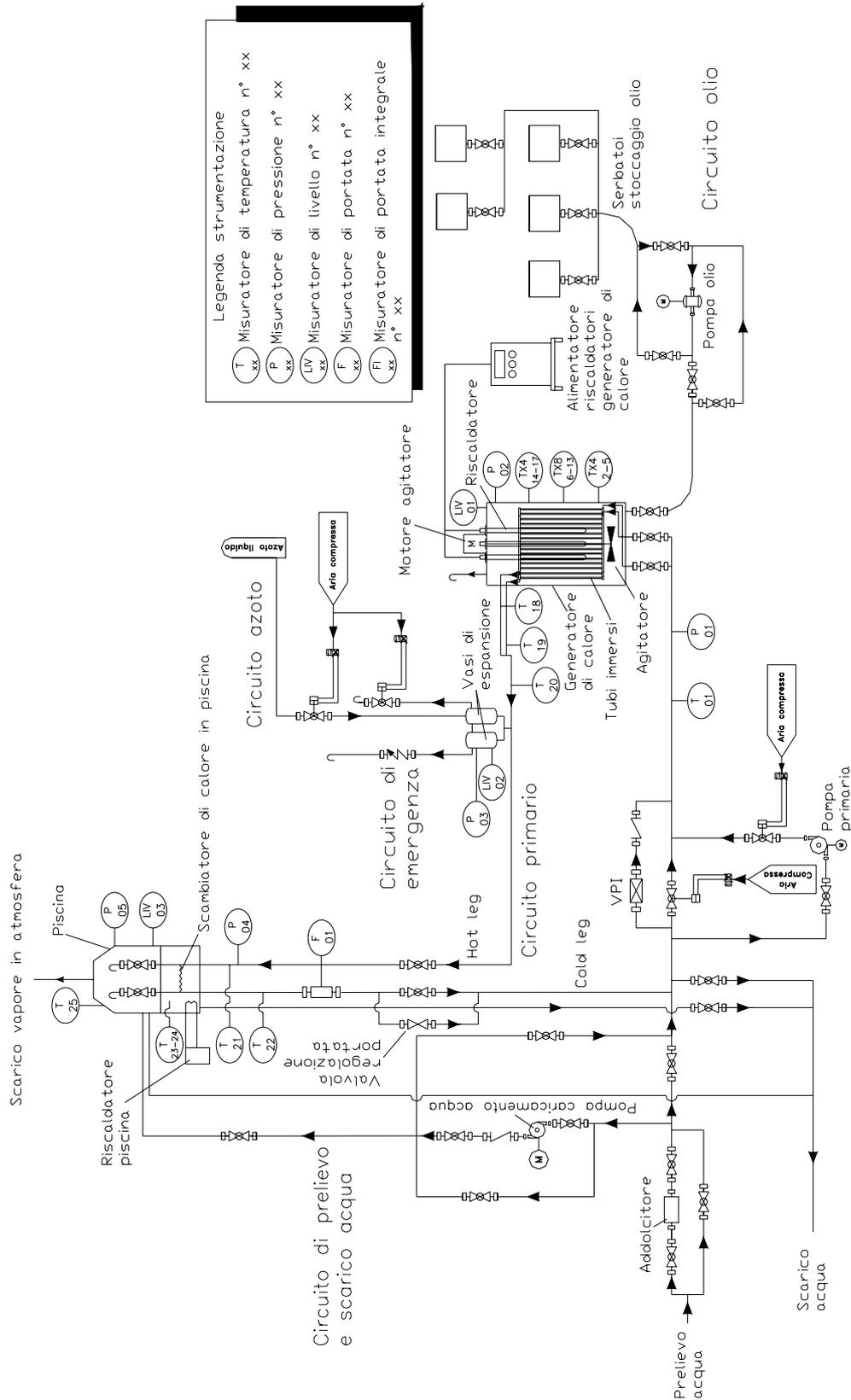


Fig. 3 – P&ID dell’impianto NICOLE.

MATRICE SPERIMENTALE

In base a quanto rilevato durante studi di simulazione preliminari effettuati con una analisi parametrica rispetto dalla configurazione base, la matrice sperimentale è stata definita in base alle seguenti grandezze:

- Temperatura iniziale dell'acqua in piscina;
- Massa di acqua in piscina;
- Numero di tubi dello scambiatore in piscina
- Apertura della valvola di regolazione

Per la temperatura in piscina, T_p , sono stati considerati i seguenti valori:

$T_p = 28^\circ\text{C}$	Temperatura dell'acqua in piscina pari ad una temperatura ambiente media annua.
$T_p = 50^\circ\text{C}$	Temperatura dell'acqua in piscina elevata a causa di un precedente funzionamento del sistema di refrigerazione di sicurezza:
$T_p = 70^\circ\text{C}$	questa ipotesi è plausibile, in quanto in caso di un precedente impiego del CRSP (Circuito di Refrigerazione di Sicurezza Primario), mentre la temperatura della gamba fredda impiega un breve intervallo di tempo (2÷3 ore) per tornare a valori ambientali, la massa d'acqua in piscina ha una maggiore inerzia termica nel transitorio di raffreddamento e potrebbe trovarsi quindi in condizioni prossime proprio ai $50\div 70^\circ\text{C}$.
$T_p = 95^\circ\text{C}$	Temperatura dell'acqua in piscina prossima a quella di saturazione alla pressione atmosferica: si cerca di valutare l'effetto positivo nello scambiatore in piscina dovuto all'aumento del coefficiente di scambio termico lato mantello al raggiungimento delle condizioni di ebollizione di massa.

Per la massa acqua in piscina, M_p , sono stati considerati i seguenti valori:

$M_p = 1390\text{ kg}$	Massa d'acqua in piscina della configurazione base per la quale è stato dimensionato l'impianto. Questa quantità è stata fissata in maniera tale da garantire, in caso di raggiungimento delle condizioni di ebollizione di massa, un tempo adeguatamente sufficiente per intervenire operando un reintegro dell'acqua prima che il pelo libero, scendendo, possa scoprire il fascio tubiero.
$M_p = 1020\text{ kg}$	Massa d'acqua in piscina pari a circa 3/4 di quella della configurazione base.
$M_p = 760\text{ kg}$	Massa d'acqua in piscina minima, utilizzata per facilitare il raggiungimento delle eventuali condizioni di ebollizione di massa ma comunque sufficiente a garantire la copertura del fascio tubiero durante tutta l'evoluzione prevista del transitorio.

Per il numero di tubi dello scambiatore in piscina, N_t , sono stati considerati i seguenti valori:

$N_t = 6$	Numero tubi del fascio tubiero dello scambiatore in piscina corrispondente alla configurazione base di impianto.
$N_t = 9$	Numero di tubi massimo possibile
$N_t = 5$	Numero di tubi minimo possibile

Per il grado di apertura della valvola, corrispondente alla percentuale di apertura della valvola di regolazione utilizzata per simulare la presenza di perdite di carico aggiuntive, dovute ad esempio all'aggiunta di un componente nel circuito, ad un graduale sporcamento all'interno delle tubazioni dovuto a incrostazioni oppure a variazioni dimensionali (ad es. lunghezza dei tubi) o geometriche del CRSP rispetto alla configurazione del NICOLE, sono stati considerati i seguenti valori:

Apertura = 60-50-40%	Con questi valori si vuole indagare l'effetto di una perdita di carico aggiuntiva tale da provocare variazioni percentuali di portata comprese tra il 5% ed il 40%, valori ottenuti dalla caratterizzazione della valvola di regolazione installata nel circuito.
----------------------	---

Sulla base di quanto detto è stata definita la matrice delle prove riportata in Tabella 1 con i seguenti significati dei simboli che si aggiungono a quelli già definiti:

- nella prima colonna è riportata la sigla identificativa della prova;
- nella seconda colonna è specificato il tipo di reazione:
 - ✓ CHP n=1 runaway di ordine n=1 nel processo di produzione dell'idroperossido di cumene;
 - ✓ CHP n=0.5 runaway di ordine n=0.5 nel processo di produzione dell'idroperossido di cumene;
 - ✓ Amm-cnb runaway nel processo di amminazione del cloronitrobenzene.

Nell'ultima colonna è stato riportato anche l'esito della prova il cui significato verrà discusso nel paragrafo successivo.

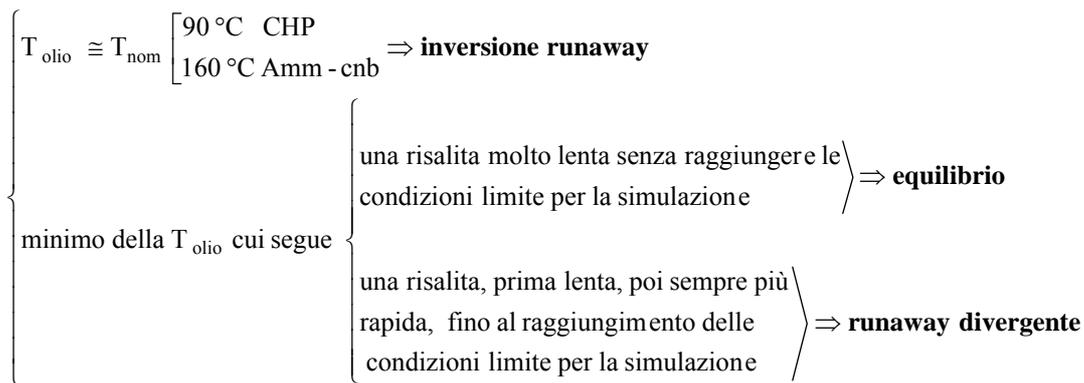
TEST	Reazione	T piscina [°C]	Massa acqua piscina [kg]	N-tubi	Apertura VR8 [%]	Esito prova
t1.1	CHP n=1	28	1390	5	0	Inversione runaway
t1.2	CHP n=1	28	1020	6	0	Inversione runaway
t1.3	CHP n=1	50	1020	6	0	Runaway divergente
t1.4.1	CHP n=1	50	1390	6	0	Equilibrio
t1.4.2	CHP n=1	50	1390	5	0	Equilibrio
t1.5	CHP n=1	28	1390	8	0	Inversione runaway
t1.6	CHP n=1	51	1020	8	0	Runaway divergente
t1.7	CHP n=1	28	1390	5	60	Inversione runaway
t1.8	CHP n=1	28	1390	5	50	Inversione runaway
t1.9.1/t1.9.2	CHP n=1	28	1390	5	40	Runaway divergente
t1.10	CHP n=1	50	1715	6	0	Inversione runaway
t1.11	CHP n=1	28	760	5	0	Equilibrio
t1.12	CHP n=1	28	760	8	0	Inversione runaway
t1.13	CHP n=1	50	1390	8	0	Inversione runaway
t2.1	CHP n=0.5	50	1020	6	0	Inversione runaway
t2.2	CHP n=0.5	70	1020	6	0	Inversione runaway
t2.3	CHP n=0.5	70	760	8	0	Equilibrio
t2.4	CHP n=0.5	70	760	5	0	Runaway divergente
t2.5	CHP n=0.5	50	760	5	0	Inversione runaway
t3.1	Amm-cnb	28	1390	5	0	Inversione runaway
t3.2	Amm-cnb	28	1390	5	40	Inversione runaway
t3.3	Amm-cnb	28	1390	5	25	Inversione runaway
t3.4	Amm-cnb	95	760	5	0	Inversione runaway
t0.1	CHP n=1	30	1390	5	0	Inversione runaway
t0.2	CHP n=1	32	1390	5	0	-
t0.3	CHP n=1	60	1390	5	0	Runaway divergente

Tab. 1 – Matrice sperimentale con esito delle prove.

DESCRIZIONE GENERALE DELLE PROVE EFFETTUATE

Una descrizione generale delle simulazioni effettuate mediante l'impianto prototipo NICOLE può essere effettuata suddividendo la generica prova in tre fasi, ognuna definita dal raggiungimento di punti caratteristici nel grafico della T_{olio} .

L'andamento della T_{olio} a seguito dell'apertura della VPI (valvola primaria di intercettazione) è caratterizzato, per tutte le prove, dal raggiungimento di un massimo seguito da una fase decrescente più o meno rapida che termina con:



I tre termini utilizzati per descrivere gli esiti delle prove hanno il seguente significato:

“Inversione runaway” Il sistema di refrigerazione di sicurezza è riuscito a riportare la temperatura media dell’olio al di sotto dei valori nominali del fluido di processo della reazione di riferimento ($T_{nom} = 90^\circ\text{C}$ per CHP, $T_{nom} = 160^\circ\text{C}$ per Amm-cnb)

“Runaway divergente” Il sistema di refrigerazione di sicurezza non è riuscito a contenere la reazione che diverge facendo raggiungere condizioni limite di potenza o di temperatura all’impianto (fissate in base ai valori limiti di progetto).

“equilibrio” Il sistema di refrigerazione di sicurezza pur non riuscendo ad invertire la reazione di runaway, ha comunque rallentato l’escursione incidentale ed evitato un rapido raggiungimento delle condizioni limite per l’impianto.

In questa sede, il termine **equilibrio** non sta a significare che il sistema di sicurezza riesce a controllare per un tempo indefinitamente lungo la reazione di runaway, ma che al termine della prova in questione i valori delle varie grandezze di interesse non permettono una sicura previsione dell’esito del transitorio che comunque, potendo disporre di un tempo di osservazione più lungo, si sarebbe risolto o in un **runaway divergente** o in una **inversione del runaway** causata dal progressivo e completo esaurimento dei reagenti. Analisi numeriche di simulazione della prova possono condurre a stimare quale sarà il risultato finale della prova.

In tutti i grafici presentati, l’istante $t=0$ corrisponde a quello di apertura della VPI, che si verifica quando la T_{olio} raggiunge 110°C o 180°C , rispettivamente per la reazione di produzione di idroperossido di cumene e per quella di amminazione del cloronitrobenzene.

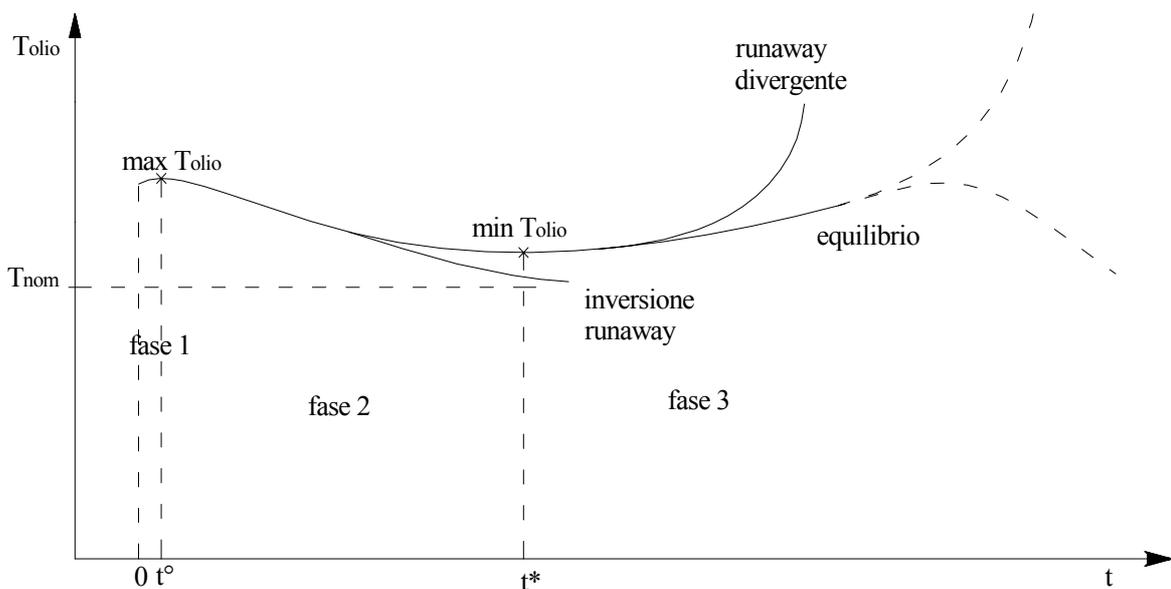


Fig. 4 – Andamento generale del grafico della T_{olio}

Con riferimento alla Fig. 4, le tre fasi caratteristiche sono:

- fase 1: intervallo compreso tra l'istante in cui si apre la VPI ($t=0$) ed il raggiungimento del massimo della T_{olio} cioè $0 < t < t^*$.

Subito dopo l'apertura della VPI, a causa della differente densità dell'acqua contenuta nelle due gambe, si innesca un moto in circolazione naturale. Nei primi minuti si registra il picco di portata Γ , dopo il quale questa va diminuendo a causa della diminuzione della differenza tra le temperature medie delle due gambe. In questa prima fase, qualitativamente uguale in tutte le prove, il CRSP riesce ad asportare dal GC ed a scambiare in piscina delle potenze maggiori di quella generata dalla reazione di *runaway*. Nonostante questo bilancio di potenze tenda nettamente a favorire un raffreddamento dell'olio nel GC, la T_{olio} continua ad aumentare fino a raggiungere un valore massimo dopo $\sim 5+6$ minuti, a causa della inerzia termica del sistema.

- fase 2: intervallo compreso tra il massimo ed il minimo della T_{olio} cioè $t^* < t < t^*$.

Superato il massimo della T_{olio} si entra in questa seconda fase nella quale al lento raffreddamento dell'olio si contrappone il riscaldamento dell'acqua in piscina. Volendo studiare le relazioni dirette tra le grandezze considerate si ha (per una determinata prova con un determinato numero di tubi nello scambiatore in piscina):

$$\begin{aligned}
 P_{g\ GC} &= f(T_{olio}; C_{reagenti}) \\
 P_{a\ GC} &= f(\Gamma; T_{olio}; T_{in\ GC}) \\
 P_P &= f(\Gamma; T_P; T_{in\ P}) \\
 \Delta T_{GC} &= T_{out\ GC} - T_{in\ GC} = f(T_{in\ GC}; P_{a\ GC}) \\
 \Delta T_P &= T_{in\ P} - T_{out\ P} = f(T_{in\ P}; P_P)
 \end{aligned}$$

Ipotizzando di variare una sola grandezza per volta si ottiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{se } T_{olio} \downarrow \Rightarrow \\ \text{se } T_P \uparrow \Rightarrow \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} P_{a\ GC} \downarrow \Rightarrow \Delta T_{GC} \downarrow \Rightarrow T_{in\ P} \downarrow \Rightarrow P_P \downarrow \\ \Gamma \downarrow \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} P_{a\ GC} \downarrow \\ P_P \downarrow \end{array} \right. \\ P_P \downarrow \Rightarrow \Delta T_P \downarrow \Rightarrow T_{in\ GC} \Rightarrow P_{a\ GC} \downarrow \\ \Gamma \downarrow \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} P_{a\ GC} \downarrow \\ P_P \downarrow \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Da queste relazioni risulta evidente che nella fase 2 in cui c'è una diminuzione della T_{olio} , anche i valori delle potenze considerate diminuiscono: la $P_{a\ GC}$ e quindi la P_P diminuiscono sempre più rapidamente della $P_{g\ GC}$, tendendo al valore di quest'ultima. Di conseguenza se continua ad esser valida la relazione $P_{a\ GC} > P_{g\ GC}$ fino al raggiungimento dei valori nominali della T_{olio} , si verifica l'**inversione del runaway**; altrimenti in caso di intersezione tra le curve della $P_{a\ GC}$ e quella della $P_{g\ GC}$ e di raggiungimento della condizione:

$$P_{g\ GC} \geq P_{a\ GC} + \text{"Potenza dispersa GC"}$$

si raggiungerà un minimo nella T_{olio} ;

- fase 3: intervallo successivo al minimo della T_{olio} fino a fine prova cioè $t > t^*$.

A seconda di come vada aumentando nella prosecuzione della prova il valore della differenza tra i due membri della condizione precedente, si potrebbe avere una prova in **equilibrio** o un **runaway divergente**.

Nelle figure seguenti sono riportati i grafici delle grandezze più rilevanti per prove di differenti reazioni e con esiti diversi.

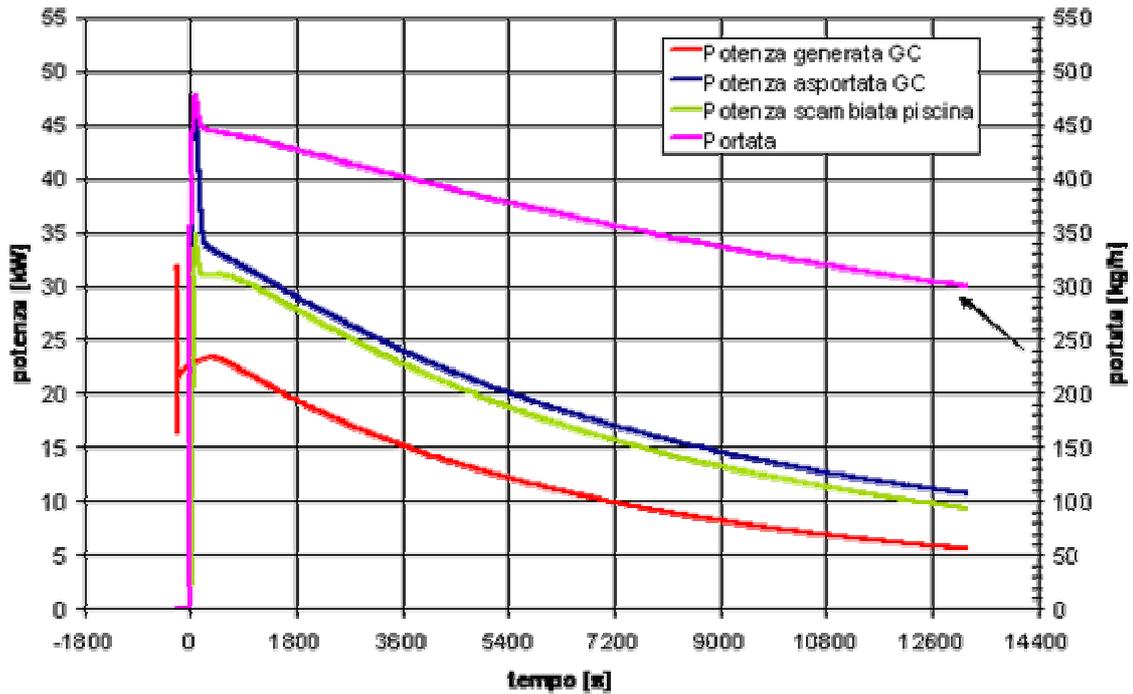


Fig. 5a – Grafico “Potenze e Portata” di una prova con inversione del runaway nella reazione di produzione dell’idroperossido di cumene; reazione di ordine $n=1$ (prova t1.1).

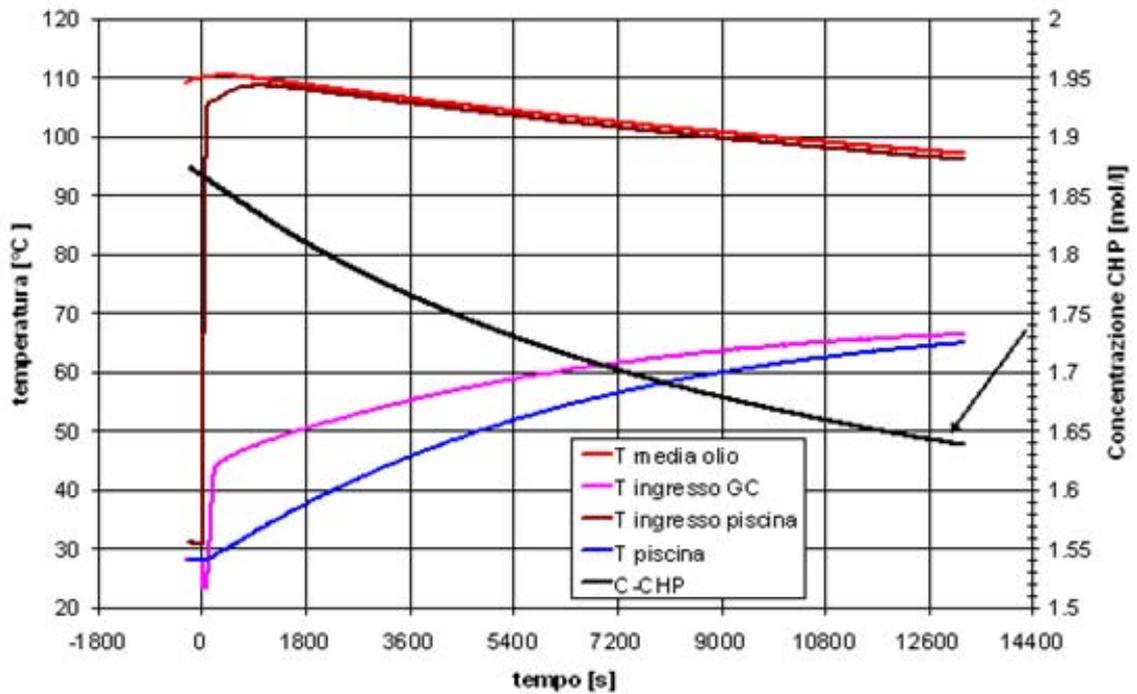


Fig. 5b – Grafico “Temperature e Concentrazione dei reagenti” di una prova con inversione del runaway nella reazione di produzione dell’idroperossido di cumene; reazione di ordine $n=1$ (prova t1.1)

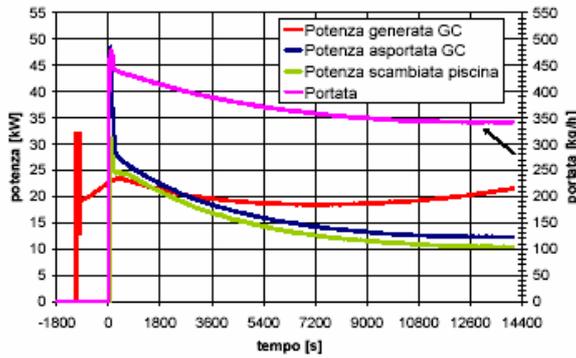


Fig. 6a – Grafico “Potenze e Portata” di una prova con *runaway* divergente nella reazione di produzione dell'idroperossido di cumene; reazione di ordine $n=1$ (prova t1.3)

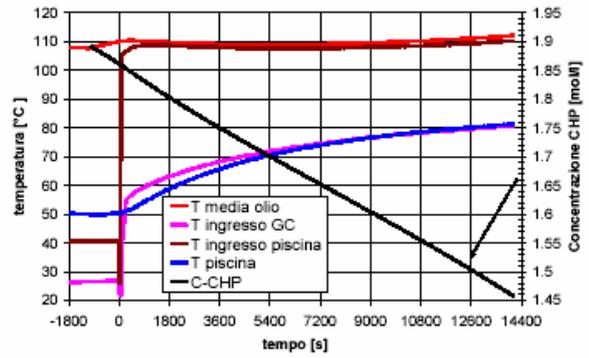


Fig. 6b – Grafico “Temperature e Concentrazione dei reagenti” di una prova con *runaway* divergente nella reazione di produzione dell'idroperossido di cumene; reazione di ordine $n=1$ (prova t1.3)

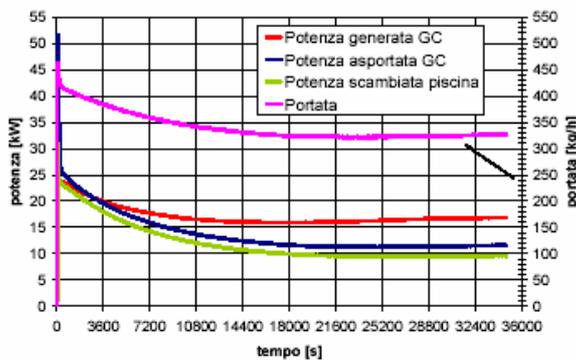


Fig. 7a – Grafico “Potenze e Portata” di una prova in equilibrio nella reazione di produzione dell'idroperossido di cumene; reazione di ordine $n=1$ (prova t1.4.2)

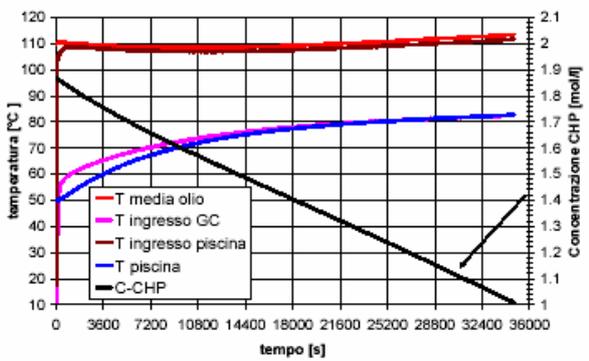


Fig. 7b – Grafico “Temperature e Concentrazione dei reagenti” di una prova in equilibrio nella reazione di produzione dell'idroperossido di cumene; reazione di ordine $n=1$ (prova t1.4.2)

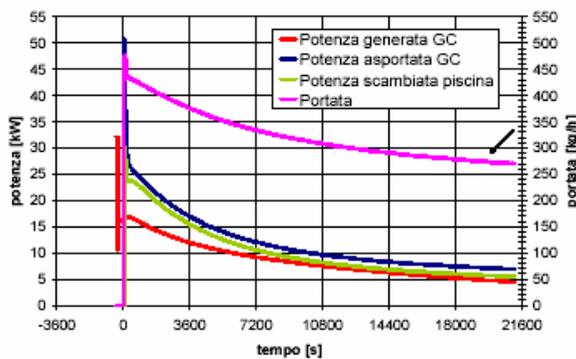


Fig. 8a – Grafico “Potenze e Portata” di una prova con inversione del *runaway* nella reazione di produzione dell'idroperossido di cumene; reazione di ordine $n=0.5$ (prova t2.1).

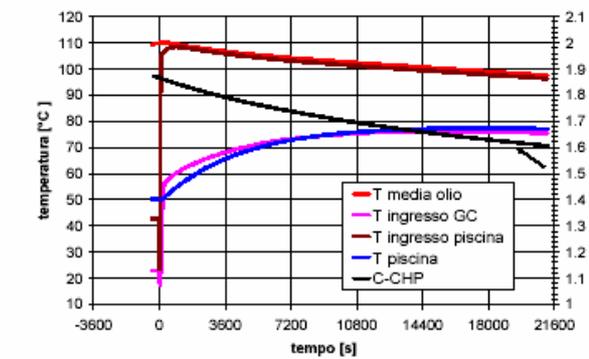


Fig. 8b – Grafico “Temperature e Concentrazione dei reagenti” di una prova con inversione del *runaway* nella reazione di produzione dell'idroperossido di cumene; reazione di ordine $n=0.5$ (prova t2.1)

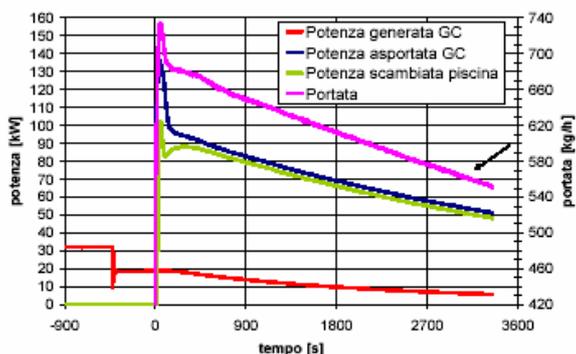


Fig. 9a – Grafico “Potenze e Portata” di una prova con inversione del runaway nella reazione di amminazione del cloronitrobenzene (prova t3.1).

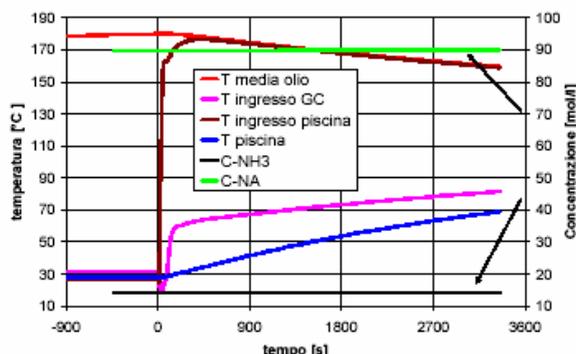


Fig. 9b – Grafico “Temperature e Concentrazione dei reagenti” di una prova con inversione del runaway nella reazione di amminazione del cloronitrobenzene (prova t3.1).

Le prove hanno sostanzialmente verificato quanto già previsto durante l’analisi preliminare; in particolare si è potuto constatare che il sistema di sicurezza, nella configurazione base dei tre parametri:

- massa acqua in piscina,
- superficie di scambio termico in piscina
- temperatura iniziale dell’acqua in piscina,

riesce facilmente ad invertire le tre tipologie di runaway proposte; il comportamento migliore a tal fine si ha nei runaway dell’amminazione del cloronitrobenzene, in quanto durante tutto il transitorio si mantiene una elevata differenza di temperatura tra il GC e la piscina ($60 \div 160$ °C) la quale genera alti valori della portata di refrigerante nel CRSP nel moto in circolazione naturale; la stessa cosa non accade nei runaway dovuti alla produzione dell’idroperossido di cumene, dove questa differenza di temperatura è molto più piccola ($10 \div 90$ °C). Questo rende anche minori le potenze scambiate in piscina e conseguentemente quelle asportate nel GC: risulta evidente, quindi, che i runaway innescati nella produzione dell’idroperossido di cumene, anche se caratterizzati da una generazione di potenza più lenta rispetto a quelli dovuti all’amminazione del cloronitrobenzene presentano, sempre rispetto a quest’ultimi, una maggiore difficoltà (comunque superata dal sistema di sicurezza) ad essere controllati tramite la refrigerazione in circolazione naturale. In questo tipo di reazioni è importante, al pari della superficie di scambio termico in piscina, anche una adeguata inerzia termica del pozzo freddo (quindi elevata massa d’acqua in piscina) affinché la portata si mantenga elevata e conseguentemente si mantengano elevate le potenze scambiate in piscina e asportate al GC.

Infatti, mentre nei runaway dell’amminazione il raggiungimento dell’ebollizione di massa in piscina comporta un innalzamento del coefficiente globale di scambio termico nello scambiatore, accompagnato da una differenza di temperatura tra i due fluidi comunque elevata, nei runaway dell’idroperossido l’ipotetico raggiungimento della stessa condizione, pur generando lo stesso effetto positivo sul coefficiente di scambio termico globale, si presenterebbe in una situazione in cui lo scambio termico sarebbe fortemente compromesso dalla piccola differenza di temperatura tra i due fluidi; tale condizione peraltro nelle prove effettuate non è stata mai raggiunta, sia per l’elevata potenza dispersa in piscina (non coibentata) nelle condizioni prossime all’ebollizione, sia perché persistendo a lungo tali condizioni si avrebbero basse portate e basse potenze scambiate, con inevitabile divergenza del runaway.

SIMULAZIONE DELLE PROVE MEDIANTE CODICE DI CALCOLO

Data la notevole durata delle prove condotte durante la campagna sperimentale, l’impianto NICOLE è stato schematizzato mediante il codice di calcolo Relap5 Mod. 3.2. Ciò al fine di estrapolare su intervalli di tempo maggiori i risultati delle prove più lunghe (il cui esito è stato denominato con il termine “equilibrio”) e, una volta dimostrata la rispondenza dei risultati forniti dal codice con quelli reali, simulare ulteriori prove non effettuate sperimentalmente.

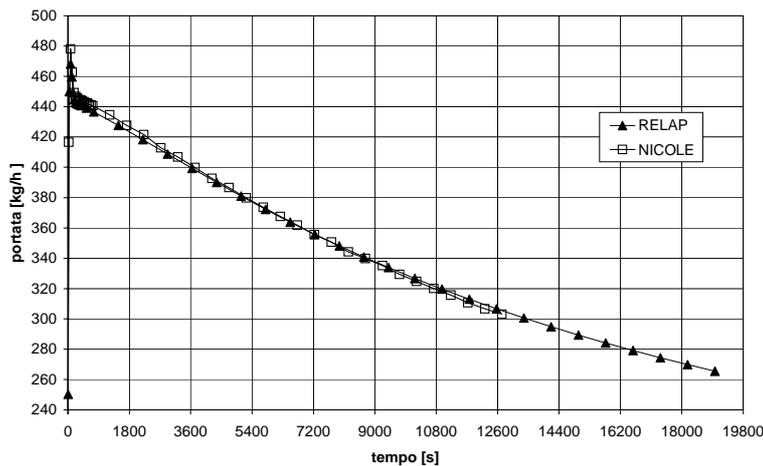


Fig. 10a – Grafico con il confronto della “Portata” di una prova con inversione del *runaway* nella reazione di produzione dell’idroperossido di cumene; reazione di ordine $n=1$ (prova t1.1)

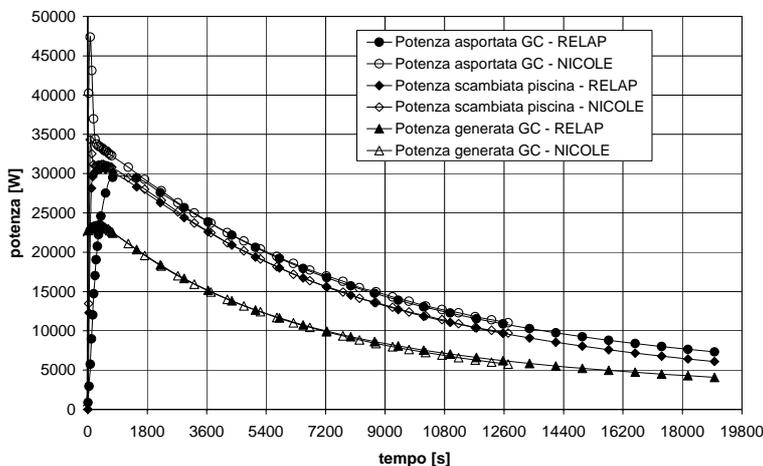


Fig. 10b – Grafico con il confronto delle “Potenze” di una prova con inversione del *runaway* nella reazione di produzione dell’idroperossido di cumene; reazione di ordine $n=1$ (prova t1.1)

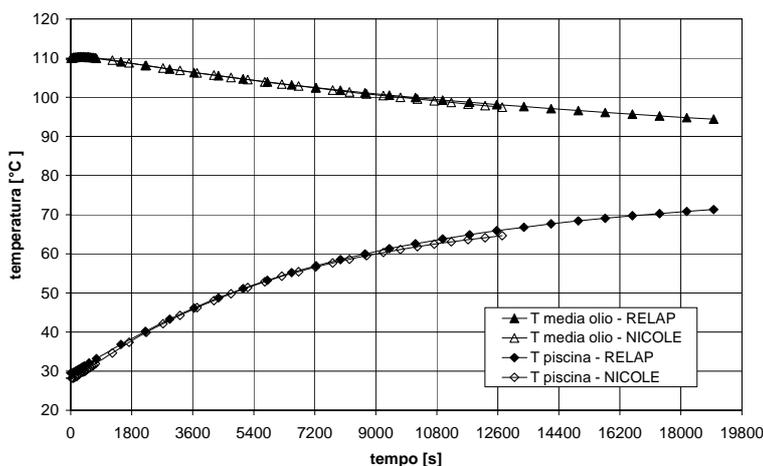


Fig. 10c – Grafico con il confronto delle “Temperature” di una prova con inversione del *runaway* nella reazione di produzione dell’idroperossido di cumene; reazione di ordine $n=1$ (prova t1.1)

Il Relap5 Mod. 3.2 [5] è in grado di eseguire analisi termoidrauliche su sistemi in cui sia presente un fluido, che può essere una qualunque miscela di acqua, vapore acqueo, incondensabili e soluti non volatili. Per analizzare con il Relap5 il comportamento termoidraulico di un impianto, è necessario schematizzarne l'architettura mediante una rete di volumi di controllo previsti dal codice di calcolo. Questi sono assimilabili a tubi di flusso e possono essere interconnessi da giunzioni in corrispondenza del loro ingresso, della loro uscita o della loro parte centrale. Il Relap5 include, tra le possibili tipologie di volumi di controllo, numerosi modelli di componenti, in grado di rappresentare fedelmente i più svariati dispositivi impiantistici: tubi, valvole, raccordi, pompe, eiettori, reattori, separatori di vapore, turbine, accumulatori, regioni anulari, pressurizzatori. Le porzioni solide di un sistema interessate da un trasferimento di calore sono invece schematizzate mediante le *heat structure*. Queste possono rappresentare l'involucro di un componente, la parete di separazione tra due fluidi, o anche sorgenti o pozzi di calore. È infatti possibile, per esempio, imporre una generazione termica al loro interno e simulare, in questo modo, riscaldatori elettrici o elementi di combustibile nucleare.

Tramite il codice Relap5 sono state dunque simulate le prove sperimentali di tutte e tre le reazioni considerate. Nelle Figg.10a-b-c sono riportati i gli andamenti delle principali grandezze di interesse forniti dai risultati di calcolo e quelli registrati durante le simulazioni sull'impianto prototipo NICOLE per la prova t1.1 già vista precedentemente, in cui si ha l'inversione del *runaway* con cinetica di ordine $n=1$ associato alla reazione di produzione dell'idroperossido di cumene.

CONCLUSIONI

Il Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia dell'Università di Roma "La Sapienza" ha realizzato l'impianto sperimentale NICOLE (Naturally Induced Circulation cooling Loop for Emergency), per lo studio termoidraulico di un sistema passivo di asportazione del calore in situazioni di emergenza, quali quelle che possono potenzialmente verificarsi in reattori chimici a causa di *runaway reactions*. L'impianto sperimentale, quasi in piena scala relativamente alle reazioni chimiche simulate (fattore di scaling pari a circa 0.85), è costituito essenzialmente da un generatore di calore ad olio diatermico, con una potenza di 35 kW, da un circuito a circolazione naturale che si sviluppa per un'altezza di circa 8 m e da una piscina con le funzioni di pozzo termico, avente una capacità massima di circa 3 m³ di acqua.

Sono state effettuate 27 prove sperimentali complete (ciascuna con una durata variabile da 3 ore a 10 ore) variando, oltre al tipo di reazione chimica e alla sua cinetica, anche la temperatura iniziale e la massa d'acqua contenuta in piscina, il numero di tubi dello scambiatore in piscina e le perdite di carico nel circuito tramite un'apposita valvola di regolazione.

Le analisi di simulazione e le numerose prove sperimentali effettuate hanno dimostrato come il sistema di sicurezza proposto sia in grado di far fronte con successo a incidenti caratterizzati da tempistiche molto differenti, da pochi minuti a diverse ore, nonché da temperature nel recipiente di processo sia superiori che inferiori a quella di saturazione in piscina, ossia a 100 °C. L'estrema versatilità del sistema è dovuta alla sua modesta inerzia termica e alla possibilità di adattare sensibilmente le sue prestazioni alle diverse tipologie di evento incidentale, variando i suoi principali parametri funzionali: la superficie di scambio termico in piscina, la capacità termica del refrigerante secondario, lo sviluppo verticale del sistema.

NOMENCLATURA

Γ	[kg/s]	Portata massica del CRSP.
C_{reagenti}	[mol/l]	Concentrazione dei reagenti.
T_{nom}	[°C]	Temperatura nominale della particolare reazione di <i>runaway</i> considerata.
T_{olio}	[°C]	Temperatura media dell'olio diatermico nel GC.
$T_{\text{in GC}}$	[°C]	Temperatura acqua CRSP in ingresso al GC.
$T_{\text{out GC}}$	[°C]	Temperatura acqua CRSP in uscita dal GC.
$T_{\text{in P}}$	[°C]	Temperatura acqua CRSP in ingresso allo scambiatore in piscina.
$T_{\text{out P}}$	[°C]	Temperatura acqua CRSP in uscita dallo scambiatore in piscina.
T_{P}	[°C]	Temperatura acqua in piscina.
ΔT_{GC}	[°C]	$\Delta T_{\text{GC}} = T_{\text{out GC}} - T_{\text{in GC}}$ Incremento di temperatura subito dall'acqua del CRSP nel passaggio attraverso i fasci tubieri nel GC.
ΔT_{P}	[°C]	$\Delta T_{\text{P}} = T_{\text{in P}} - T_{\text{out P}}$ Diminuzione di temperatura subito dall'acqua del CRSP nel passaggio attraverso il fascio tubiero dello scambiatore in piscina.
$P_{\text{g GC}}$	[W]	Potenza generata nel GC.
$P_{\text{a GC}}$	[W]	Potenza asportata dal GC.
P_{P}	[W]	Potenza ceduta in piscina dallo scambiatore di calore.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J.A. Barton, P.F. Nolan-Inst.Chem.Eng.Symp.Series, 1984, 85, 17.
- [2] G. Caruso, A. Naviglio, R. Andreozzi., R. Sanchirico, E. Bonzano, G:Locatelli, *Un Sistema Di Emergenza Passivo Per L'asportazione Del Calore In Caso Di Runaway Reactions* - Convegno VGR 2002 - Pisa, 15-17 Ottobre 2002
- [3] AA. VV. *Sistema passivo di asportazione della potenza termica generata da reazioni di runaway - Studio preliminare: individuazione settori applicativi*. CNR-IRC Napoli, 2002
- [4] G. Caruso, A. Naviglio, G. Minervini, *Analisi delle prestazioni di un sistema passivo di asportazione del calore tramite il codice RELAP 5*. - XXII Convegno Nazionale UIT - Genova, giugno 2004
- [5] AA.VV. RELAP 5 Mod. 3.2 Code Manual - NUREG/CR 5535, 1995