



Ricerca di Sistema elettrico

Studio teorico-sperimentale di un SPND commerciale per applicazioni a reattori raffreddati al piombo

L. Lepore, R. Remetti - CIRTEN: CERSE-UNIROMA1



STUDIO TEORICO-SPERIMENTALE DI UN SPND COMMERCIALE PER APPLICAZIONI A REATTORI RAFFREDDATI
AL PIOMBO

L. Lepore, R. Remetti - CIRTEN: CERSE-UNIROMA1

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione

Obiettivo: Collaborazione nei programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione

Responsabile del Progetto: Mariano Tarantino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione

Responsabile scientifico ENEA: Mariano Tarantino, ENEA

Responsabile scientifico CIRTEN: Giuseppe Forasassi, CIRTEN

Titolo
Studio teorico-sperimentale di un SPND commerciale per applicazioni a reattori raffreddati al piombo
Ente emittente Università di Roma 1 "Sapienza" (CIRTEN)

PAGINA DI GUARDIA

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione
Argomenti trattati: Generation IV reactors
 Reattori di ricerca
 Neutronica

Sommario

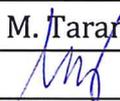
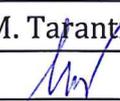
Il presente lavoro ha come obiettivo lo studio delle tematiche relative alla strumentazione neutronica di monitoraggio dei reattori LFR (Lead Fast Reactor), evidenziando criticità della strumentazione commercialmente disponibile e proponendo miglioramenti e soluzioni innovative al fine di ottimizzare l'efficacia e l'adeguatezza delle tecnologie di rivelazione. Tale studio deve necessariamente affiancare la fase di progetto del reattore cosicché la strumentazione prevista possa essere efficacemente integrata con le soluzioni progettuali previste. Il reattore dimostrativo ALFRED, preso come riferimento, è stato completato in ogni sua parte, consentendo un calcolo più verosimile di spettri neutronici e gamma nelle posizioni d'interesse per l'installazione degli strumenti. La strumentazione commercialmente disponibile (camere a fissione e SPND) si è dimostrata non completamente adeguata alle esigenze di monitoraggio del reattore studiato, evidenziando la necessità di studiare soluzioni progettuali innovative che siano corredate anche da esperienze sperimentali in flussi neutronici veloci. Si è fornita una concettualizzazione delle innovazioni applicabili alla strumentazione di tipo SPND a risposta pronta, delineando disegni innovativi che saranno approfonditamente studiati nel prosieguo del lavoro. La disponibilità del reattore TAPIRO di ENEA Casaccia può consentire lo studio delle principali caratteristiche di prestazione degli strumenti commerciali ed innovativi, consentendo di acquisire una preziosa esperienza sperimentale.

Note

 Riferimento CIRTEN: **CERSE-UNIROMA1 RL 1604-2015**
Autori:

Luigi Lepore, Romolo Remetti

Copia n.
In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	25/09/15	NOME	M. Tarantino		M. Tarantino
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		CONVALIDA	VISTO	APPROVAZIONE



CIRTEN

Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare

SAPIENZA

UNIVERSITÀ DI ROMA

**Verifica di fattibilità di sonde commerciali per la misura
dei flussi neutronici in reattori raffreddati al piombo.
Proposta di studio teorico-sperimentale di SPND
innovativi ottimizzati per reattori LFR.**

Autori

Luigi Lepore

Romolo Remetti

CERSE-UNIROMA1 RL 1604-2015

Roma, settembre 2015

Lavoro svolto in esecuzione dell'Attività LP2.A2_c AdP MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico -
Piano Annuale di Realizzazione 2014

Progetto B.3.7 "Verifica di fattibilità di sonde commerciali per la misura dei flussi neutronici in reattori
raffreddati al piombo. Proposta di studio teorico-sperimentale di SPND innovativi ottimizzati per reattori
LFR".

Indice

Sommario	3
1. Introduzione	4
2. Il termine sorgente: il reattore dimostrativo ALFRED	4
2.1 Posizioni d'installazione della strumentazione neutronica analizzate	7
2.2 Andamento spaziale del flusso neutronico, variazioni di intensità di flusso e spettro	11
3. Valutazione delle prestazioni della strumentazione commercialmente disponibile	18
3.1 Stima della sensitività delle sonde nelle posizioni d'interesse	19
3.2 Stima della risposta e della durabilità delle sonde nelle posizioni d'interesse	27
4. Simulazione della risposta di un rivelatore SPND tramite MCNPX.....	34
4.1 Modello del rivelatore SPND Thermocoax standard.....	34
4.1.1 <i>Simulazione del SPND Thermocoax Co-type irraggiato con neutroni termici.....</i>	<i>35</i>
4.1.2 <i>Simulazione del SPND Thermocoax Pt-type irraggiato con neutroni termici</i>	<i>38</i>
4.1.3 <i>Simulazione del SPND Thermocoax Rh-type irraggiato con neutroni termici</i>	<i>38</i>
4.1.4 <i>Simulazione del SPND Thermocoax Rh-type irraggiato con neutroni veloci (canale tangenziale del reattore TAPIRO).....</i>	<i>41</i>
5. Proposta di sviluppo futuro di strumentazione dedicata per reattori LFR.....	41
5.1 Proposta di sonde basate sul principio dei SPND	42
6. Concettualizzazione di prove sperimentali presso il reattore TAPIRO	44
6.1 Irraggiamenti effettuabili nel reattore TAPIRO	45
6.2 Concettualizzazione di test sperimentali nel reattore TAPIRO.....	47
7. Conclusioni.....	49
Ringraziamenti.....	50
Bibliografia	51
Workgroup.....	52

Sommario

Il presente lavoro ha come obiettivo lo studio delle tematiche relative alla strumentazione neutronica di monitoraggio dei reattori LFR (Lead Fast Reactor), evidenziando criticità della strumentazione commercialmente disponibile e proponendo miglioramenti e soluzioni innovative al fine di ottimizzare l'efficacia e l'adeguatezza delle tecnologie di rivelazione. Tale studio deve necessariamente affiancare la fase di progetto del reattore cosicché la strumentazione prevista possa essere efficacemente integrata con le soluzioni progettuali previste. Il reattore dimostrativo ALFRED, preso come riferimento, è stato completato in ogni sua parte, consentendo un calcolo più verosimile di spettri neutronici e gamma nelle posizioni d'interesse per l'installazione degli strumenti. La strumentazione commercialmente disponibile (camere a fissione e SPND) si è dimostrata non completamente adeguata alle esigenze di monitoraggio del reattore studiato, evidenziando la necessità di studiare soluzioni progettuali innovative che siano corredate anche da esperienze sperimentali in flussi neutronici veloci. Si è fornita una concettualizzazione delle innovazioni applicabili alla strumentazione di tipo SPND a risposta pronta, delineando disegni innovativi che saranno approfonditamente studiati nel prosieguo del lavoro. La disponibilità del reattore TAPIRO di ENEA Casaccia può consentire lo studio delle principali caratteristiche di prestazione degli strumenti commerciali ed innovativi, consentendo di acquisire una preziosa esperienza sperimentale.

1. Introduzione

Il presente lavoro si pone a proseguimento dei risultati raggiunti nella precedente annualità [1], andando a raffinare e migliorare quanto già studiato nell'attività condotta.

Il tema centrale della trattazione riguarda l'ottimizzazione della strumentazione neutronica per il monitoraggio di flussi neutronici veloci in ambienti ostili per la tecnologia, in cui i fattori limitanti per i rivelatori risultano essere l'alta temperatura (mediamente 500 °C) e un alto rateo di dose gamma.

Lo strumento di lavoro principale è la simulazione Monte Carlo, qui realizzata per mezzo dei codici MCNPX e FLUKA.

Particolare attenzione è rivolta agli aspetti di monitoraggio neutronico dei reattori LFR, il cui riferimento assunto è il reattore dimostrativo ALFRED. Da un'accurata modellizzazione del reattore sono stati ricavati gli spettri neutronici e i flussi integrati in energia nei punti in cui si suppone dovrà essere installata la strumentazione di monitoraggio e controllo del reattore, con particolare riferimento alle esigenze di studio "neutronico" di tale innovativa tipologia reattoristica. Nelle posizioni individuate sono state studiate le prestazioni dei rivelatori utilizzabili, mostrandone applicabilità e limiti.

Gli alti ratei di flusso neutronico del livello di potenza nominale del reattore ALFRED (300 MW_{th}) e le elevate sensibilità delle camere a fissione non consentono a tale strumentazione di poter operare oltre 6-12 mesi in tale ambiente; i rivelatori di tipo SPND si dimostrano essere più appropriati in termini di affidabilità e durabilità nel tempo, sebbene vadano verificate le loro prestazioni, vista l'esiguità dei segnali elettrici prodotti, anche alla potenza nominale del reattore.

Nell'ottica di sviluppare quest'ultimo tipo di tecnologia, si è validata la simulazione Monte Carlo per strumentazione SPND in monitoraggio di flussi neutronici veloci attraverso prove già svolte nel reattore TAPIRO nell'ambito di progetti di ricerca sulla fusione [2], identificando uno strumento di calcolo che consenta, ora, di poter ottimizzare e ri-progettare al computer tali rivelatori, migliorandone prestazioni, ottimizzandone caratteristiche e durata nel tempo.

Nel prossimo futuro, un SPND prototipo potrà esser costruito e testato presso il reattore TAPIRO di ENEA Casaccia, verificando l'effettiva possibilità tecnica per tale strumentazione di monitorare flussi neutronici veloci.

2. Il termine sorgente: il reattore dimostrativo ALFRED

Il modello del reattore ALFRED, già precedentemente realizzato in MCNPX ver. 2.7.0 ad un elevato livello di dettaglio, è stato completato introducendo anche i generatori di vapore, le strutture più vicine al nocciolo che hanno potenziale capacità di modificare lo spettro del flusso neutronico, evento peraltro confermato dai calcoli effettuati. I dati necessari alla modellizzazione del reattore si basano su un modello analogo a quello sviluppato all'interno del Progetto LEADER[3][4].

Gli spettri che saranno di seguito riportati, si ritiene -quindi- che siano maggiormente rappresentativi, rispetto a quanto ricavato in precedenza.

L'accesso alle risorse di calcolo dei cluster ENEA CRESCO4 è stato di fondamentale importanza per le simulazioni riguardanti la geometria del reattore. Estrarre dalla simulazione degli spettri neutronici con sufficiente significatività statistica ha richiesto tempi di calcolo molto elevati (nell'ordine di 300000 h*core), motivo per cui nei lavori precedenti non era stato possibile ricavare tali informazioni. La Figura 2 mostra lo spaccato del reattore dentro MCNPX: il Visual Editor del codice non è capace di mostrare la compressa geometria dell'intero modello, visto che l'introduzione dei generatori di vapore ha portato la lunghezza dell'input a circa 50000 righe di testo, il 1000% in più rispetto al modello precedente.

La simulazione della reazione di fissione a catena attraverso la routine 'kcode' del codice richiede che il reattore sia critico per poter esser confidenti circa i risultati che possono essere estratti attraverso le tally. La necessità di ottenere $k_{eff}=1$ ha comportato nella simulazione la ricerca della configurazione critica attraverso la movimentazione delle barre di controllo. Essendo le SafetyRods (SRs) a progetto sempre estratte in funzionamento normale del reattore, il controllo fine della criticità è affidato a sistema di Control Rods (CRs); la quota nominale individuata per l'interfaccia $B_4C/(ZrO_2-Y_2O_3)$ delle CRs è 18,75 cm al di sotto della quota superiore dell'altezza attiva del nocciolo, come mostrato in Figura 3.

Al fine di ottenere dei risultati *reali* in termini di flussi neutronici, ratei di reazione, ecc., si è inoltre proceduto a normalizzare il modello alla potenza nominale del reattore (300 MW_{th}). Il fattore normalizzante calcolato è stato ottenuto attraverso una simulazione da cui sono stati estratti i valori di ν e k_{eff} riportati in Tabella 1; con la composizione del combustibile e i valori medi dei Q-valori di reazione, si hanno tutti i dati calcolare il fattore di normalizzazione attraverso l'equazione (1)

Q-valore di reazione di fissione mediato [MeV]	P [MW]	ν [resa media neutroni di fissione]	k_{eff} [-]
183.078	300	2.92418	0.99843

Tabella 1 - Coefficienti utilizzati per il calcolo del fattore di normalizzazione.

$$C = \frac{P \cdot \bar{\nu}}{k_{eff} \cdot \bar{E}_{fiss}} = 2.99545 \cdot 10^{19} \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

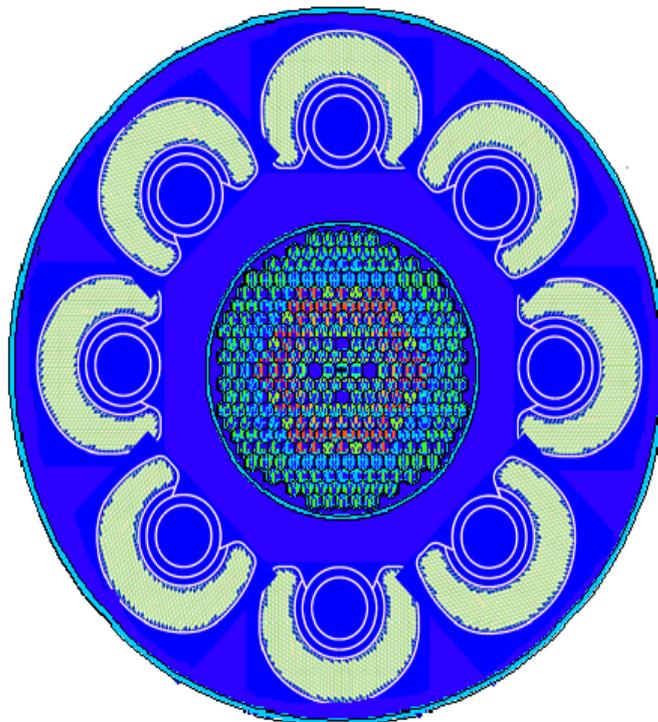


Figura 1 - Vista in pianta del nocciolo del reattore ALFRED e dei generatori di vapore.

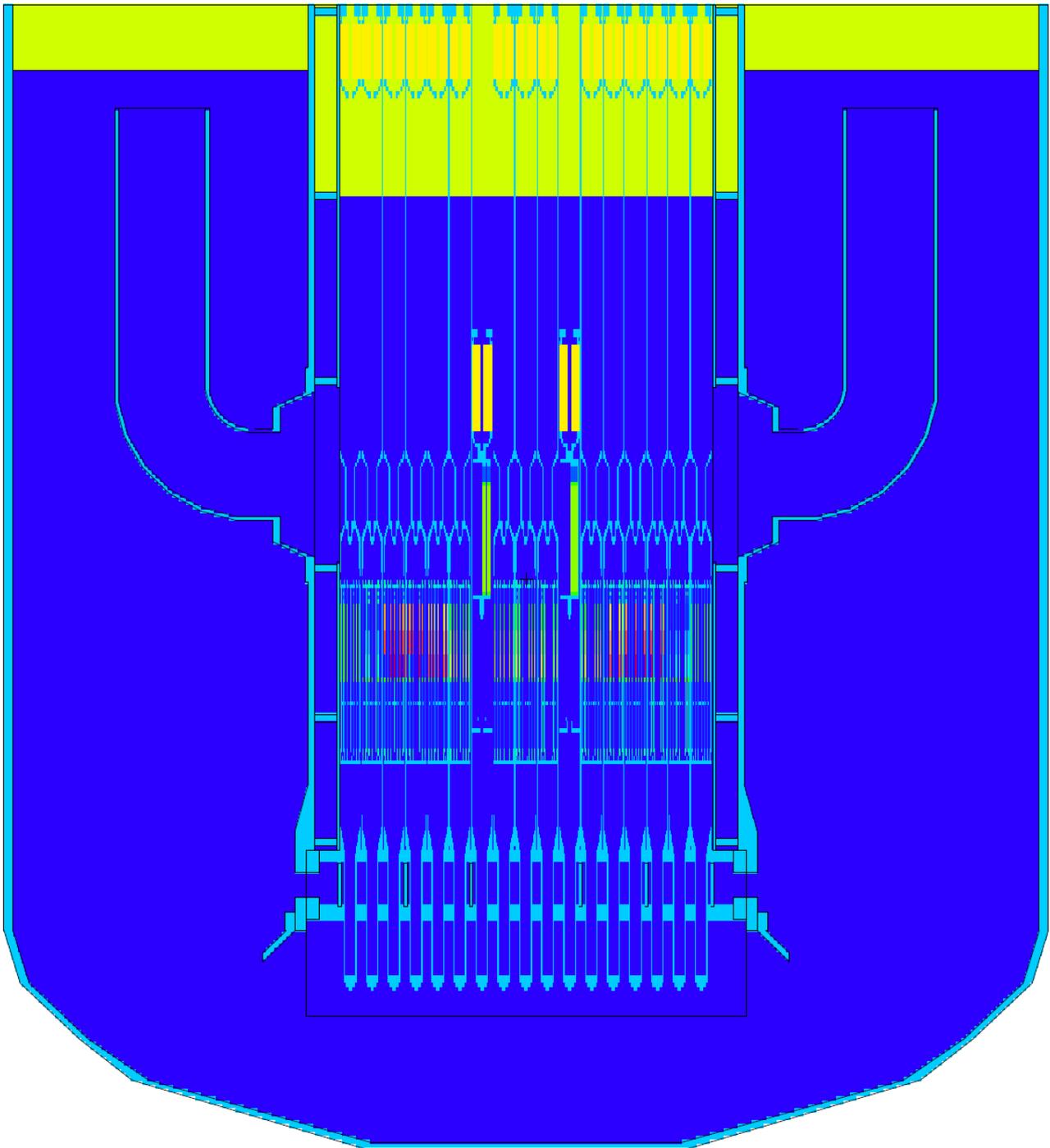


Figura 2 – Vista in sezione del reattore LFR dimostrativo Alfred, all'interno del codice MCNPX (piano xz).

Tale fattore è stato inserito come moltiplicativo per le tally di MCNPX al fine di ottenere un valore di flusso neutronico *'assoluto'* nel senso che sia un valore compatibile con gli ordini di grandezza che si verificherebbero nella realtà.

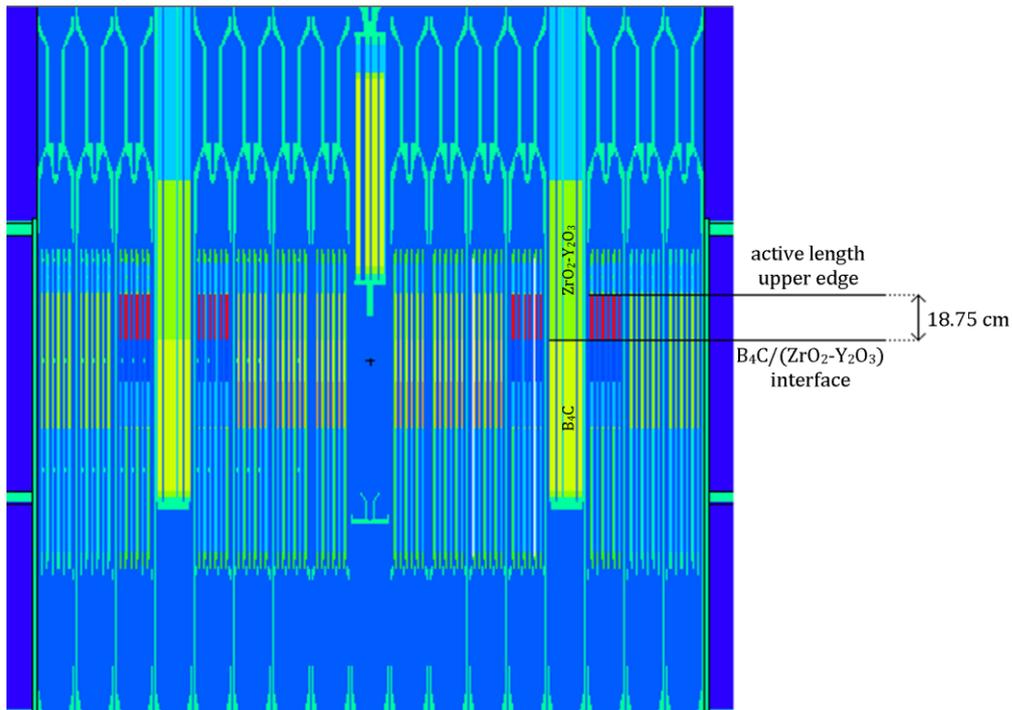


Figura 3 - Posizione delle CRs in configurazione critica nel modello più aggiornato del reattore ALFRED.

Il flusso neutronico è stato qui valutato, sia in termini spettrali che integrato in energia, solo nelle posizioni d'interesse per l'installazione della strumentazione *in-core*. È teoricamente possibile lo studio di qualsiasi altro punto, anche nelle strutture *ex-core*, ma in questa sede si è preferito concentrarsi sulla strumentazione in prossimità del nocciolo, essendo questo tipo d'installazione più critica.

Di seguito si descrive dapprima i punti in cui si è valutato il flusso neutronico e, successivamente, si riportano gli spettri calcolati.

2.1 Posizioni d'installazione della strumentazione neutronica analizzate

La scelta di posizionamento della strumentazione neutronica deve seguire le necessità di investigazione e rilevamento richieste dalle esigenze di studio neutronico del reattore. Le dinamiche neutroniche dei reattori LFR non beneficiano di una larga esperienza sperimentale come per i SFR: ne segue che studi approfonditi sulla cinetica neutronica compensati con la pratica sperimentale sono auspicabili. A tal proposito è opportuno provvedere a disporre la strumentazione dentro e fuori il nocciolo in posizioni opportune.

Nell'esperienza sperimentale dei reattori SuperPhénix (SPX), diverse "guide di neutroni" erano previste per la mappatura del nocciolo, sia come strumentazione di misura vera e propria che canali sperimentali *in-core* per l'introduzione di sonde di attivazione per misure assolute di flusso [5].

Il reattore SPX1 era inizialmente provvisto di sola strumentazione *ex-core*, composta da rivelatori ad ^3He e camere a fissione disposte al di fuori del vessel, sotto la tanca reattore e sui lati. Dalle prime prove di avviamento del reattore apparve evidente la difficoltà nel monitoraggio del reattore allo shutdown, poiché il sistema non riusciva a "contare" quanto previsto a progetto. Per superare il problema, un secondo sistema di monitoraggio neutronico fu introdotto all'interno del vessel al fine di:

1. monitorare il caricamento del combustibile (alla prima carica) dai primi 7 elementi in poi;
2. monitorare il movimento delle barre di controllo allo shutdown;

3. monitorare la reattività durante i test di start-up a potenza zero e calcolare il “peso” delle barre di controllo;
4. fornire il reattore di un ulteriore sistema di strumentazione per il monitoraggio della potenza nominale.

Tale sistema si componeva essenzialmente di camere a fissione, essendo queste l'unica strumentazione utilizzabile nel campo termico del sodio refrigerante. Esso consentì anche la qualificazione della strumentazione ex-core, la cui risposta si supponeva essere funzione anche delle temperature del sodio refrigerante interposto tra il nocciolo del reattore e la posizione in cui era piazzata la strumentazione.

In SPX2, invece, un'intera traversa radiale di reattore era riservata all'introduzione di dispositivi di misura, come mostrato in Figura 5.

Ulteriori dettagli circa i dispositivi e le prove realizzate possono trovarsi in [5][6][7].

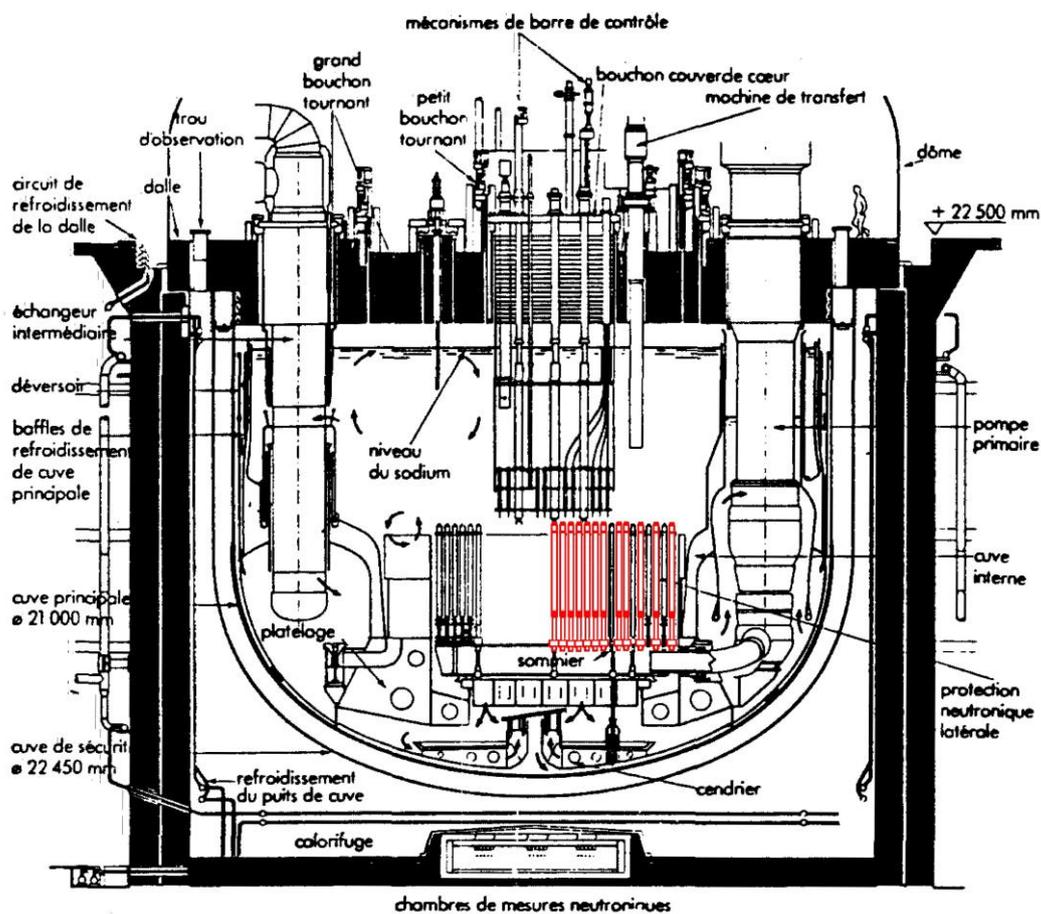


Figura 4 - Spaccato del reattore Super-Phénix 2. In evidenza i canali per l'introduzione della strumentazione in-core.

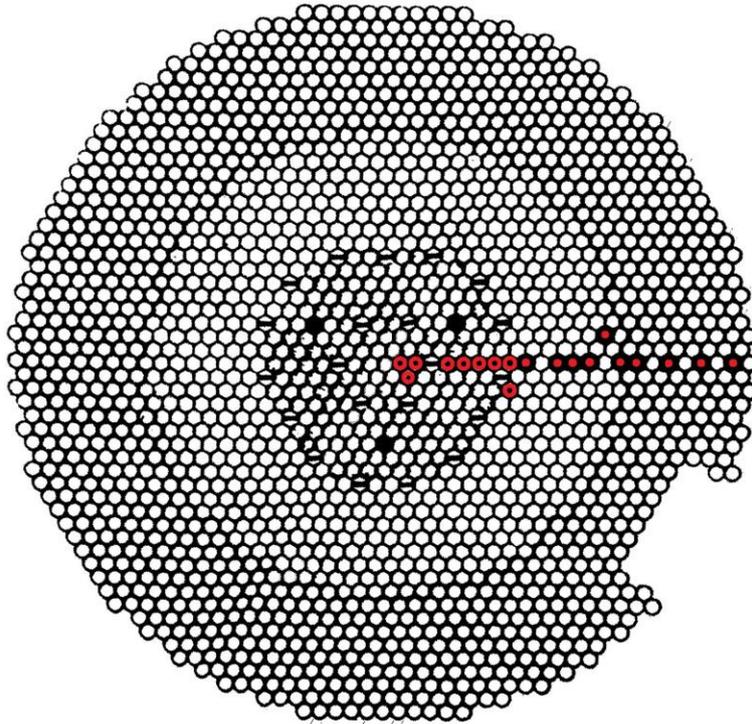


Figura 5 - Configurazione sperimentale della traversa radiale di misura del reattore SPX2: in rosso i diversi canali di introduzione delle sonde.

Dalla letteratura, appare evidente la necessità di un monitoraggio del reattore veloce non solo a distanza, ma anche “più da vicino”. Potrebbero identificarsi due categorie di rivelatori:

- **RIVELATORI DI POTENZA:** posizionati al di fuori del vessel, al di sotto e a lato della tanca reattore, per il monitoraggio del reattore alla potenza nominale. Può trattarsi di rivelatori a gas di qualsiasi tipo, al ^{10}B , ^3He o camere a fissione, non essendoci vincoli sulla temperatura dell’ambiente di installazione: eventualmente tali rivelatori potrebbero anche esser raffreddati se i canali di posizionamento dovessero risultare troppo “caldi”.
- **RIVELATORI DI FISICA:** installati all’interno del vessel, alcuni in-core ed altri ex-core, a seconda delle peculiari necessità e della conformazione del reattore. Trattandosi di ambienti ad alta temperatura è necessario utilizzare camere a fissione o SPND, capaci di resistere ai 400-500 °C tipici dei reattori veloci.

Entrambe le categorie di rivelatori cooperano al monitoraggio in sicurezza del reattore, compensandosi a vicenda, visto che il primo sistema è più adeguato a condizioni di alto flusso neutronico mentre il secondo è più adatto al monitoraggio delle condizioni di basso flusso.

Inspirandosi alla configurazione di analisi neutronica del reattore SPX2, ma essendo ALFRED un dimostrativo a potenza ridotta rispetto alle taglie commerciali dei reattori SPX, un’intera traversa di misura potrebbe risultare “eccessiva” e perturbare in maniera non accettabile l’economia neutronica del reattore.

Per tale motivo, ma senza presumere di poter esaurire qui la scelta ottimale del posizionamento della strumentazione di analisi neutronica del reattore, si è pensato di lasciare l’elemento centrale di reattore come “guida neutronica” per l’introduzione di strumentazione, aggiungendovi -sulla medesima traversa radiale- un’ulteriore “guida neutronica” nel riflettore, immediatamente fuori la parte attiva del nocciolo. Misure intermedie possono essere effettuate attraverso il posizionamento

della strumentazione dei noses degli elementi attivi, quindi al di fuori del nocciolo stesso. La schematizzazione descritta è riportata graficamente in Figura 6.

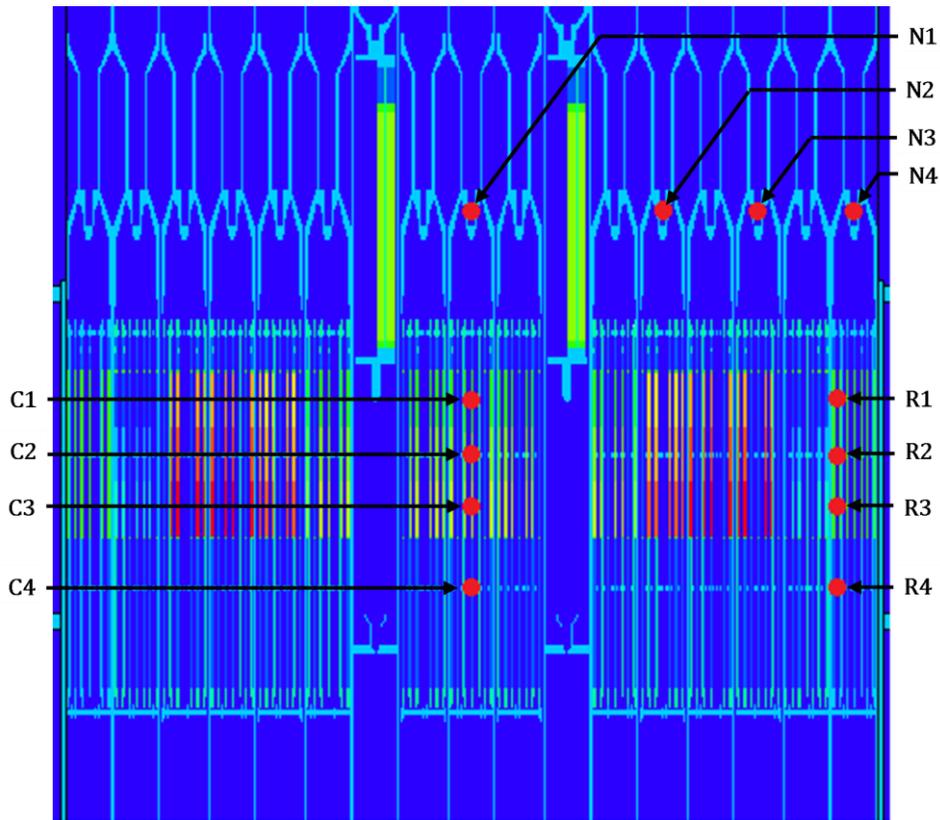


Figura 6 - Posizionamento delle tally spettrometriche nel nocciolo del reattore ALFRED.

	Codifica	Posizione (rispetto al centro di nocciolo, dimensioni in [cm])	Note
Traversa radiale sul piano dei noses	N1	$(x, y, z)=(0; 0; 86)$	out-of-core
	N2	$(x, y, z)=(71.1; 0; 86)$	out-of-core
	N3	$(x, y, z)=(119.7; 0; 86)$	out-of-core
	N4	$(x, y, z)=(168.3; 0; 86)$	out-of-core
Traversa assiale elemento di combustibile centrale	C1	$(x, y, z)=(0; 0; 18)$	in-core
	C2	$(x, y, z)=(0; 0; 0)$	in-core
	C3	$(x, y, z)=(0; 0; -18)$	in-core
	C4	$(x, y, z)=(0; 0; -50)$	out-of-core
Traversa assiale riflettore radiale affacciato al nocciolo	R1	$(x, y, z)=(127; 0; 18)$	out-of-core
	R2	$(x, y, z)=(127; 0; 0)$	out-of-core
	R3	$(x, y, z)=(127; 0; -18)$	out-of-core
	R4	$(x, y, z)=(127; 0; -50)$	out-of-core

Tabella 2 - Elenco e posizionamento delle tally spettrometriche descritte in Figura 6.

Nelle dette posizioni è stato analizzato il flusso neutronico locale in termini di valore numerico della popolazione ivi presente e la distribuzione spettrale. Inoltre, nelle stesse posizioni sono state calcolate le sezioni d'urto aggiornate dei materiali sensibili delle sonde di misura utilizzabili ed è stato valutato

il fondo gamma di reattore, al fine di determinare quanto sia elevata questa componente di disturbo alla strumentazione di monitoraggio neutronico.

Di seguito saranno presentati i detti risultati.

2.2 Andamento spaziale del flusso neutronico, variazioni di intensità di flusso e spettro

La disponibilità dei cluster CRESCO4 di ENEA ha consentito l'elaborazione degli spettri neutronici nelle posizioni dichiarate in Figura 6, altrimenti incalcolabili data l'enorme complessità del modello MCNPX del reattore.

La scelta della discretizzazione energetica dello spettro neutronico è stata di fondamentale importanza al fine dell'ottenimento di risultati significativi in tempi ragionevoli. La struttura energetica per la formazione dello spettro utilizza 49 gruppi, come specificato in Tabella 4. Con tale struttura e le 12 tally spettrometriche nelle posizioni dichiarate in Figura 6, il tempo necessario a ricavare degli spettri con errori sufficientemente bassi è stato nell'ordine di 300000 h*core, equivalenti a circa un mese di calcolo ininterrotto su 496 processori in parallelo. Avendo a disposizione un limitato tempo macchina sul sistema CRESCO4, tale risultato è stato raggiunto in circa 2,5 mesi di tempo reale, considerando le attese in coda ed alcuni fermi macchina.

Il risultato complessivo del calcolo effettuato è il seguente

Tempo di calcolo [h*core]	300'000
nps (storie elaborate)	200'000'000
k_{eff}	0.99843±0.00004
Flusso neutronico in N1 [n/(cm ² s)]	2.47E+14 (±1%)
Flusso neutronico in N2 [n/(cm ² s)]	1.47E+15 (±1%)
Flusso neutronico in N3 [n/(cm ² s)]	2.88E+14 (±1%)
Flusso neutronico in N4 [n/(cm ² s)]	1.33E+14 (±2%)
Flusso neutronico in C1 [n/(cm ² s)]	3.10E+15 (±0.3%)
Flusso neutronico in C2 [n/(cm ² s)]	3.71E+15 (±0.3%)
Flusso neutronico in C3 [n/(cm ² s)]	3.21E+15 (±0.4%)
Flusso neutronico in C4 [n/(cm ² s)]	2.88E+14 (±1%)
Flusso neutronico in R1 [n/(cm ² s)]	7.00E+14 (±0.8%)
Flusso neutronico in R2 [n/(cm ² s)]	7.55E+14 (±1%)
Flusso neutronico in R3 [n/(cm ² s)]	6.15E+14 (±1%)
Flusso neutronico in R4 [n/(cm ² s)]	2.73E+14 (±0.8%)

Tabella 3 - Risultati del calcolo degli spettri neutronici del reattore ALFRED nelle posizioni d'interesse.

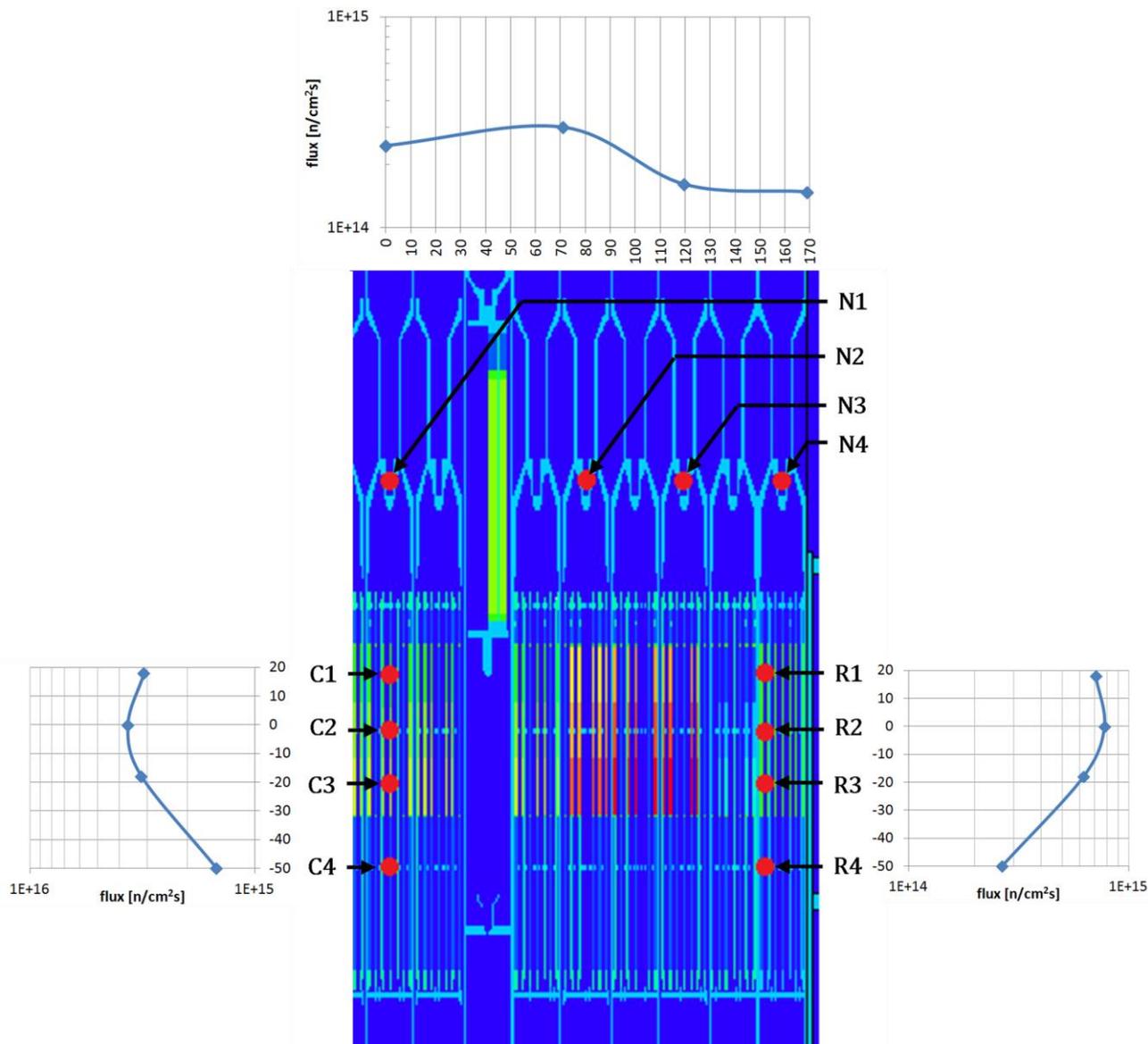


Figura 7 - Profili di flusso neutronico nelle traverse analizzate, in corrispondenza della potenza nominale di $300 \text{ MW}_{\text{th}}$.

La Figura 7 mostra gli andamenti dei profili di flusso neutronico sulle traverse assiali (C, centro nocciolo; R, elemento riflettore) e la traversa radiale (N, piano dei noses) analizzate. In merito alle traverse assiali, gli andamenti dei profili di flusso sono quelli attesi, con i massimi in corrispondenza del piano mediano di nocciolo. Per quanto riguarda la traversa radiale sul piano dei noses, accanto alla naturale discesa del flusso neutronico allontanandosi dal centro nocciolo e andando verso la periferia, si nota un minimo al centro nocciolo dovuto alla presenza delle SAFETY RODs che creano una depressione nel flusso neutronico al centro del piano, come già riscontrato nel rapporto precedente [1].

group	Lower Energy [MeV]	Upper Energy [MeV]
-------	--------------------	--------------------

1	1.000E+01	1.964E+01
2	6.065E+00	1.000E+01
3	3.679E+00	6.065E+00
4	2.231E+00	3.679E+00
5	1.353E+00	2.231E+00
6	8.209E-01	1.353E+00
7	4.979E-01	8.209E-01
8	3.020E-01	4.979E-01
9	1.832E-01	3.020E-01
10	1.111E-01	1.832E-01
11	6.738E-02	1.111E-01
12	4.087E-02	6.738E-02
13	2.479E-02	4.087E-02
14	1.503E-02	2.479E-02
15	9.119E-03	1.503E-02
16	5.531E-03	9.119E-03
17	3.355E-03	5.531E-03
18	2.035E-03	3.355E-03
19	1.234E-03	2.035E-03
20	7.485E-04	1.234E-03
21	4.540E-04	7.485E-04
22	3.043E-04	4.540E-04
23	1.486E-04	3.043E-04
24	9.166E-05	1.486E-04
25	6.790E-05	9.166E-05
26	4.017E-05	6.790E-05
27	2.260E-05	4.017E-05
28	1.371E-05	2.260E-05
29	8.315E-06	1.371E-05
30	4.000E-06	8.315E-06
31	5.400E-07	4.000E-06
32	1.000E-07	5.400E-07
33	3.355E-03	1.000E-07
34	2.035E-03	3.355E-03
35	1.234E-03	2.035E-03
36	7.485E-04	1.234E-03
37	4.540E-04	7.485E-04
38	3.043E-04	4.540E-04
39	1.486E-04	3.043E-04
40	9.166E-05	1.486E-04
41	6.790E-05	9.166E-05
42	4.017E-05	6.790E-05
43	2.260E-05	4.017E-05
44	1.371E-05	2.260E-05
45	8.315E-06	1.371E-05
46	4.000E-06	8.315E-06
47	5.400E-07	4.000E-06
48	1.000E-07	5.400E-07
49	0.000E+00	1.000E-07

Tabella 4 - Raggruppamento energetico utilizzato per la determinazione dello spettro neutronico nelle posizioni d'interesse.

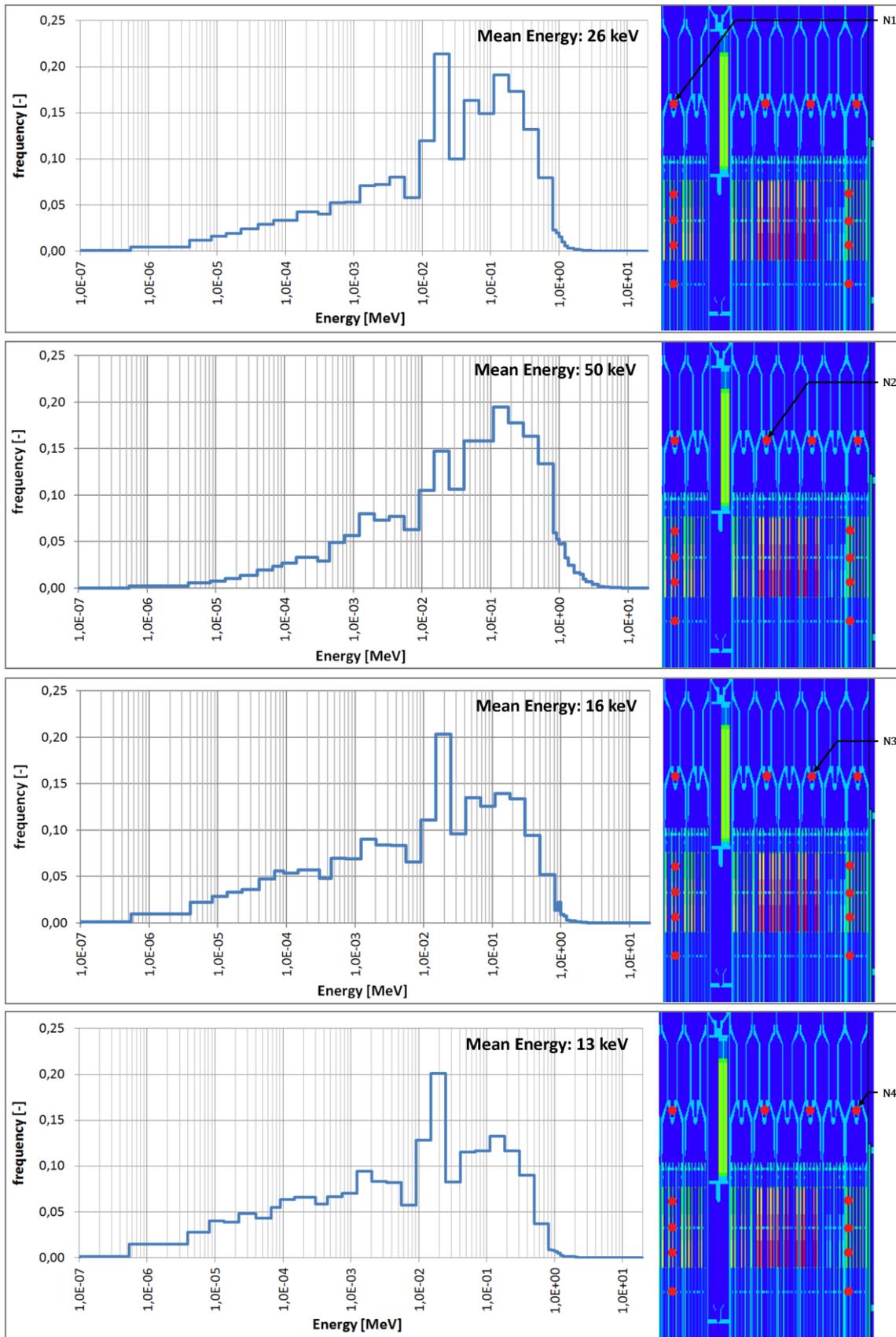


Figura 8 - Spettri neutronici nelle posizioni N1, N2, N3, N4 della traversa radiale sul piano dei noses.

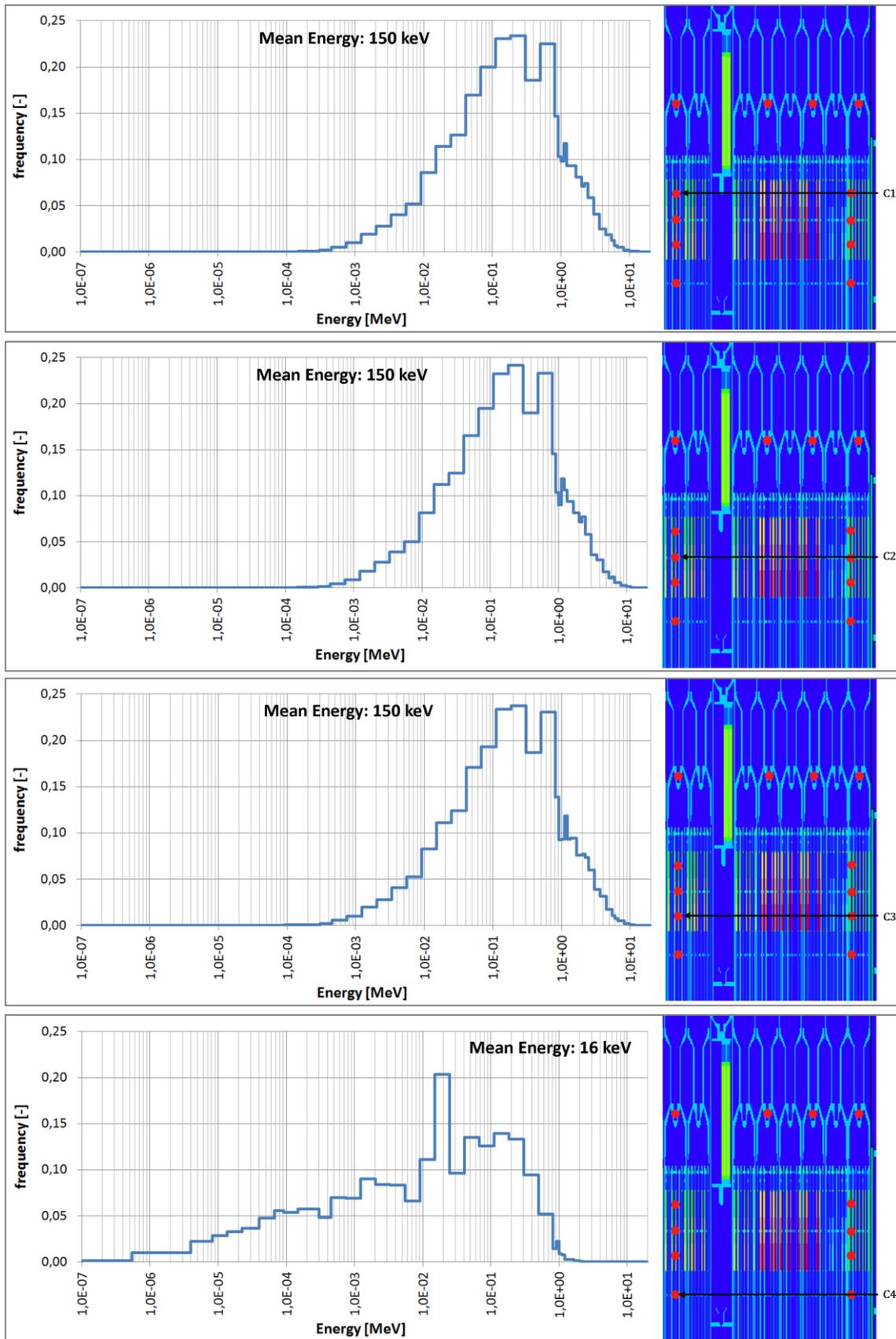


Figura 9 - Spettri neutronici nelle posizioni C1, C2, C3, C4 della traversa assiale in corrispondenza dell'elemento di combustibile centrale.

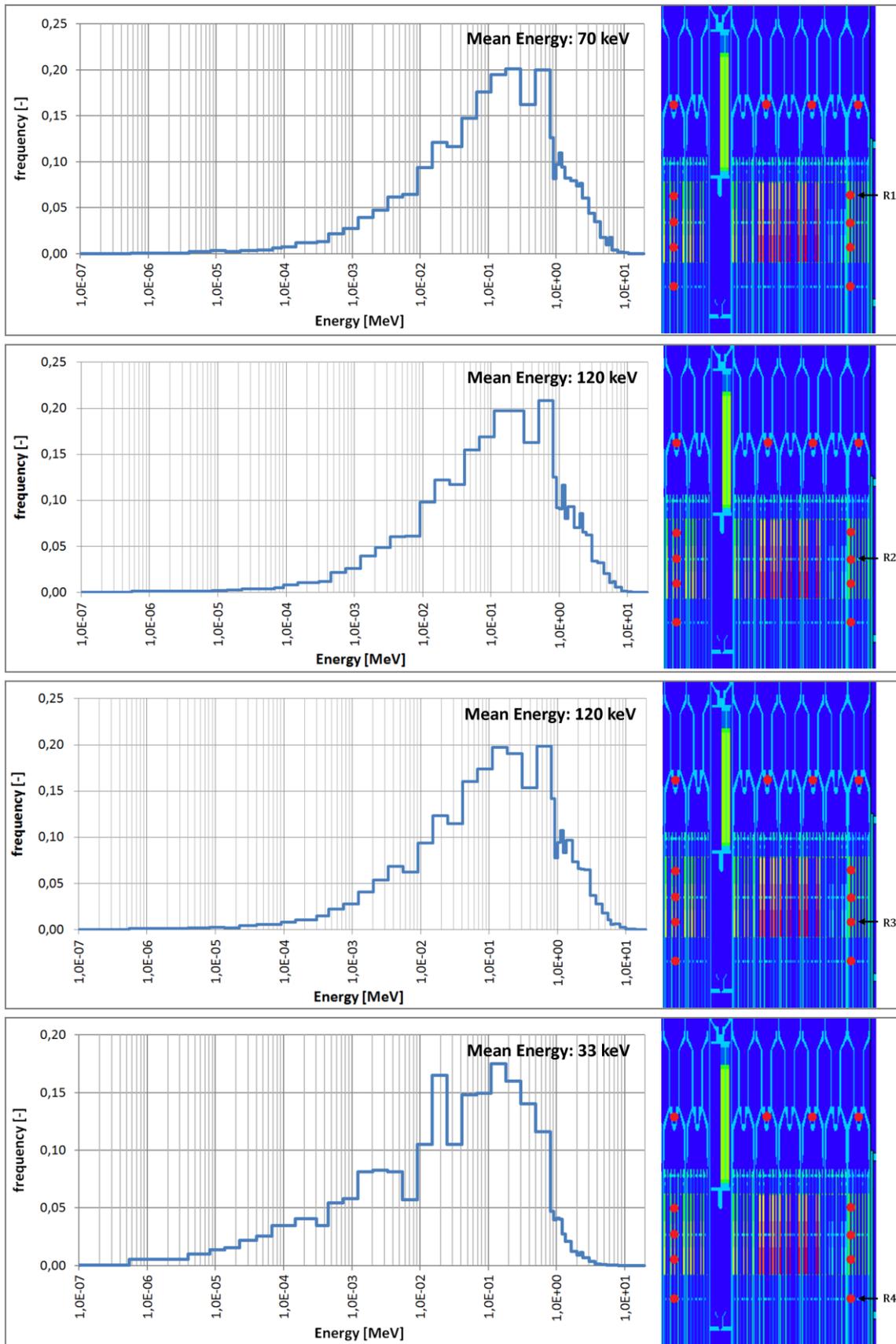


Figura 10 - Spettri neutronici nelle posizioni R1, R2, R3, R4 della traversa assiale in corrispondenza dell'elemento riflettore affacciato al nocciolo.

	Flusso neutronico [n/(cm ² s)]	Energia media [keV]	Percentuale epitermica (<0.1 keV)	Percentuale veloce (>0.1 keV)
N1	2.47E+14 (±1%)	26	9.1%	90.9%
N2	1.47E+15 (±1%)	50	5.6%	94.6%
N3	2.88E+14 (±1%)	16	15.7%	84.3%
N4	1.33E+14 (±2%)	13	18.9%	81.1%
C1	3.10E+15 (±0.3%)	150	0.01%	99.99%
C2	3.71E+15 (±0.3%)	150	0.004%	99.996%
C3	3.21E+15 (±0.4%)	150	0.03%	99.97%
C4	2.88E+14 (±1%)	16	15.7%	84.3%
R1	7.00E+14 (±0.8%)	70	1.6%	98.4%
R2	7.55E+14 (±1%)	120	1.5%	98.5%
R3	6.15E+14 (±1%)	120	1.6%	98.4%
R4	2.73E+14 (±0.8%)	33	8.7%	91.3%

Tabella 5 - Caratteristiche del flusso neutronico calcolato nelle posizioni indicate.

Gli spettri neutronici calcolati nella traversa radiale e ad ingresso nocciolo hanno una coda epitermica (<0.1 keV) non trascurabile. Le posizioni in-core e nel riflettore presentano una popolazione neutronica quasi integralmente veloce.

In merito agli spettri calcolati nelle diverse posizioni delle traverse analizzate possono farsi i seguenti commenti:

- **traversa radiale sul piano dei noses, N:** l'energia media dello spettro non varia significativamente. Si apprezza un massimo relativo in N2 dovuto alla vicinanza delle CONTROL RODS e SAFETY RODS che riducono la componente a più bassa energia, aumentando –quindi– l'energia media dello spettro.
- **traversa assiale nell'elemento di combustibile centrale, C:** l'energia media dello spettro risulta pressoché costante nella parte attiva del nocciolo e si attesta ai valori massimi.
- **traversa assiale nell'elemento riflettore affacciato al nocciolo, R:** l'energia media dello spettro varia significativamente a causa della vicinanza delle CONTROL RODS. Le energie medie più elevate si riscontrano in R2 ed R3, i punti affacciati al materiale assorbitore delle barre di controllo, mentre R1 e R4, essendo più lontani risentono meno del taglio della componente a bassa energia dovuto a tali materiali.

3. Valutazione delle prestazioni della strumentazione commercialmente disponibile

È possibile ora aggiornare le prestazioni della strumentazione commercialmente disponibile e potenzialmente applicabile al reattore ALFRED. Come già anticipato, il principale parametro a sfavore della strumentazione è la temperatura (~500 °C in condizioni operative nominali), che limita la selezione a ben poche possibilità tecnologiche (come tecniche di rivelazione) e commerciali (come prodotti disponibili).

Di seguito si procederà a valutare le prestazioni di tre sole sonde neutroniche tra quelle precedentemente analizzate in [1], rappresentative delle due categorie di sensori potenzialmente utilizzabili.

In particolare, la strumentazione selezionata risulta:

- camera a fissione PHOTONIS CFUE32 (²³⁵U-sensitive);
- self powered neutron detector THERMOCOAX Co-type (⁵⁹Co-sensitive);
- self powered neutron detector THERMOCOAX Pt-type (¹⁹⁵Pt-sensitive).

La strumentazione elencata è pronta, cioè con un tempo di risposta inferiore ai 50 ms, risultando adatta al controllo d'impianto e alle operazioni di sicurezza.

Supplier	Product Code	External diameter [mm]	External length [mm]	Sensitive volume diameter [mm]	Sensitive volume length [mm]
Photonis	CFUE32	7	150	5.5	56
Thermocoax	Co-type	2.5	250	1	200
Thermocoax	Pt-type	2.5	250	1	200

Supplier	Product Code	Neutron Sensitivity (to thermal neutrons)		
		Pulse [cps/nv]	MSV [A ² Hz ⁻¹ /nv]	Current [A/nv]
Photonis	CFUE32	0,001	4·10 ⁻²⁹	1·10 ⁻¹⁶
Thermocoax	Co-type	-	-	1.42·10 ⁻²¹
Thermocoax	Pt-type	-	-	1.8·10 ⁻²¹

Tabella 6 - Caratteristiche della strumentazione neutronica analizzata.

Le caratteristiche di risposta della strumentazione sono state corrette attraverso gli spettri neutronici calcolati attraverso MCNPX presentati nei paragrafi precedenti.

La procedura di correzione è di seguito riportata. Con riferimento all'equazione (2), $\bar{\sigma}_i(\vec{r})$ fornisce informazioni riguardo la sensibilità del rivelatore nella posizione \vec{r} mentre la sua moltiplicazione per il fattore $\varphi(\vec{r})$ fornisce la risposta locale dello strumento, $R(\vec{r})$.

$$R(\vec{r}) \propto \int \sigma_i(E) \varphi(E, \vec{r}) dE = \bar{\sigma}_i(\vec{r}) \int \varphi(E, \vec{r}) dE \quad (2)$$

$$R_{fast}(\vec{r}) \propto \bar{\sigma}_i(\vec{r}) \Big|_{fast} \int p(\vec{r}) \psi(E) \Big|_{fast} dE \quad (3)$$

$$R_{thermal}(\vec{r}) \propto \bar{\sigma}_i(\vec{r}) \Big|_{thermal} \int p(\vec{r}) \psi(E) \Big|_{thermal} dE$$

$$ESCF(\vec{r}) = \frac{\bar{\sigma}_i(\vec{r}) \Big|_{fast}}{\bar{\sigma}_i(\vec{r}) \Big|_{thermal}} \equiv \frac{\bar{\sigma}_i(\vec{r}) \Big|_{fast}}{\bar{\sigma}_i \Big|_{thermal}} \quad (4)$$

$$S(\vec{r})\Big|_{fast} = ESCF(\vec{r}) \cdot S\Big|_{thermal} \quad (5)$$

Attraverso MCNPX sono stati calcolati i valori di $\bar{\sigma}_i(\vec{r})$ nella (2). Variando il fattore di forma $\psi(E)$ del flusso neutronico $\varphi(E, \vec{r}) = p(\vec{r})\psi(E)$, ad esempio considerando uno spettro di neutroni termici, ed uno spettro di neutroni veloci (3), è possibile calcolare le rispettive risposte dello strumento a tali tipi di spettro.

Soffermando l'attenzione sulle sezioni d'urto microscopiche mediate sulle forme energetiche di spettro, $\bar{\sigma}_i(\vec{r})\Big|_{fast}$ e $\bar{\sigma}_i(\vec{r})\Big|_{thermal}$, è possibile calcolare l'Energy Spectrum Correction Factor (4), utile per aggiornare le prestazioni dello strumento (generalmente fornite dalle case costruttrici per i soli neutroni termici, $S\Big|_{thermal}$) alle condizioni in cui si intende effettivamente impiegarlo. Visto che $\bar{\sigma}_i(\vec{r})\Big|_{thermal}$ si riferisce ai test con neutroni termici nelle condizioni di fabbrica, nella (4) essa si trasforma in $\bar{\sigma}_i\Big|_{thermal}$. Tale valore è stato calcolato attraverso MCNPX utilizzando una distribuzione energetica dei neutroni di tipo Maxwell-Boltzmann, con $T=293K$. Per gli spettri veloci, i valori di $\bar{\sigma}_i(\vec{r})\Big|_{fast}$ sono stati calcolati in tutte le posizioni di potenziale installazione della strumentazione (cfr. Figura 6). Nelle medesime posizioni sono stati calcolati i fattori di correzione $ESCF(\vec{r})$ utilizzati nella (5) per calcolare le sensibilità aggiornate $S(\vec{r})\Big|_{fast}$ nelle posizioni d'interesse.

3.1 Stima della sensibilità delle sonde nelle posizioni d'interesse

La procedura descritta è stata applicata ai materiali sensibili delle tre sonde analizzate, restituendo i risultati presentati nelle figure successive:

- Figura 11: Sensibilità della camera a fissione PHOTONIS CFUE32 (pulse mode) in funzione della posizione d'installazione in ALFRED.
- Figura 12: Sensibilità della camera a fissione PHOTONIS CFUE32 (MSV mode) in funzione della posizione d'installazione in ALFRED.
- Figura 13: Sensibilità della camera a fissione PHOTONIS CFUE32 (current mode) in funzione della posizione d'installazione in ALFRED.
- Figura 14: Sensibilità del SPND THERMOCOAX Co-type (current mode) in funzione della posizione d'installazione in ALFRED.
- Figura 15: Sensibilità del SPND THERMOCOAX Pt-type (current mode) in funzione della posizione d'installazione in ALFRED.

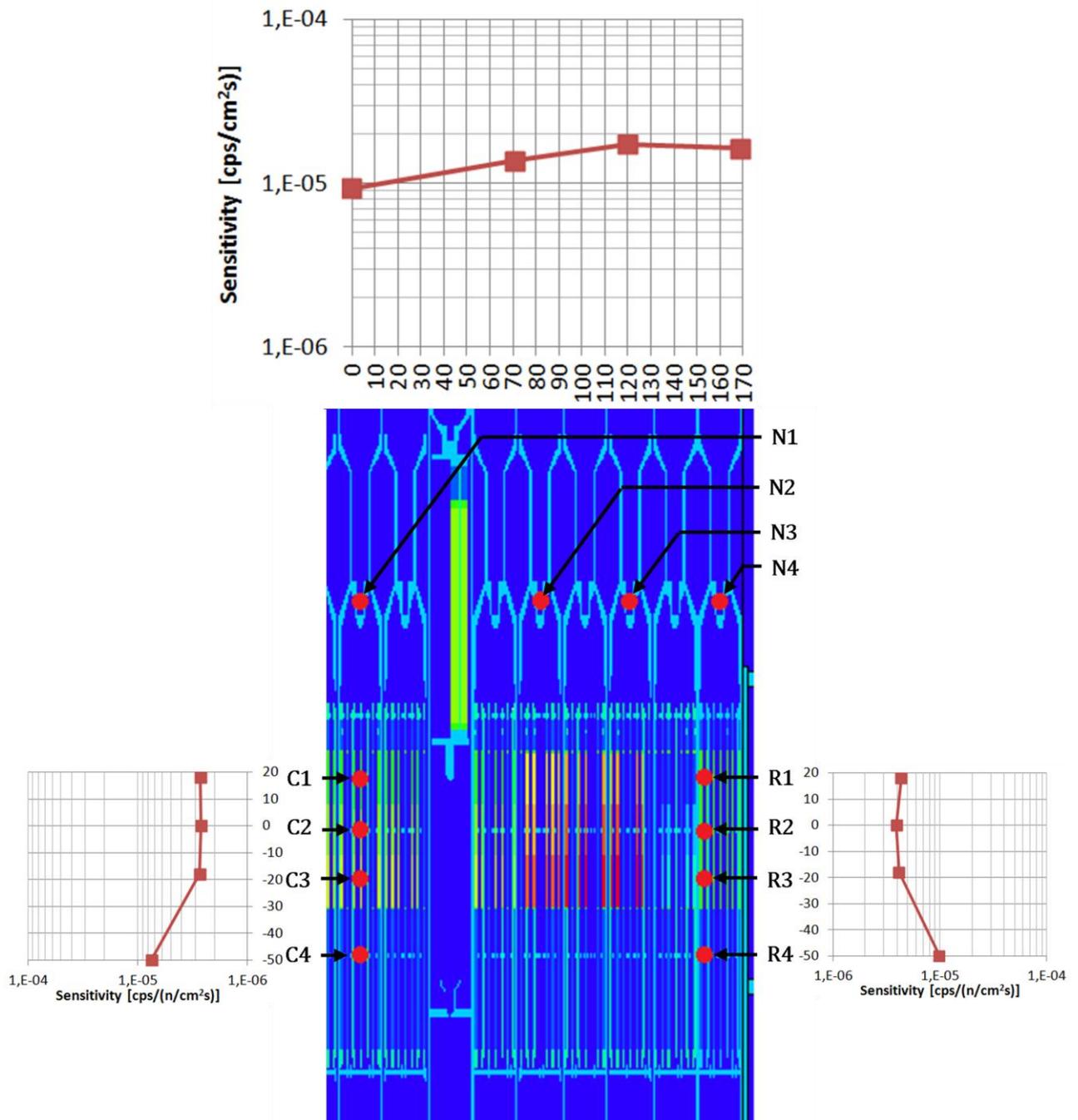


Figura 11 – Sensibilità della camera a fissione PHOTONIS CFUE32 (pulse mode) in funzione della posizione d'installazione in ALFRED.

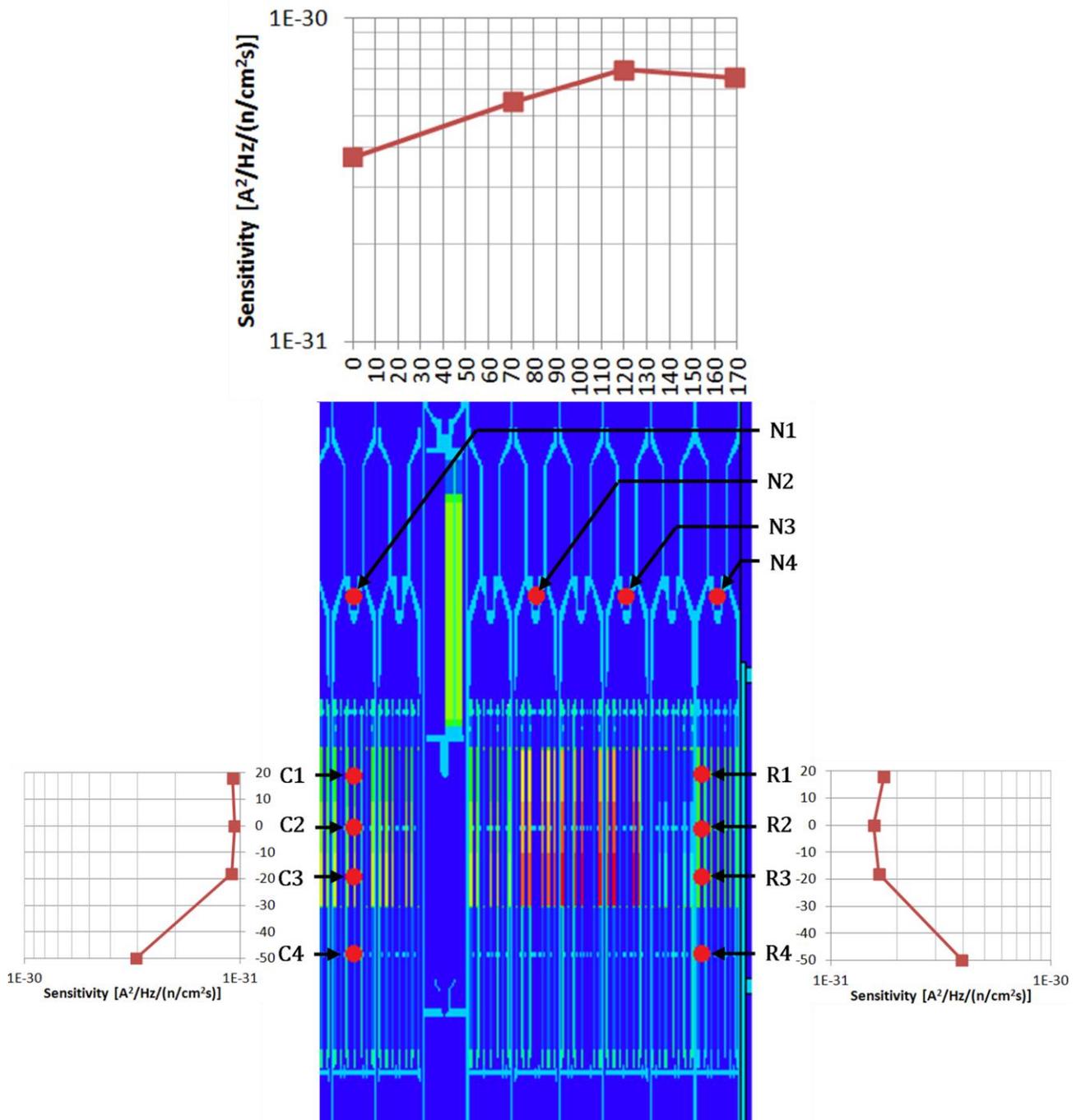


Figura 12 – Sensività della camera a fissione PHOTONIS CFUE32 (MSV mode) in funzione della posizione d'installazione in ALFRED.

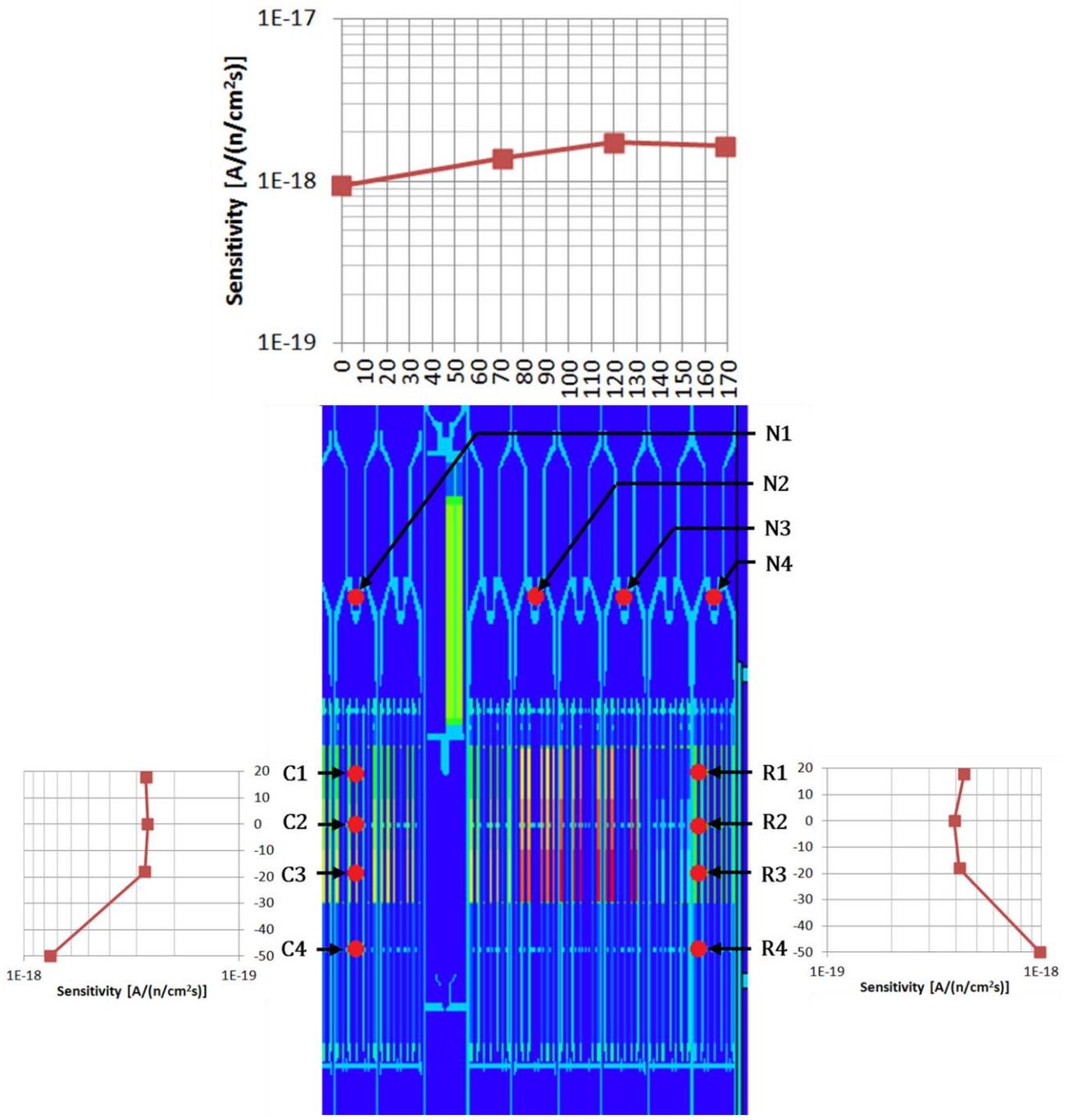


Figura 13 - Sensibilità della camera a fissione PHOTONIS CFUE32 (current mode) in funzione della posizione d'installazione in ALFRED.

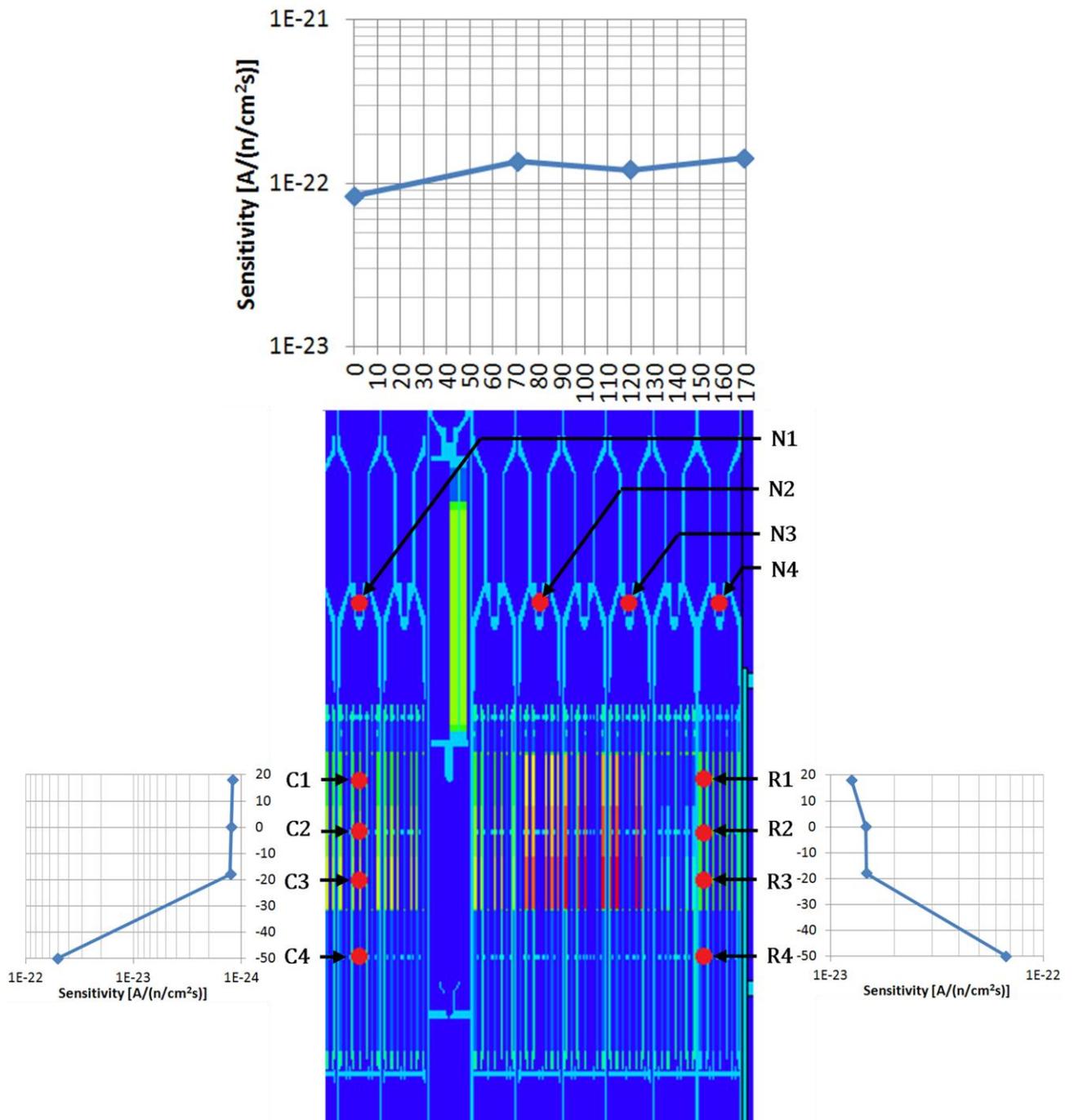


Figura 14 - Sensività del SPND THERMOCOAX Co-type (current mode) in funzione della posizione d'installazione in ALFRED.

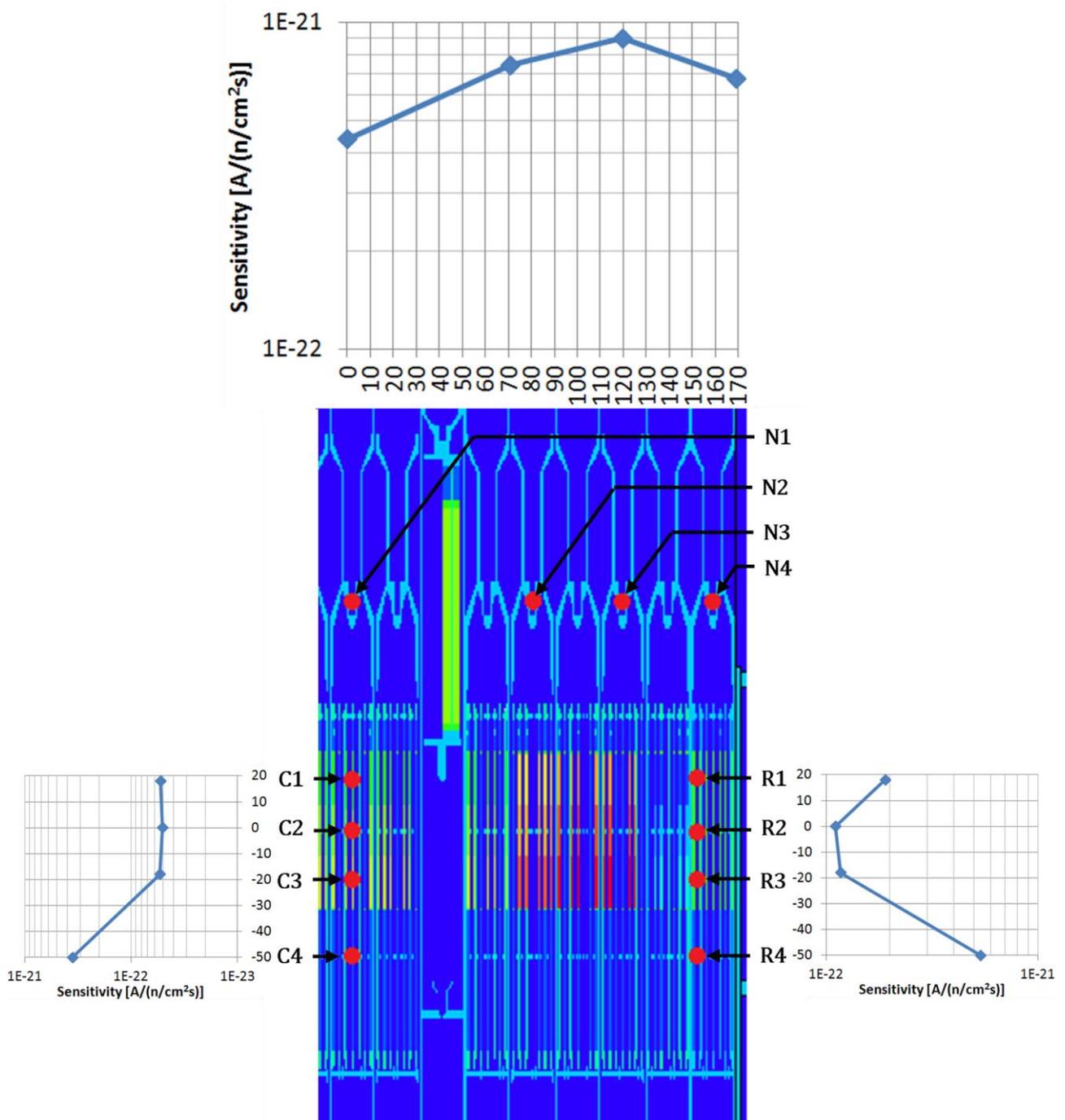


Figura 15 - Sensività del SPND THERMOCOAX Pt-type (current mode) in funzione della posizione d'installazione in ALFRED

Si sottolinea, qui, che le librerie neutroniche a disposizione degli autori per i calcoli, non consentono di simulare un volume sensibile di ^{195}Pt puro, perché tale libreria di sezioni d'urto è indisponibile. Si è ricorsi, pertanto alla libreria di sezioni d'urto corrispondente al platino nella sua composizione isotopica naturale, in cui il ^{195}Pt occorre per il 33.8%. Ne segue che le sensibilità calcolate costituiscono una sottostima, visto che le sezioni d'urto (n,g) corrispondenti agli altri isotopi in composizione (^{194}Pt , ^{196}Pt e ^{198}Pt) sono inferiori alla corrispondente (n,g) dell'isotopo ^{195}Pt .

In tutti i trend analizzati in Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14 e Figura 15 si evince un aumento della sensibilità di tutte le sonde in quelle posizioni che presentano le energie medie di spettro neutronico più basse. Le sensibilità individuate variano -lungo una traversa, tra valori minimo e

massimo– da valori di qualche percento fino ad un fattore circa 50 nel caso del ^{59}Co , anche in relazione alla specifica forma assunta dalla sezione d'urto della reazione nucleare su cui si basa il segnale prodotto dal sensore. In alcuni casi, pertanto, può considerarsi un unico valor medio per la sensibilità; in altri, le variazioni risultano così elevate da non potersi considerare trascurabili.

3.1.1 Interferenze gamma

Le sonde discusse in precedenza, oltre che essere sensibili alla radiazione neutronica, risultano essere sensibili anche alla radiazione gamma che naturalmente si accompagna alla fissione e al successivo decadimento dei prodotti di fissione.

Volendo identificare la sensibilità della strumentazione a tale disturbo, si è studiato anche il campo gamma del reattore mediante un'ulteriore simulazione, che ha richiesto più tempo di quanto inizialmente stimato, pertanto i valori che si riporteranno di seguito richiedono ulteriore indagine per poter esser raffinati.

	Flusso neutronico [n/(cm ² s)] @ 300 MW _{th}	Flusso gamma [γ/(cm ² s)] @ 300 MW _{th}	Energia γ media [keV]	Air kerma free-in-air rate [Gy/s] @ 300 MW _{th}	Rapporto γ/n
N1	2.47E+14 (±1%)	1.65E+12 (±18%)	950	5.5(±13%)	0.0067
N2	1.47E+15 (±1%)	1.38E+12 (±9%)	1450	14(±18%)	0.0009
N3	2.88E+14 (±1%)	1.29E+12 (±15%)	1250	8.3(±14%)	0.0039
N4	1.33E+14 (±2%)	3.62E+12 (±12%)	900	26.4(±22%)	0.0272
C1	3.10E+15 (±0.3%)	4.23E+14 (±2%)	500	1457(±6%)	0.1365
C2	3.71E+15 (±0.3%)	5.40E+14 (±2%)	450	1767(±6%)	0.1456
C3	3.21E+15 (±0.4%)	4.70E+14 (±4%)	500	1536(±7%)	0.1464
C4	2.88E+14 (±1%)	1.64E+13 (±4%)	900	93(±6%)	0.0569
R1	7.00E+14 (±0.8%)	1.39E+14 (±8%)	500	438(±12%)	0.1986
R2	7.55E+14 (±1%)	1.42E+14 (±5%)	600	566(±16%)	0.1881
R3	6.15E+14 (±1%)	1.59E+14 (±18%)	450	472(±13%)	0.2585
R4	2.73E+14 (±0.8%)	4.21E+12 (±8%)	900	22.2(±12%)	0.0154

Tabella 7 - Caratteristiche del campo gamma calcolato nelle posizioni d'interesse.

La sensibilità gamma della camera a fissione Photonis CFUE32 è data essere da specifiche tecniche 3.6E-7 A/(Gy/s) per funzionamento in 'current mode', con una massimo rateo di kerma tollerabile di ~3 Gy/s. A causa di tale vincolo, appare immediatamente chiaro che non è possibile utilizzare questo strumento per potenze di reattore superiori a 300 kW_{th}. Le posizioni più critiche per l'interferenza gamma risultano essere quelle prossime al combustibile, dove si registrano i più alti ratei di kerma.

La camera a fissione studiata, nelle installazioni in prossimità del combustibile e nel funzionamento in 'current mode' è notevolmente disturbata dal campo gamma di reattore (Tabella 8), che produce un contributo alla risposta della sonda più che significativo, con valori comparabili con la sola risposta neutronica. È pertanto sconsigliabile utilizzare lo strumento in 'current mode', a meno che non si utilizzi una tecnica di sottrazione del contributo del fondo gamma.

Energia γ media	Rapporto γ/n	Sensibilità γ C.F. PHOTONIS CFUE32	Sensibilità γ/ Sensibilità n
--------------------	-----------------	---------------------------------------	---------------------------------

	[keV]		[A/(n/cm ² s)]	[-]
C1	500	0.1365	1.69E-19	0.62
C2	450	0.1456	1.73E-19	0.65
C3	500	0.1464	1.73E-19	0.63
R1	500	0.1986	2.23E-19	0.51
R2	600	0.1881	2.63E-19	0.67
R3	450	0.2585	2.72E-19	0.66

Tabella 8 - Sensitività gamma della camera a fissione Photonis CFUE32, nelle condizioni in cui il flusso gamma risulta essere un disturbo significativo.

La sensitività gamma degli strumenti (in particolare per i SPND) è funzione dell'energia della radiazione stessa, e dei materiali costituenti la sonda, in relazione all'andamento dei coefficienti d'interazione lineari e alla natura degli eventi indotti dai gamma interagenti con lo strumento.

È immediatamente possibile notare che la traversa radiale dei 'noses' e i punti C4 e R4, essendo significativamente lontani dal nocciolo (il che interpone tra esso e i punti di misura un consistente strato di piombo schermante), sono interessati da un flusso gamma di almeno due ordini di grandezza inferiore al flusso neutronico, il che rende il contributo degli elettroni di risposta 'mossi' dai fotoni intrinsecamente trascurabile, a causa della scarsa popolazione fotonica. L'effetto di attenuazione del piombo si riscontra anche nell'energia media degli spettri gamma nelle dette posizioni, visto che si registrano delle energie medie alte, tra i 900 e 1500 keV.

I punti interni al nocciolo o immediatamente affacciati ad esso sono, invece, interessati da un flusso gamma paragonabile al flusso neutronico; ciò si riscontra anche dalle energie medie degli spettri, qui più basse (intorno ai 500 keV) poiché non c'è sufficiente piombo ad attenuare i fotoni di bassa energia. In questa condizione, può essere significativo andare a studiare la sensitività gamma dei SPND, visto che il campo gamma non è trascurabile.

	Energia γ media [keV]	Rapporto γ/n	Sensitività γ SPND Thermocoax Co-type [A/(n/cm ² s)]	Sensitività γ /Sensitività n [-]	Sensitività γ SPND Thermocoax Pt-type [A/(n/cm ² s)]	Sensitività γ /Sensitività n [-]
C1	500	0.1365	2.23E-24	1.84	1.53E-23	0.29
C2	450	0.1456	2.38E-24	1.92	1.63E-23	0.32
C3	500	0.1464	2.39E-24	1.90	1.64E-23	0.31
R1	500	0.1986	3.24E-24	0.26	2.22E-23	0.12
R2	600	0.1881	3.07E-24	0.21	2.10E-23	0.19
R3	450	0.2585	4.22E-24	0.29	2.89E-23	0.25

Tabella 9 – Sensitività gamma delle sonde SPND studiate, nelle condizioni in cui il flusso gamma risulta essere un disturbo significativo.

Come risulta evidente da Tabella 9, le sonde SPND-pronte studiate, essendo basate –come tecnica di rivelazione– sulla radiazione gamma pronta emessa a valle della diseccitazione gamma seguente la cattura neutronica, sono sensibili anche alla radiazione fotonica proveniente dall'esterno della sonda. Ne segue che oltre alla corrente misurabile dovuta all'interazione dei neutroni con la sonda stessa, vi sarà un contributo ulteriore derivante dal fondo gamma del reattore. Tali contributi sono da tenere in considerazione perché in alcuni casi non trascurabili.

Dai calcoli effettuati, si evince che per la sonda SPND al cobalto, in caso di installazione nell'elemento di combustibile centrale, lo strumento risulta più sensibile al campo gamma che ai neutroni: questo effetto è dovuto alla forma della sezione d'urto di cattura del ⁵⁹Co, che assume valori esigui alle alte energie dello spettro neutronico nelle dette posizioni, facendo sì che la sensitività neutronica nelle

stesse sia bassa. Nell'installazione nell'elemento riflettore, invece, la minore energia media dello spettro neutronico assicura una sensibilità neutronica della sonda più alta, sicché essa risulta più sensibile ai neutroni che al campo gamma di reattore.

Per quanto concerne la sonda SPND al platino, sia nell'installazione nell'elemento di combustibile centrale che nell'installazione nell'elemento riflettore, la sensibilità neutronica risulta essere sempre maggiore della sensibilità al campo gamma di reattore.

È possibile, comunque, un'installazione anche di SPND sensibili ai solo gamma e di materiali simili a cobalto e platino degli emettitori utilizzati negli SPND precedenti, così da ottenere una risposta gamma sottraibile alle risposte 'lorde' degli strumenti precedenti, ed ottenere così risposte 'nette', dovute ai soli neutroni.

3.2 Stima della risposta e della durabilità delle sonde nelle posizioni d'interesse

Di seguito è presentata la stima della risposta della strumentazione analizzata nelle posizioni d'interesse. Avendo a disposizione la sensibilità aggiornata $S_{fast}(\vec{r})$, risulta sufficiente moltiplicarla per il flusso neutronico locale al fine di ottenere la risposta della strumentazione (6).

$$R(\vec{r}) = S_{fast}(\vec{r}) \cdot \phi(\vec{r}) \quad (6)$$

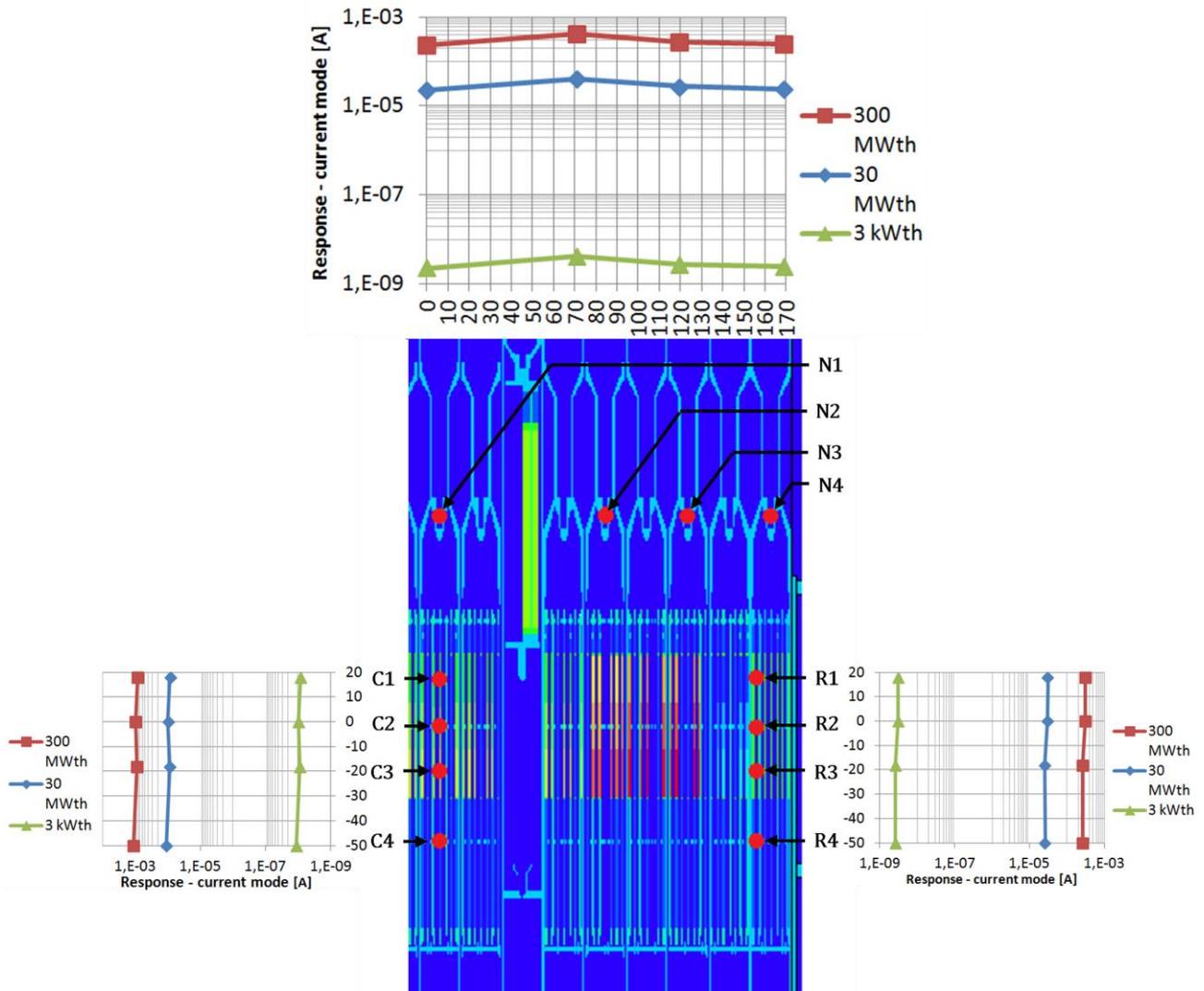


Figura 16 - Risposta (current mode) della camera a fissione Photonis CFUE32 nelle posizioni d'interesse.

Per la camera a fissione Photonis CFUE32, si presenta solo il funzionamento in current mode, visto che interessa la verifica della possibilità d'impiego della strumentazione ai livelli di potenza 10-100% della potenza nominale, ove l'abbondanza della popolazione neutronica obbliga ad operare lo strumento in current mode. La potenza "zero" del reattore può essere misurata agevolmente attraverso il pulse mode, mentre tutti i valori intermedi (dal MWth in su) possono sfruttare il MSV mode fino a circa il 10% della potenza nominale, ove può effettuarsi il passaggio al current mode.

In termini di risposta, tale camera a fissione si presenta come lo strumento ideale per il monitoraggio dalla potenza zero a qualche centinaio di kW_{th}, data l'elevata sensibilità; oltre i 300 kW_{th} le installazioni in prossimità del combustibile non possono essere realizzate per non eccedere nell'esposizione gamma della sonda. Un'ulteriore controindicazione riguarda la durata dello strumento che -data l'elevata sensibilità- tende ad esaurirsi troppo in fretta nei regimi di potenza che vanno dal 10% al 100% della potenza nominale.

Si considera, quindi, anche la durabilità della sonda nelle posizioni d'interesse, individuando l'intervallo temporale entro cui occorrerebbe prevedere una sostituzione dello strumento stesso, perché ormai degradato nelle sue prestazioni. Per quanto concerne la camera a fissione CFUE32, sulle specifiche tecniche si riporta una fluenza massima, E_{th} , in termini di neutroni termici: tale valore va

corretto, e si procederà a farlo attraverso i fattori $ESCF(\vec{r})$ calcolati in precedenza. Fissato un livello di potenza, attraverso la conoscenza del flusso neutronico $\phi(\vec{r})$, possono calcolarsi le durabilità come segue

$$t(\vec{r}) = \frac{E_{th} / ESCF(\vec{r})}{\phi(\vec{r})} \quad (7)$$

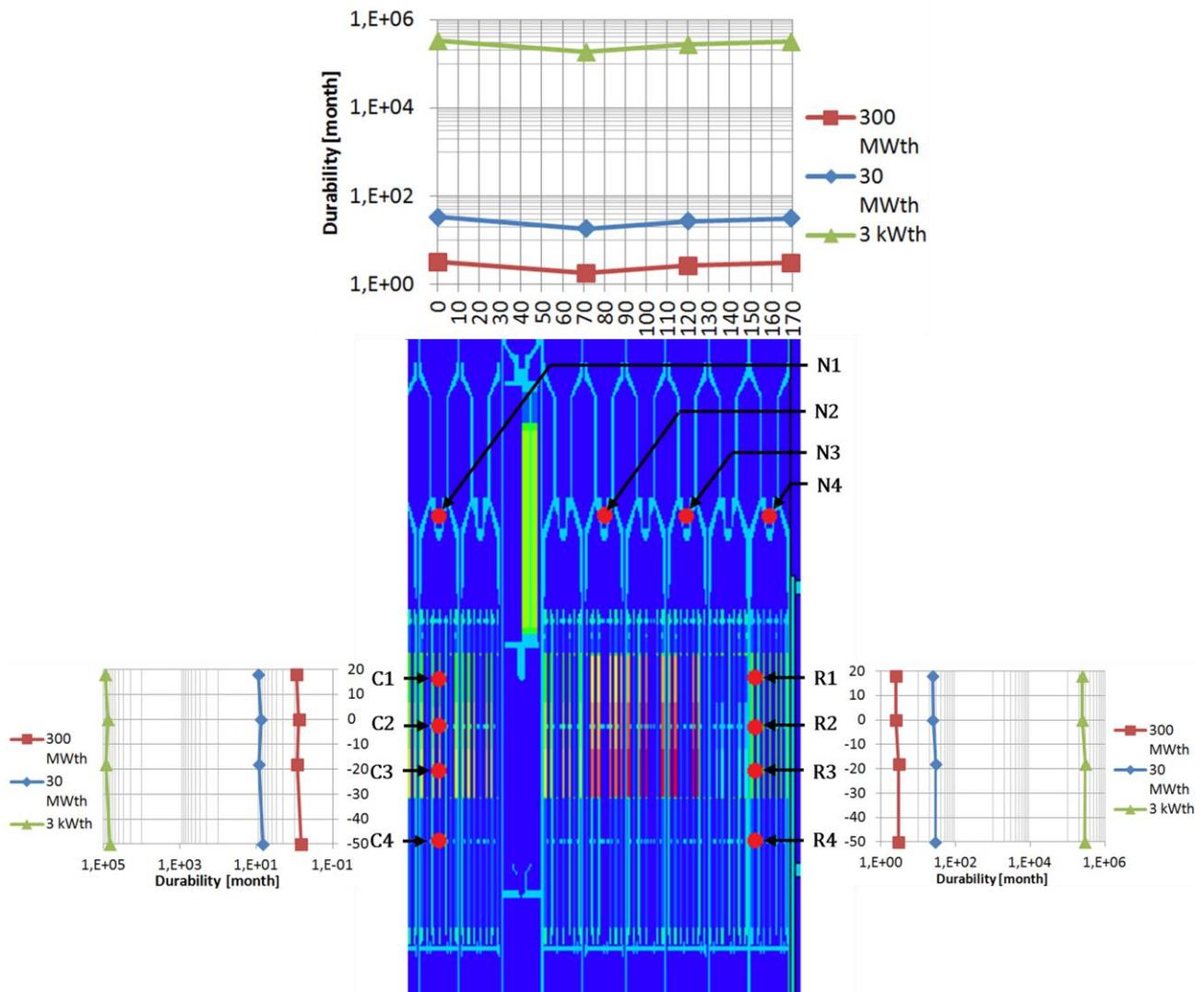


Figura 17 - Durabilità della camera a fissione Photonis CFUE32 nelle posizioni d'interesse.

Come risulta evidente dalla Figura 17, la camera a fissione Photonis CFUE32:

- a potenza nominale (300 MWth): massima durata 1-2 mesi;
- al 10% della potenza nominale (30 MWth): massima durata 10-20 mesi;

Dispositivi di movimentazione e riposizionamento delle camere a fissione dovrebbero essere previsti dato l'eccessivo bruciamento in tempi troppo brevi, incompatibili con le durate tipiche delle campagne d'irraggiamento del combustibile (12-24 mesi). Se si pensa, inoltre, che ALFRED risulta essere un reattore dimostrativo a potenza ridotta, si comprende quanto il problema dell'esposizione gamma e della durata delle camere a fissione possa divenire importante per un reattore di taglia industriale (3000 MWth).

Per quanto concerne i SPND, di seguito sono presentate le risposte (current mode) nelle posizioni d'interesse, in tre livelli di potenza. Il primo rivelatore analizzato è il Themocoax Co-type:

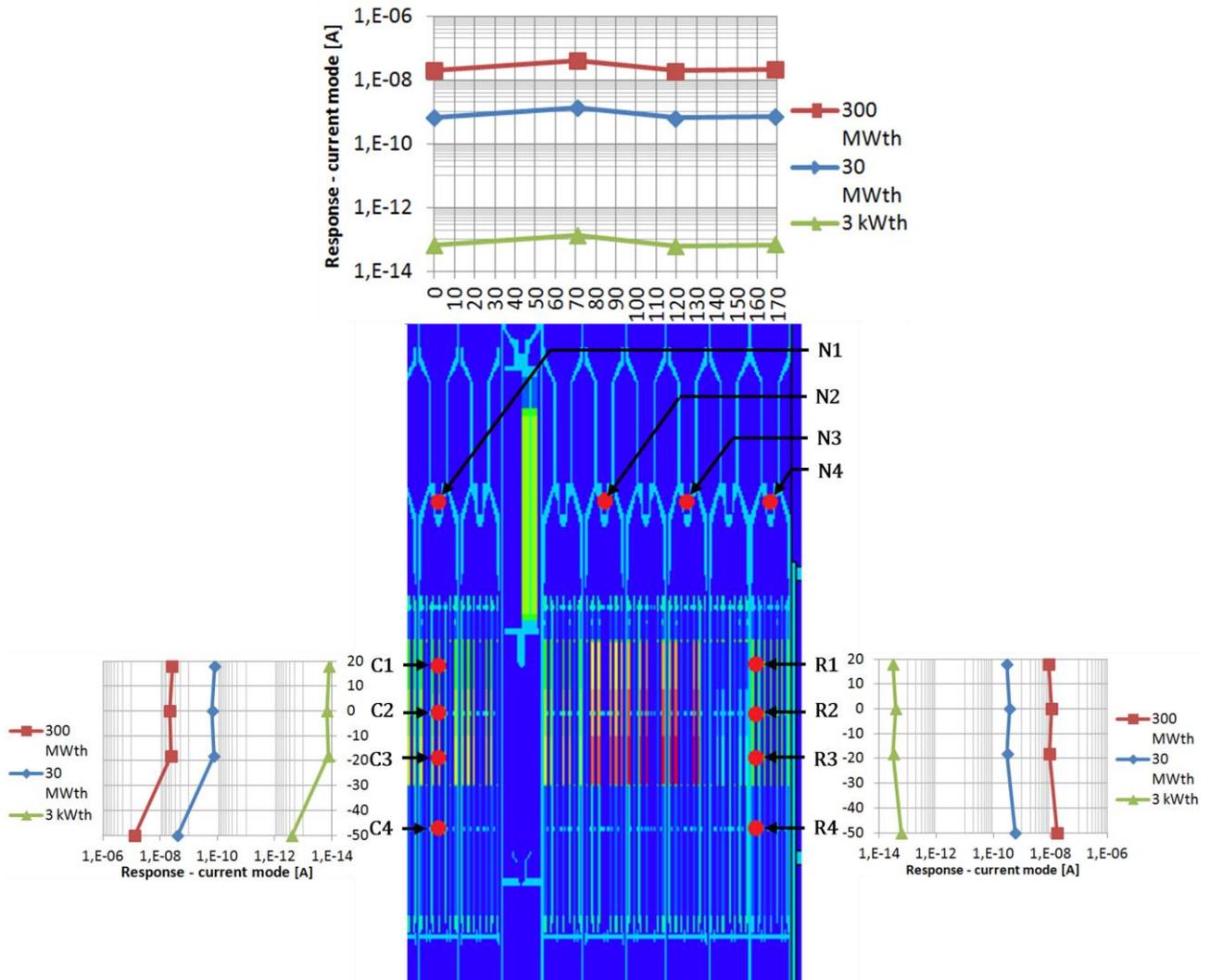


Figura 18 - Risposta (current mode) del SPND ThermoCoax Co-type nelle posizioni d'interesse.

Di seguito si riporta la risposta del SPND al platino. Come anticipato in precedenza, si ricorda che il materiale sensibile qui utilizzato non è ^{195}Pt puro, ma platino in composizione isotopica naturale, essendo questa l'unica libreria a disposizione di MCNPX. Considerando la distribuzione isotopica del platino, la risposta riportata costituisce una sottostima, visto che gli isotopi diversi dal ^{195}Pt hanno sezioni d'urto di valori inferiori rispetto a quelle di quest'ultimo.

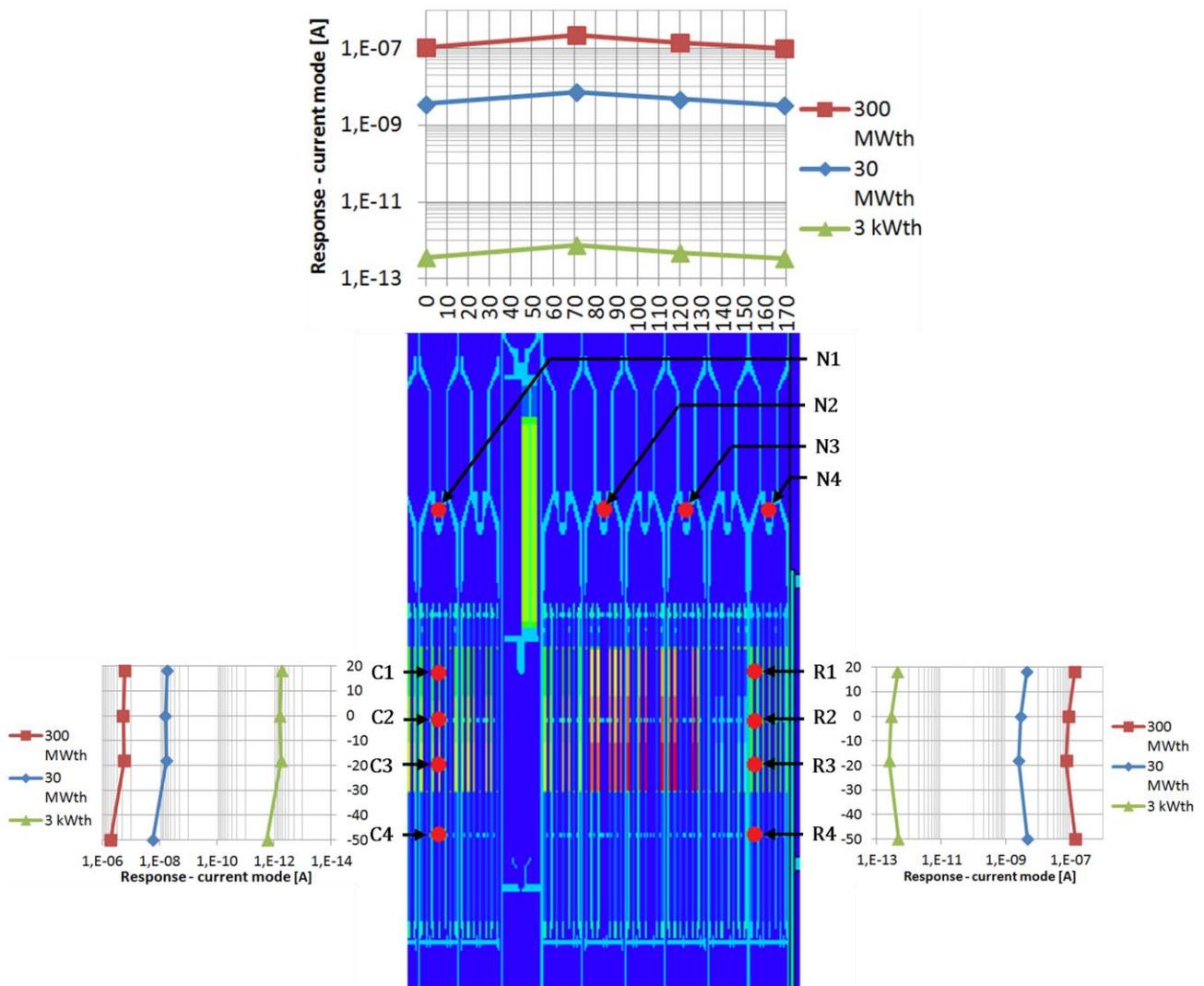


Figura 19 - Risposta (current mode) del SPND ThermoCoax Pt-type nelle posizioni d'interesse.

Elettroniche di misura nucleare possono discriminare correnti nell'ordine dei pA. Considerando – conservativamente– un limite inferiore di 1-10 nA, è evidente che:

- il SPND ThermoCoax Co-type può misurare agevolmente potenze superiori al 50% della potenza nominale;
- il SPND ThermoCoax Pt-type può misurare agevolmente potenze superiori al 10% della potenza nominale.

Gli SPND sono utilizzabili solo con una popolazione neutronica molto elevata, data la scarsa sensibilità, se comparati con le camere a fissione. I valori delle correnti misurate, comunque rientrano in una finestra accettabile. Se si pensa, poi, all'utilizzazione di tali strumenti in un futuro reattore da 3000 MW_{th}, si intuisce come gli SPND possano diventare gli strumenti principi del monitoraggio di un reattore al piombo, considerando una elevata durabilità nel tempo dovuta ad una scarsa sensibilità. Anche nel caso dei SPND è opportuno calcolare la durabilità degli strumenti, così da comprenderne le possibilità applicative e le esigenze tecnologiche di cui la strumentazione può necessitare. Per i SPND non si individuano, tuttavia, dei limiti in fluenza, avendo solo a disposizione dei valori di tassi di burn-up termico $B.U_{th}$.

Individuato un livello di potenza, i valori dei tassi di burn-up attualizzati per lo spettro veloce di ALFRED sono calcolati moltiplicando tale tasso di burn-up (corrispondente al flusso termico ϕ_{th}) per i fattori di correzione $ESCF(\vec{r})$ calcolati in precedenza e per il flusso neutronico veloce $\phi(\vec{r})$.

$$B.U._{fast}(\vec{r}) = \frac{B.U._{th}}{\phi_{th}} \cdot ESCF(\vec{r}) \cdot \phi(\vec{r}) \quad (8)$$

Di seguito si presentano i tassi di burn-up veloce calcolati secondo la (8), per i due SPND individuati.

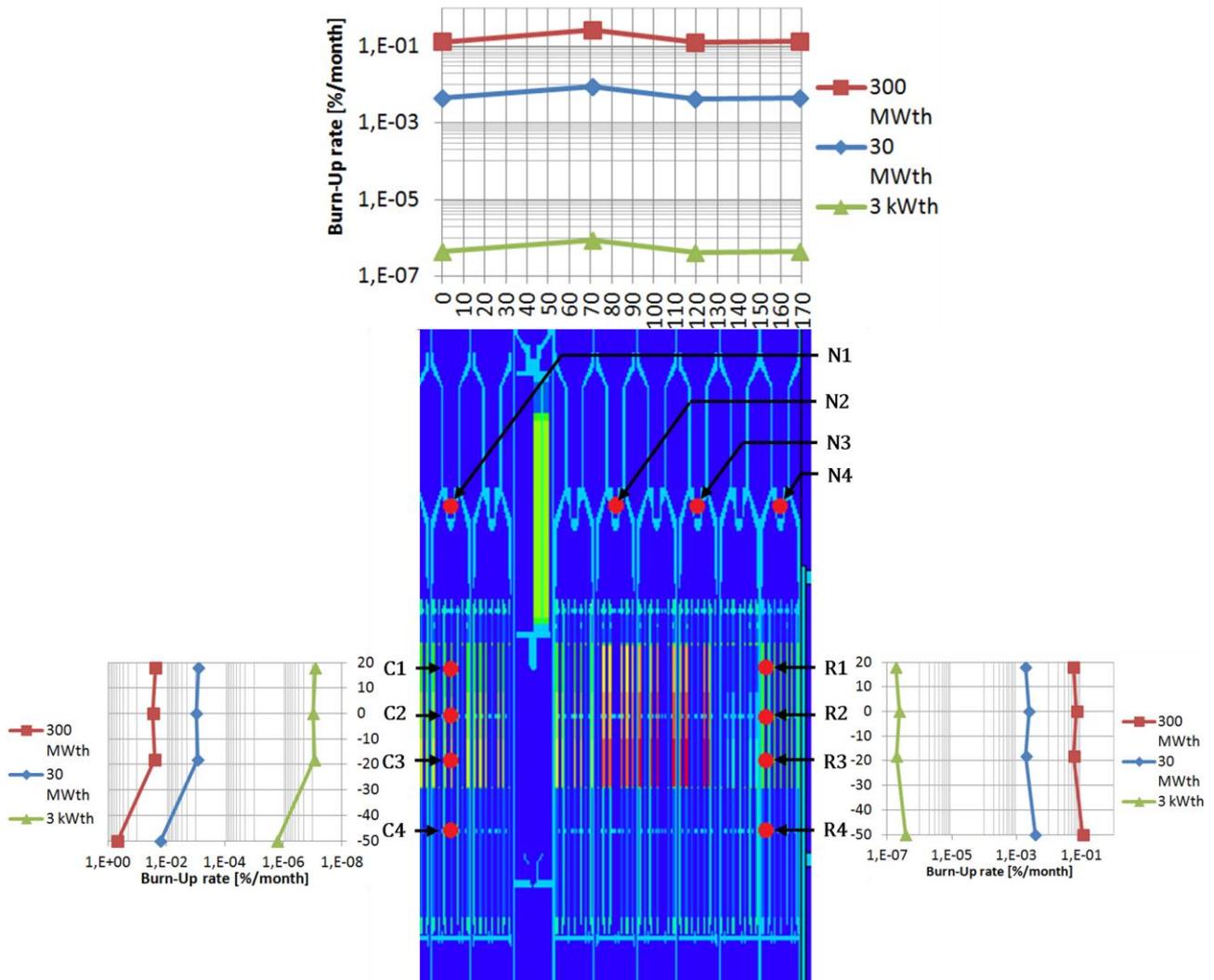


Figura 20 - Burn-up rate del SPND ThermoCoax Co-type nelle posizioni d'interesse.

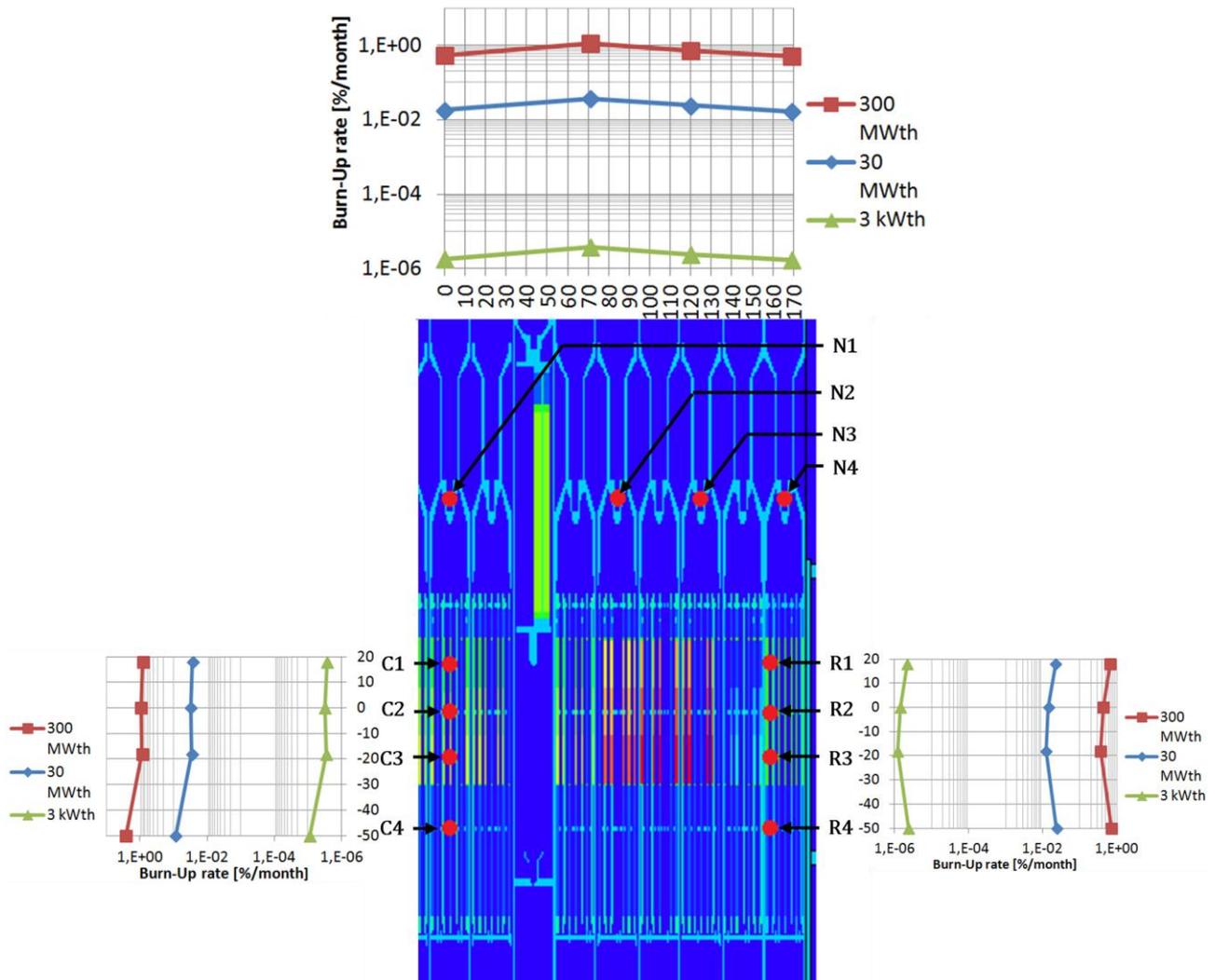


Figura 21 – Burn-up rate del SPND ThermoCoax Pt-type nelle posizioni d'interesse.

Valori di burn-up tollerabili da tali strumenti sono nell'ordine delle decine percentuali che, con i tassi di burn-up calcolati in precedenza, si traducono in una considerevole durabilità degli SPND rispetto alle camere a fissione sfruttanti ^{235}U , vista la minore sensibilità ai neutroni dovuta alla forma della sezione d'urto di reazione.

Ciò che si è delineato nello studio condotto finora può riassumersi nelle seguenti considerazioni.

- La camera a fissione Photonis CFUE32 è adatta a monitorare il reattore dall'avviamento fino a circa 0.1% della potenza nominale, ed esiste un problema di durabilità per potenze >10% della potenza nominale, perché l'elevata sensibilità "brucia" la camera troppo in fretta.
Il massimo rateo di esposizione gamma obbliga lo strumento a dover essere allontanato dalla parte attiva del combustibile quando per potenze >0.1% della potenza nominale.
Sistemi di movimentazione durante il funzionamento del reattore si rendono necessari, così da seguire efficacemente e 'da vicino' l'avviamento di reattore, per poter poi rimuovere la sonda quando i limiti di flusso neutronico e gamma lo impongano.
 Una possibilità di ridurre la sensibilità delle camere a fissione e renderle più durevoli nel tempo sta nella variazione del materiale sensibile, la cui scelta potrebbe ricadere su un isotopo fissile avente una sezione d'urto di fissione (pesata sullo spettro neutronico) di valore inferiore rispetto all' ^{235}U .

- I Self Powered Neutron Detector presentano incapacità nel monitoraggio delle basse potenze, visto che la loro usabilità richiede almeno valori nell'ordine dei MW. Sono, tuttavia, strumenti molto robusti, completamente a stato solido, e non richiedono una alimentazione elettrica per poter operare. Con qualche accorgimento, quindi, si può pensare di utilizzare questo strumento per monitorare il reattore agli alti livelli di potenza, vista anche la durabilità nel tempo.

Appare chiaro che i SPND si dimostrano essere una tecnologia molto adatta al controllo del reattore ALFRED nei regimi prossimi alla potenza nominale.

4. Simulazione della risposta di un rivelatore SPND tramite MCNPX

Il lavoro condotto si propone come obiettivo finale l'ottimizzazione e/o la progettazione ex-novo di strumentazione SPND dedicata al monitoraggio (in risposta pronta) di flussi neutronici veloci.

Il codice di simulazione MCNPX può essere utilizzato nella modellazione di tale tecnologia. Essendo, infatti, i self powered neutron detectors completamente privi di alimentazione elettrica, non vi è la necessità di includere nei calcoli l'effetto del campo elettrico che alimenta la maggior parte dei rivelatori, il che consente al codice di trasporto di radiazione proposto di riuscire a simulare –da solo– il comportamento e la risposta della strumentazione.

Preliminarmente alla fase di progettazione vera e propria della strumentazione dedicata, si vuole effettuare una verifica circa l'effettiva capacità del codice di simulazione e del modello costruito di riprodurre effettivamente i campi di radiazione e le dinamiche di tali rivelatori.

In particolare, verranno riprodotte le condizioni di irraggiamento:

- SPND Thermocoax Co-type irraggiato con neutroni termici (condizioni di test in fabbrica);
- SPND Thermocoax Pt-type irraggiato con neutroni termici (condizioni di test in fabbrica);
- SPND Thermocoax Rh-type irraggiato con neutroni termici (condizioni di test in fabbrica);
- SPND Thermocoax Rh-type irraggiato con neutroni veloci (test nel canale tangenziale del reattore veloce TAPIRO).

4.1 Modello del rivelatore SPND Thermocoax standard

Di seguito sarà presentato il modello del rivelatore SPND Thermocoax standard, simulandone il comportamento in diverse condizioni, al fine di dimostrare che lo strumento di simulazione MCNPX risulta adatto alla modellizzazione della tecnologia di tale strumentazione.



Figura 22 - Disegno concettuale del rivelatore SPND Thermocoax standard.

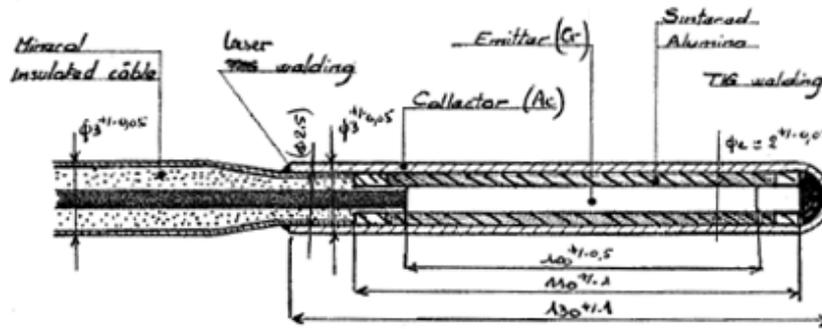


Figura 23 – Sezione di un rivelatore SPND Thermocoax standard (dimensioni in [mm]).

Il rivelatore, come mostrato in Figura 23, è stato ricostruito in MCNPX, con le specifiche di materiali e dimensioni presentate di seguito.

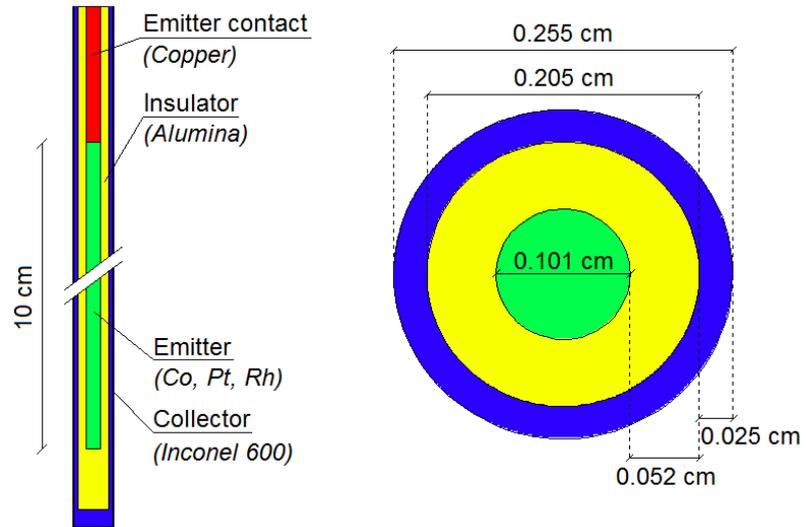


Figura 24 - Sezioni e specifiche del modello del SPND Thermocoax ricostruito in MCNPX.

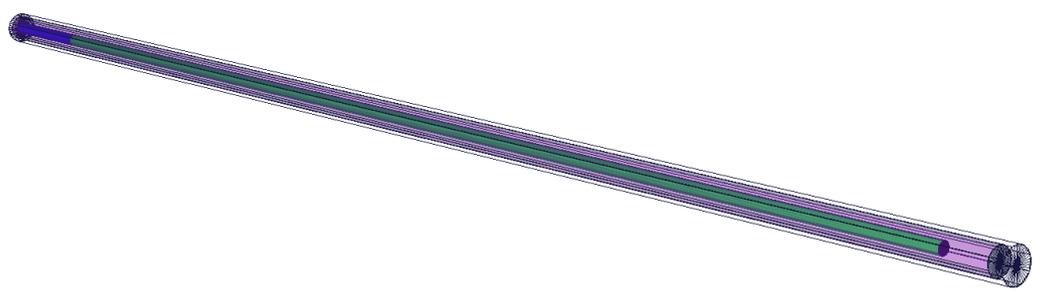


Figura 25 - Visualizzazione 3D del modello del SPND Thermocoax ricostruito in MCNPX.

4.1.1 Simulazione del SPND Thermocoax Co-type irraggiato con neutroni termici

Il rivelatore modellato secondo le specifiche in Figura 24 è stato irraggiato con neutroni termici secondo la distribuzione Maxwell-Boltzmann a T=293K.

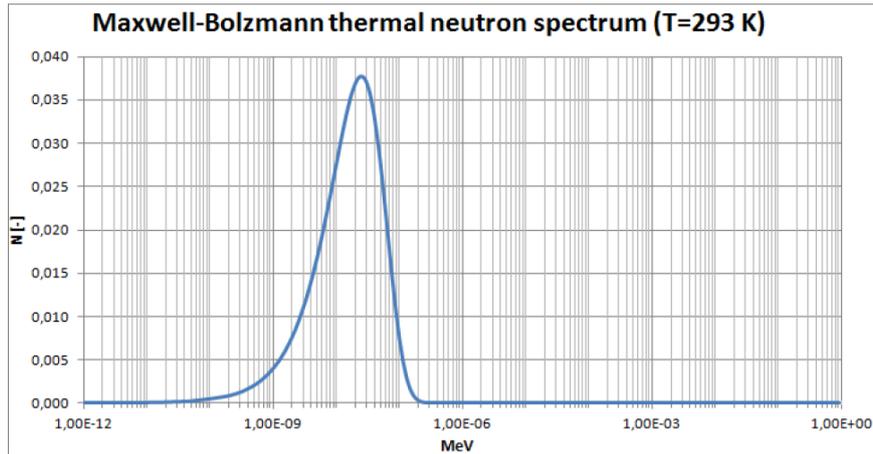


Figura 26 - Distribuzione Maxwell-Boltzmann (T=293K) simulante lo spettro di neutroni termici.

La procedura di calcolo utilizzata è descritta di seguito.

Per un SPND a risposta pronta, cioè basato sulla diseccitazione gamma a seguito della cattura neutronica, al fine di ottenere la corrente elettronica nel collettore, è stata impostata una tally di flusso f2 sulla superficie mediana dell'allumina isolante, effettuando un bilancio sulla popolazione elettronica transitante nei due versi:

$$N_{\text{netto da emettitore a collettore}} = N_{\text{uscente dall'emettitore}} - N_{\text{entrante nell'emettitore}} \quad (9)$$

$$C = \frac{N_{\text{netto da emettitore a collettore}} \left[\frac{e/s}{(n/cm^2 s)} \right] \cdot 1.6E-19 \left[\frac{C}{e} \right]}{\text{emitter length [cm]}} [=] \left[\frac{A}{cm \cdot (n/cm^2 s)} \right] \quad (10)$$

L'equazione (10) fornisce, pertanto la sensibilità dello strumento, da confrontare con le specifiche tecniche dichiarate dalla casa costruttrice.

I risultati della simulazione sono riportati di seguito.

mode	n p e
nps (storie elaborate)	5'000'000'000
massima incertezza sulle tally f2	0.05%
Rateo di reazioni (n,g) all'emettitore [reazioni/s/(n/cm ² s)]	7.8467E-2
Elettroni uscenti dall'emettitore [e/s/(n/cm ² s)]	7.23976E-3
Elettroni entranti nell'emettitore [e/s/(n/cm ² s)]	2.99787E-3
Elettroni netti da emettitore a collettore [e/s/(n/cm ² s)]	4.24189E-3
Corrente elettronica nel collettore (stima MCNPX) [A/cm (n/cm² s)]	6.787E-23
Corrente elettronica nel collettore (casa costruttrice) [A/cm (n/cm² s)]	7.1E-23
Scarto	-4.4%

Tabella 10 - Risultati della simulazione MCNPX del SPND Thermocoax Co-type, irradiato con neutroni termici.

Come risulta evidente, la sensibilità calcolata da MCNPX è una sottostima rispetto al valore dichiarato dalla casa costruttrice. Questa sottostima era attesa, dato che il codice di simulazione effettua un

‘energy cutoff’ sugli elettroni quando questi, nel loro processo di perdita di energia per interazione con i materiali, scendono al di sotto dell’energia di soglia di 1 keV. Questo valore rappresenta un limite inferiore per MCNPX, e non risulta modificabile. Il risultato ottenuto è comunque molto significativo.

È opportuno qui notare, inoltre, che gli elettroni che concorrono alla creazione della corrente elettronica al collettore non derivano solo dalle reazioni (n,g) nell’emettitore, ma anche da altri processi d’interazione dei neutroni con i materiali, nonché da tutte le radiazioni secondarie, fotoniche ed elettroniche. Al fine di valutare tale effetto –e comprendere quindi quale sia la risposta netta dovuta all’utilizzo del ⁵⁹Co come materiale sensibile– si è realizzata una simulazione con un emettitore interno realizzato in Inconel 600, lo stesso materiale di cui è fatto il collettore esterno.

Utilizzando l’equazione (10) i risultati di questa simulazione sono riportati di seguito.

mode	n p e
nps (storie elaborate)	5'000'000'000
massima incertezza sulle tally f2	0.06%
Rateo di reazioni (n,g) all’emettitore [reazioni/s/(n/cm ² s)]	7.8467E-2
Elettroni uscenti dall’emettitore [e/s/(n/cm ² s)]	2.32580E-3
Elettroni entranti nell’emettitore [e/s/(n/cm ² s)]	1.35760E-3
Elettroni netti da emettitore a collettore [e/s/(n/cm ² s)]	9.682E-4
Corrente elettronica nel collettore (stima MCNPX) [A/cm (n/cm² s)]	1.549E-23

Tabella 11 - Risultati della simulazione MCNPX del SPND Thermocoax standard con elettrodo emettitore in Inconel 600, irradiato con neutroni termici.

La risposta netta del SPND Thermocoax standard al ⁵⁹Co è dunque statisticamente significativa rispetto al dummy contenente l’emettitore in Inconel 600 visto che risulta essere maggiorata di +338%.

4.1.2 Simulazione del SPND Thermocoax Pt-type irraggiato con neutroni termici

Il rivelatore modellato secondo le specifiche in Figura 24 è stato irraggiato con neutroni termici secondo la distribuzione Maxwell-Boltzmann a $T=293K$ (Figura 26).

L'equazione (10) fornisce, pertanto la sensitività dello strumento, da confrontare con le specifiche tecniche dichiarate dalla casa costruttrice.

I risultati della simulazione sono riportati di seguito.

mode	n p e
nps (storie elaborate)	5'000'000'000
massima incertezza sulle tally f2	0.05%
Rateo di reazioni (n,g) all'emettitore [reazioni/s/(n/cm ² s)]	1.9936E-2
Elettroni uscenti dall'emettitore [e/s/(n/cm ² s)]	4.33126E-3
Elettroni entranti nell'emettitore [e/s/(n/cm ² s)]	1.95188E-3
Elettroni netti da emettitore a collettore [e/s/(n/cm ² s)]	2.37938E-3
Corrente elettronica nel collettore (stima MCNPX) [A/cm (n/cm² s)]	3.8E-23
Corrente elettronica nel collettore (casa costruttrice) [A/cm (n/cm² s)]	9.0E-23
Scarto	-57.7%

Tabella 12 - Risultati della simulazione MCNPX del SPND Thermocoax Pt-type, irraggiato con neutroni termici.

Come risulta evidente, la sensitività calcolata da MCNPX è una sottostima rispetto al valore dichiarato dalla casa costruttrice, sia per l' 'energy cutoff' del codice sugli elettroni, sia perché il materiale sensibile utilizzato dalla casa costruttrice è il ¹⁹⁵Pt puro, mentre il materiale introdotto in MCNPX è platino in composizione isotopica naturale, nella quale il ¹⁹⁵Pt occorre per 33.8%.

Il risultato ottenuto è comunque significativo, perché la procedura descritta riproduce l'ordine di grandezza della sensitività dichiarata dalla casa costruttrice, con una sottostima nell'ordine del 58%, più che accettabile considerando le limitazioni dette.

Nonostante tali limitazioni, anche la risposta netta del SPND Thermocoax standard al Pt risulta statisticamente significativa rispetto al dummy contenente l'emettitore in Inconel 600 visto che risulta essere maggiorata di +145%.

4.1.3 Simulazione del SPND Thermocoax Rh-type irraggiato con neutroni termici

La riproduzione al calcolatore della sensitività del SPND contenente ¹⁰³Rh necessita di tenere conto anche del contributo degli elettroni derivanti dal decadimento beta del ¹⁰⁴Rh prodottosi per attivazione neutronica. Accanto quindi, agli elettroni che transitano da emettitore a collettore per interazioni dei neutroni con i materiali della sonda, occorre introdurre anche la simulazione delle particelle beta (derivanti dal decadimento del ¹⁰⁴Rh) che transitano da emettitore a collettore.

La sensitività dichiarata dalla casa costruttrice è fornita a $t=68$ s (67% della risposta saturata) dall'inizio dell'irraggiamento, supposto con flusso neutronico costante. Il rateo delle particelle beta, infatti, non è costante con il flusso neutronico sebbene quest'ultimo lo sia, ma è legato al valore istantaneo di attività del nuclide ¹⁰⁴Rh (supposta essere nulla al tempo $t=0$). Dall'istante di inizio dell'irraggiamento occorre attendere 6-7 vite medie del ¹⁰⁴Rh perché la sua attività saturi divenendo pressoché costante.

Appare chiaro che un SPND con emettitore basato su decadimento beta non è in grado di seguire istante per istante l'evoluzione di flusso in un reattore, perché la risposta utilizzabile dello strumento

si basa sostanzialmente sull'arrivo a saturazione dell'attività del nuclide decadente β ; in una condizione di flusso neutronico costante. Una sonda siffatta può essere utilizzata solo per applicazioni di monitoraggio del ciclo del combustibile e, in nessun caso, per attivare le funzioni di sicurezza del reattore.

La simulazione della risposta di un SPND basato su decadimento beta è stata ricavata per sovrapposizione degli effetti, in due stadi di simulazione:

1. conteggio degli elettroni transitanti dall'emettitore al collettore per effetto dell'irraggiamento neutronico sui materiali della sonda, come da equazione (10);
2. conteggio degli elettroni transitanti dall'emettitore al collettore per effetto di decadimento beta del nuclide attivatosi sotto irraggiamento neutronico.

Il secondo contributo richiede che sia valutata l'attività del nuclide ^{104}Rh , calcolabile dall'equazione (11).

$$A(t) = N \cdot V \int_0^{\infty} \varphi(E) \sigma_c^{Rh-103}(E) dE \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (11)$$

dove; N è la densità atomica del materiale emettitore; V , il volume dell'emettitore; φ , il flusso neutronico di irraggiamento; σ_c , la sezione d'urto di cattura del materiale emettitore; τ , la vita media del ^{104}Rh , prodottosi per cattura.

La casa costruttrice fornisce i valori di risposta a $t=68\text{s}$, corrispondente al 67% della risposta satura della sonda, il che trasforma l'equazione precedente in

$$A(t = 68\text{s}) = N \cdot V \int_0^{\infty} \varphi(E) \sigma_c^{Rh-103}(E) dE \cdot 0.67 [=] \left[\frac{\text{beta decay}}{s} \right] \quad (12)$$

Esplicitando il flusso neutronico come $\varphi(E) = |\varphi| \cdot \Psi(E)$, con $\int_0^{\infty} \Psi(E) dE = 1$, si può riscrivere

$$\frac{A(t = 68\text{s})}{|\varphi|} = N \cdot V \int_0^{\infty} \Psi(E) \sigma_c^{Rh-103}(E) dE \cdot 0.67 [=] \left[\frac{\text{beta decay}}{s \cdot (n/cm^2 s)} \right] \quad (13)$$

L'equazione (13) è rappresentativa del rateo dei decadimenti beta al tempo indicato per unità di flusso neutronico: le particelle beta sono quindi trasportate all'interno del modello della sonda e contate, al fine di determinare quale sia la corrente netta transitante da emettitore a collettore mediante l'equazioni (10). Il calcolo del numero degli elettroni transitanti, $N_{\text{netto da emettitore a collettore}}$, è qui più complesso perché il trasporto delle particelle beta all'interno della sonda ha richiesto una simulazione 'ad hoc', poiché 1) è stato necessario introdurre manualmente uno spettro degli elettroni beta emessi, visto che MCNPX non tratta i secondari carichi di decadimento beta; 2) non tutti gli elettroni beta attraversano l'isolante tra emettitore e collettore; 3) gli elettroni beta mettono in moto altri elettroni mentre interagiscono con la materia.

Si è, allora, proceduto a realizzare una simulazione 'ad hoc' considerando come input del calcolo una sorgente omogenea di elettroni beta del ^{104}Rh all'interno del volume dell'emettitore, calcolando così il

seguinte fattore di conversione tra elettroni effettivamente transitanti e particelle beta che vengono a crearsi nell'emettitore:

$$CC = 0.2684 \frac{e_{\text{netto da emettitore a collettore}}}{\text{beta decay}} \quad (14)$$

Il numero netto di elettroni transitanti da emettitore a collettore risulta, in questo caso, il prodotto dei valori delle equazioni (13) e (14)

$$N_{\text{netto da emettitore a collettore}} \left[\frac{e/s}{(n/cm^2 s)} \right] = N \cdot V \int_0^{\infty} \Psi(E) \sigma_c^{Rh-103}(E) dE \cdot 0.67 \left[\frac{\text{beta decay}}{s \cdot (n/cm^2 s)} \right] \cdot 0.2684 \left[\frac{e_{\text{netto da emettitore a collettore}}}{\text{beta decay}} \right] \quad (15)$$

Utilizzando un'equazione tipo (10), si può calcolare -infine- il contributo al segnale derivante dal trasporto della creazione e dal trasporto delle particelle beta.

mode	n p e
nps (storie elaborate)	5'000'000'000
massima incertezza sulle tally f2	0.07%
massima incertezza sulle tally f4	0.02%
Contributo 1: elettroni derivanti da interazione dei neutroni con i materiali della sonda	
Elettroni uscenti dall'emettitore [e/s/(n/cm ² s)]	1.65424E-3
Elettroni entranti nell'emettitore [e/s/(n/cm ² s)]	1.10432E-3
Elettroni netti da emettitore a collettore [e/s/(n/cm ² s)]	5.4992E-4
Corrente elettronica nel collettore contributo 1 [A/cm (n/cm² s)]	8.799E-24
Contributo 2: elettroni derivanti da decadimento beta (@ t=68 s)	
Rateo di reazioni (n,g) all'emettitore [reazioni/s/(n/cm ² s)]	1.6078E-1
Elettroni beta prodotti [e/s/(n/cm ² s)], eq. (13)	1.0772E-1
Fattore di conversione [e/beta], eq.(14)	0.2684
Elettroni netti da emettitore a collettore [e/s/(n/cm ² s)]	2.8912E-2
Corrente elettronica nel collettore contributo 2 [A/cm (n/cm² s)]	4.626E-22
Corrente elettronica totale nel collettore (stima MCNPX) [A/cm (n/cm² s)]	4.714E-22
Corrente elettronica nel collettore (casa costruttrice) [A/cm (n/cm² s)]	20.5E-22
Scarto	-77%

Tabella 13 - Risultati della simulazione MCNPX del SPND Thermocoax Rh-type, irradiato con neutroni termici.

La sottostima riscontrata nella procedura di simulazione era attesa a causa di come è stata realizzata la riproduzione delle particelle beta derivanti dall'attivazione neutronica del ¹⁰³Rh (eq. (14)): non avendo avuto a disposizione lo spettro integrale di tutti i canali di produzione di elettroni, si è utilizzato uno spettro beta semplificato, costituente una parte delle particelle che effettivamente si producono.

Nonostante la limitazione detta, anche la risposta netta del SPND Thermocoax standard al ^{103}Rh risulta statisticamente significativa rispetto al dummy contenente l'emettitore in Inconel 600 visto che risulta essere maggiorata di +2943%.

4.1.4 Simulazione del SPND Thermocoax Rh-type irraggiato con neutroni veloci (canale tangenziale del reattore TAPIRO)

La procedura applicata al §4.1.3 è stata ripetuta integralmente in flusso neutronico veloce, al fine di riprodurre un'esperienza d'irraggiamento del SPND Thermocoax Rh-type all'interno del canale tangenziale del reattore TAPIRO di ENEA Casaccia [2]. Il confronto della simulazione con la realtà sperimentale costituisce una ulteriore conferma circa la correttezza dell'approccio utilizzato, rendendo la procedura utilizzabile anche a fini di progettazione di strumentazione innovativa. I dettagli circa l'irraggiamento riprodotto possono trovarsi in [2].

mode	n p e
nps (storie elaborate)	5'000'000'000
massima incertezza sulle tally f2	0.7%
massima incertezza sulle tally f4	0.1%
Contributo 1: elettroni derivanti da interazione dei neutroni con i materiali della sonda	
Elettroni uscenti dall'emettitore [e/s/(n/cm ² s)]	1.60013E-5
Elettroni entranti nell'emettitore [e/s/(n/cm ² s)]	1.06445E-5
Elettroni netti da emettitore a collettore [e/s/(n/cm ² s)]	5.3568E-6
Flusso neutronico [n/cm ² s]	4.76E+10 ($\pm 10\%$)
Corrente elettronica nel collettore contributo 1 [pA]	0.041 ($\pm 10\%$)
Contributo 2: elettroni derivanti da decadimento beta (@ t=∞)	
Rateo di reazioni (n,g) all'emettitore [reazioni/s/(n/cm ² s)]	2.1256E-3
Elettroni beta prodotti [e/s/(n/cm ² s)], eq. (13), (@ t= ∞)	2.1256E-3
Fattore di conversione [e/beta], eq.(14)	0.2684
Elettroni netti da emettitore a collettore [e/s/(n/cm ² s)]	5.7051E-4
Flusso neutronico [n/cm ² s]	4.76E+10 ($\pm 10\%$)
Corrente elettronica nel collettore contributo 2 [pA]	4.345 ($\pm 10\%$)
Corrente elettronica totale nel collettore (stima MCNPX) [pA]	4.386 ($\pm 10\%$)
Corrente elettronica misurata sperimentalmente (reference [2]) [pA]	17
Scarto	-74.2%

Tabella 14 - Risultati della simulazione MCNPX del SPND Thermocoax Rh-type, irraggiato nel canale tangenziale del reattore TAPIRO di ENEA Casaccia.

Anche in questo caso, come al §4.1.3 si riscontra una sottostima dovuta alla tecnica di simulazione delle emissioni beta del ^{104}Rh . Nonostante questa limitazione, il risultato ottenuto è più che soddisfacente poiché anche la riproduzione dell'ordine di grandezza della risposta dello strumento consente ad MCNPX di divenire uno strumento pratico di simulazione e progettazione più che valido.

5. Proposta di sviluppo futuro di strumentazione dedicata per reattori LFR

Quanto finora esposto può riassumersi nelle seguenti considerazioni:

- La camera a fissione Photonis CFUE32 è adatta a monitorare il reattore dall'avviamento fino a circa 0.1% della potenza nominale, ed esiste un problema di durabilità per potenze >10% della potenza nominale, perché l'elevata sensitività "brucia" la camera troppo in fretta.
Il massimo rateo di esposizione gamma obbliga lo strumento a dover essere allontanato dalla parte attiva del combustibile quando per potenze >0.1% della potenza nominale.
Sistemi di movimentazione durante il funzionamento del reattore si rendono necessari, così da seguire efficacemente e 'da vicino' l'avviamento di reattore, per poter poi rimuovere la sonda quando i limiti di flusso neutronico e gamma lo impongano.
Una possibilità di ridurre la sensitività delle camere a fissione e renderle più durevoli nel tempo sta nella variazione del materiale sensibile, la cui scelta potrebbe ricadere su un isotopo fissile avente una sezione d'urto di fissione (pesata sullo spettro neutronico) di valore inferiore rispetto all'²³⁵U.
- I Self Powered Neutron Detector presentano incapacità nel monitoraggio delle basse potenze, visto che la loro usabilità richiede almeno valori nell'ordine dei MW. Sono, tuttavia, strumenti molto robusti, completamente a stato solido, e non richiedono una alimentazione elettrica per poter operare. Con qualche accorgimento, quindi, si può pensare di utilizzare questo strumento per monitorare il reattore agli alti livelli di potenza, vista anche la durabilità nel tempo.

Il monitoraggio del reattore dalla potenza zero fino a circa il 10% della potenza nominale (cioè fino a 300 kW_{th}) può essere realizzato efficacemente con camere a fissione in-vessel commercialmente disponibili. Oltrepassando questo valore di potenza, gli strumenti devono essere riposizionati ed allontanati dal combustibile.

Esiste una criticità significativa per il monitoraggio neutronico del reattore alla potenza nominale (300 MW_{th}), poiché allo stato attuale non esiste una strumentazione in-vessel provata che sia in grado di monitorare efficacemente gli elevati flussi neutronici in gioco, con tempi di dismissione dello strumento compatibili con le tempistiche del ciclo del combustibile.

I SPND si dimostrano essere una tecnologia molto adatta al controllo del reattore ALFRED nel regime di potenza nominale, ma mai nessun SPND-pronto è stato testato a tale scopo, al fine di stabilire se – effettivamente – tali sonde possano essere adeguate ad attivare le funzioni di sicurezza di un reattore veloce.

Modifiche alla strumentazione SPND corrente, confortate da esperienza sperimentale, possono essere effettuate, al fine di raggiungere i detti obiettivi di monitoraggio del reattore. È chiaro che l'ottimizzazione precisa degli strumenti dipenderà anche dalla strategia di controllo che esigenze neutroniche o obiettivi di sicurezza richiedono.

5.1 Proposta di sonde basate sul principio dei SPND

I SPND a risposta pronta possono rivestire un ruolo chiave nei reattori LFR. Essendo la prontezza della risposta basata sulla diseccitazione gamma dei nuclei attivatisi a valle del bombardamento neutronico, nei tradizionali LWR questi strumenti sono più sensibili dei SPND-lenti (basati su decadimento beta) all'interferenza gamma di reattore, e ciò aumenta il valore minimo del segnale di corrente statisticamente rappresentativo del flusso neutronico. Nei reattori LFR, il campo di radiazione gamma (che naturalmente si accompagna alla fissione e al decadimento dei prodotti di fissione) è intrinsecamente attenuato dal piombo stesso, pertanto il campo di radiazione che interagisce con lo strumento di misura è costituito per lo più dal flusso neutronico. In termini numerici, questa constatazione vuol significare che si riduce il valore minimo del segnale di corrente statisticamente

significativo, e ciò va ad ampliare la finestra di applicazione della sonda, che può essere in grado di monitorare anche regimi di potenza inferiori e, più efficacemente, il range di potenza nominale.

Nelle installazioni in vicinanza del combustibile, si è riscontrato, -difatti- un maggiore flusso gamma rispetto alle posizioni 'più lontane', comparabile con l'entità del flusso neutronico: sono da non preferire, quindi, le installazioni di questo tipo, per contenere il disturbo alle sonde in misura. Alternativamente, possono prevedersi sistemi e tecniche di misura del contributo gamma al fine di sottrarlo alla risposta 'lorda' degli strumenti ed ottenere la sola risposta neutronica.

Ottimizzazioni dei SPND in termini di sensibilità possono essere ottenute:

- variando le masse dei materiali sensibili di cui è fatto l'emettitore, utilizzando quindi sonde più lunghe o di diametro maggiore;
- utilizzando fasci di strumenti in parallelo, preservando le dimensioni del singolo strumento;
- utilizzando materiali innovativi diversi da quelli tradizionalmente¹ usati;
- verificando le prestazioni di nuovi layout delle sonde diversi dalla tradizionale geometria a cilindro coassiale.

Un possibile esempio di SPND utilizzato in fascio parallelo è presentato di seguito:

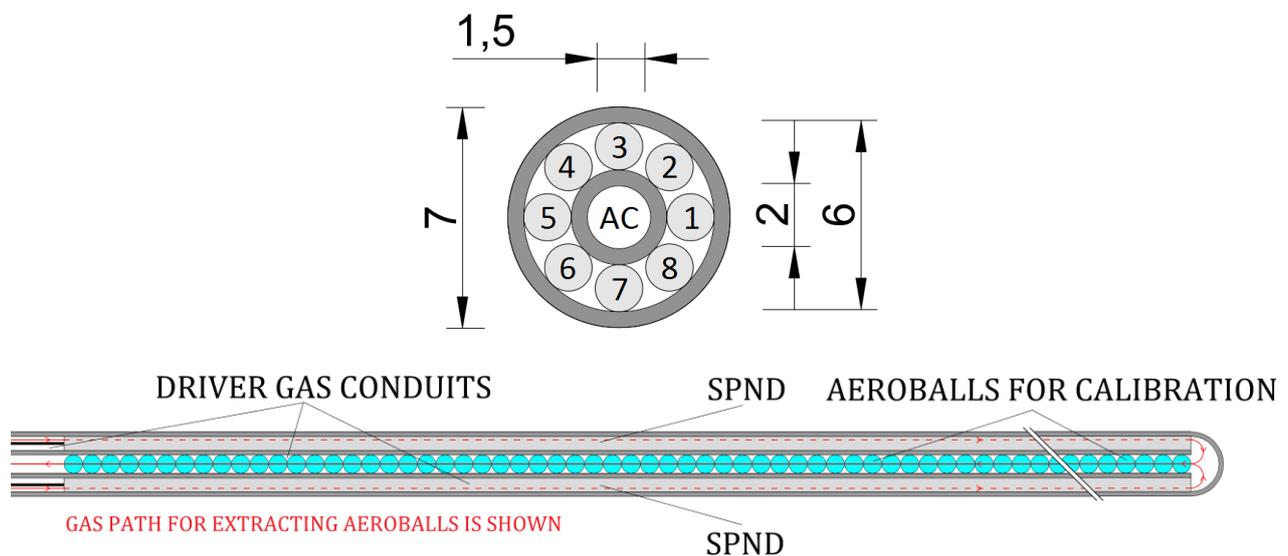


Figura 27 - Struttura della sonda in-core proposta, costituita da 8 SPND disposti radialmente attorno ad un canale centrale ricavato per la taratura della sonda stessa mediante attivazione neutronica di opportuno materiale. Tutte le dimensioni sono in [mm].

Sono diversi i vantaggi dello strumento descritto:

- in prima analisi, mettere in parallelo 8 SPND –piuttosto che realizzarne uno solo di equivalente occupazione spaziale–rispetta il principio di sicurezza della ridondanza: è più difficile che falliscano i contatti elettrici di tutti gli strumenti contemporaneamente;

¹ I materiali comunemente usati per i SPND sono ottimizzati per l'uso in reattori LWR. L'esigenza di monitoraggio di flussi neutronici veloci con tali strumenti può eleggere nuovi materiali sensibili che diano migliori prestazioni nelle condizioni dette.

- il casing esterno consente la protezione degli strumenti dal piombo, evitando fenomeni di corrosione e deterioramento delle sonde e della cavetteria; l'isolamento consentirebbe anche una sostituzione più semplice delle sonde stesse a fine vita;
- l'Activation Channel (AC), inglobato nello strumento stesso consente di effettuare misure di attivazione neutronica per la taratura dell'assembly di SPND con sistemi di posta pneumatica, potendo sfruttare l'intercapedine esterna come canale di mandata/prelievo del gas compresso che movimentata le aeroballs. È, tuttavia, da dimostrare che il posizionamento centrale del canale (all'interno della corona di rivelatori) non influenzi la misura di attivazione per la taratura dello strumento; qualora ciò avvenga, è possibile ri-pensare la sonda posizionando il canale AC in periferia.

Alcuni esempi di modifica alla geometria convenzionale a cilindro coassiale dei SPND possono essere i seguenti (Figura 28), al fine di stabilire quale configurazione presenti la migliore sensibilità a parità di occupazione spaziale della sonda.

In termini costruttivi, un SPND è uno strumento semplice, che non richiede l'adozione di tecniche di lavorazioni o macchinari particolari; inoltre, le materie prime sono tutte di tipo convenzionale (non radioattive) e pertanto non si richiedono manipolazioni controllate. Ne segue che, avendo a disposizione i materiali, costruire un prototipo è relativamente semplice ed economico.

Si conclude, pertanto, che una sonda di tale tipo può essere progettata, sviluppata e testata in tempi rapidi.

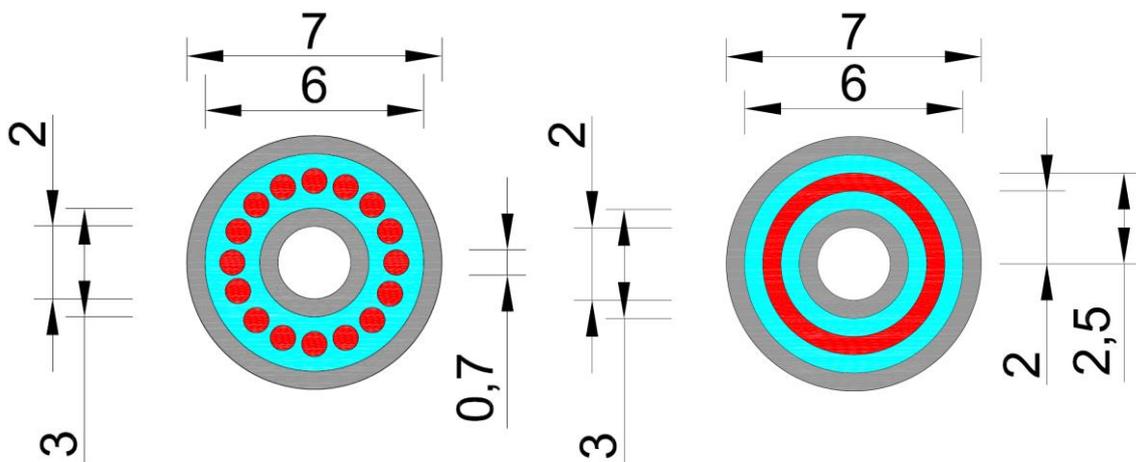


Figura 28 - Possibili configurazioni innovative per SPND: in rosso sono riportati gli elementi sensibili, in blu l'isolante e in grigio i materiali strutturali; al centro il canale per la misura di attivazione. Tutte le dimensioni sono in [mm].

Per quanto concerne i materiali dell'emettitore, le possibilità alternative per il monitoraggio di flussi neutronici veloci sono molteplici come riportato in [2]. A seconda della tipologia di spettro da monitorare e della reazione prescelta per attivare la sonda, può realizzarsi un'ottimizzazione precisa, legata alle caratteristiche locali del flusso neutronico e gamma, e alle esigenze di monitoraggio.

6. Concettualizzazione di prove sperimentali presso il reattore TAPIRO

La disponibilità del reattore veloce TAPIRO [9] presso ENEA Casaccia rende possibile concettualizzare e programmare la prova sperimentale per le sonde in flussi neutronici veloci, confermando le previsioni sperimentali.

In merito alla strumentazione di piccola dimensione, applicabile nel nocciolo o nelle immediate vicinanze di esso, la problematica principale di monitoraggio del reattore risiede alle basse potenze, laddove il flusso neutronico locale presenta valori troppo esigui per poter ricavare un segnale elettrico statisticamente significativo: solo alcune camere a fissione risultano applicabili, mentre i SPND hanno un limite inferiore nel flusso neutronico monitorabile.

Le prove in seguito concettualizzate hanno come obiettivo la verifica sperimentale delle capacità e dei limiti della strumentazione commercialmente esistente, nonché testare sonde di nuova concezione, realizzate in prototipo.

6.1 Irraggiamenti effettuabili nel reattore TAPIRO

TAPIRO è la sorgente neutronica veloce di ENEA Casaccia, operante dal 1971. Le sue principali specifiche tecniche e sperimentali sono riassunte in Tabella 15; in Figura 29 sono riportate una vista in pianta e in sezione. La principale peculiarità del reattore risiede nel suo spettro neutronico, praticamente da ^{235}U puro, la cui energia media risiede intorno ~ 1 MeV.

Il reattore offre una serie di canali per diverse prove, in relazione alla magnitudo e all'energia del flusso neutronico, nonché allo spazio necessario alla prova. La posizione che consente di ottenere il massimo flusso e la maggiore energia media dello spettro neutronico è il canale diametrico, che risulta passante per il nocciolo, per cui la sonda in prova è posizionabile al centro della massa critica. A seguire, il canale che risulta maggiormente promettente per le prove previste è il canale radiale 1 che arriva a ridosso del bordo esterno del nocciolo: sebbene si attenda un minore flusso in magnitudo, con una inferiore energia media dello spettro, questo canale (~ 6 cm di diametro occupabile, distante 9,3 cm dall'asse verticale del nocciolo) si ritiene fondamentale a superare i limiti di quello diametrico che ha un diametro occupabile di appena ~ 1 cm.

Sebbene le sonde precedentemente discusse siano sperimentabili anche solo nel canale diametrico viste le loro dimensioni, può essere interessante effettuare una prova delle stesse annegate in piombo solido, al fine di verificare l'influenza sulle prestazioni di questo mezzo: difatti, data la sua notevole efficacia di schermaggio dei gamma, si pensa sia possibile andare a ridurre il limite inferiore statisticamente rappresentativo dei segnali elettrici delle sonde visto che l'interferenza gamma del campo di radiazione di reattore LFR è intrinsecamente attenuata dal refrigerante stesso.

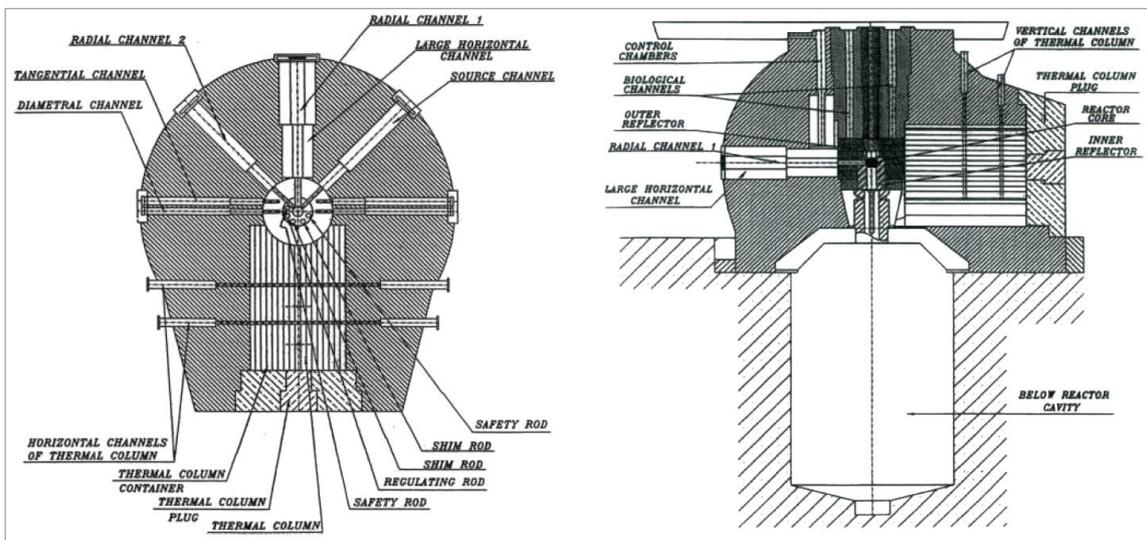


Figura 29 - A sinistra: vista in pianta del reattore TAPIRO in corrispondenza del piano mediano di nocciolo. A destra: sezione verticale del reattore sull'asse della canale radiale 1/colonna termica.

Reactor Type	Fast reactor
First criticality	1971
Maximum thermal power	5 kW
Maximum neutron flux	$4 \cdot 10^{12} \text{n/cm}^2\text{s}$ (at the core center)
Fuel layout	3 cylinders (2 fixed, 1 movable)
Fuel composition (metal alloy)	98,5% wt. U (U: 93,5% at. U^{235} 5,6% at. U^{238} 0,6 % at. U^{234} 0,3 % at. U^{236}) 1,5% wt. Mo
Cooling system	Gas (Helium)
Reflector	Copper
Control system	based on leakage - 2 safety rods - 2 shim rods - 1 regulating rod
Test channels	- radial channel 1 (useful I.D. ~ 6 cm) - radial channel 2 (useful I.D. ~ 8 cm) - tangential channel (useful I.D. ~ 3 cm) - diametral channel (useful I.D. ~ 1 cm) - 2 vertical channel (useful I.D. ~12 cm) - thermal column (experimental cavity ~ 2 m ³)

Tabella 15 - Principali caratteristiche tecniche e sperimentali del reattore TAPIRO.

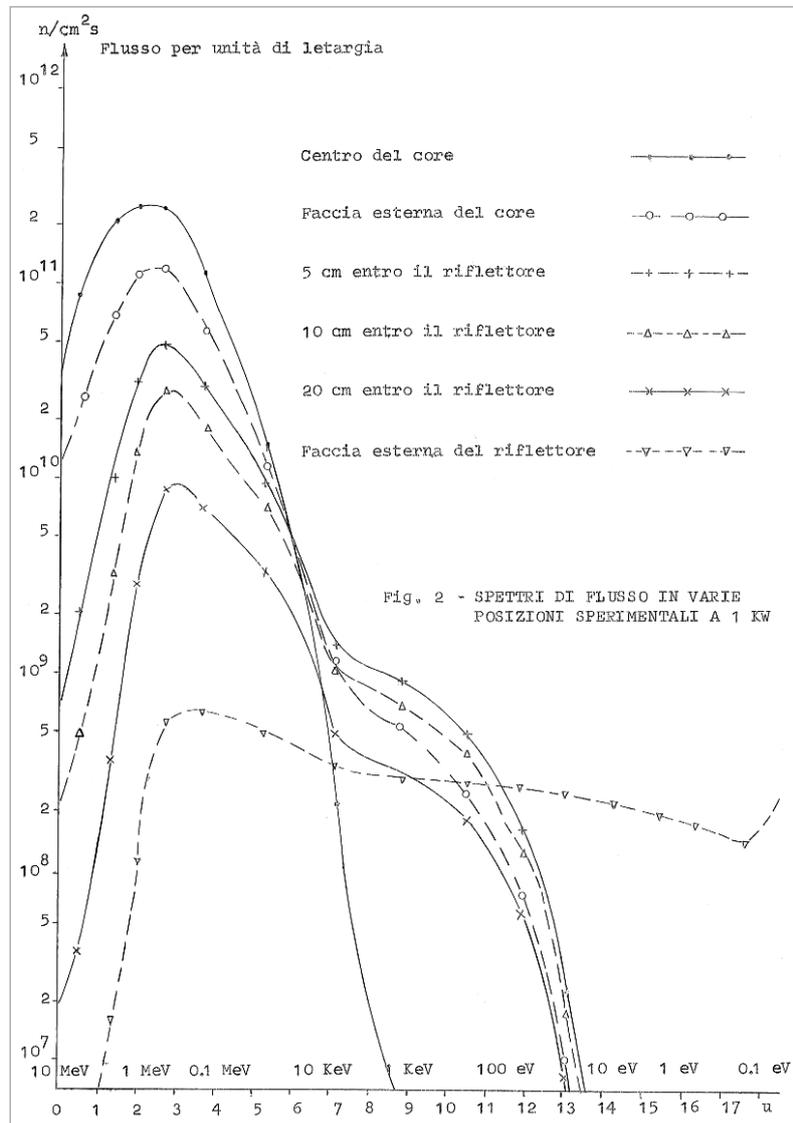


Figura 30 - Caratteristiche del flusso neutronico di TAPIRO nelle diverse posizioni sperimentali.

6.2 Concettualizzazione di test sperimentali nel reattore TAPIRO

Le caratteristiche del reattore veloce TAPIRO si dimostrano adatte ad investigare le problematiche di monitoraggio di flussi neutronici veloci di "bassa intensità" laddove la popolazione neutronica può risultare insufficiente a ricavare segnali elettrici statisticamente significativi cui affidare il monitoraggio e controllo del reattore. È, inoltre, possibili studiare caratteristiche specifiche degli strumenti (cioè per unità di flusso) come le sensitività neutroniche e gamma.

Essendo il flusso neutronico massimo del reattore TAPIRO nell'ordine di $10^{11} \div 10^{12}$ n/cm² s, da **Errore. 'origine riferimento non è stata trovata.** si evince che si riuscirebbe a riprodurre un flusso neutronico – come valore assoluto – al massimo di entità tale da simulare il range che va dalla potenza '0' a qualche centinaio di kW. Chiaramente, più si è in prossimità del centro del nocciolo, più la magnitudo del flusso è significativa, pertanto saranno da preferire prove nel canale diametrale, tangenziale e poi nel più grande canale radiale 1.

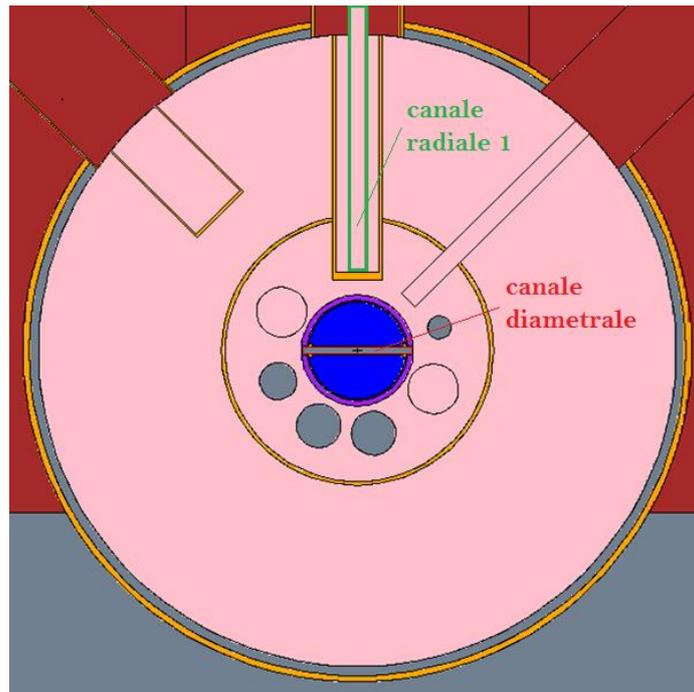


Figura 31 - Vista in pianta del piano mediano del reattore TAPIRO. In evidenza i canali sperimentali individuati per le prove proposte.

Considerando l'esiguità dei dati sperimentali relativi ad SPND-pronti e tenendo conto dell'esperienza già effettuata in TAPIRO [2], il reattore può risultare adatto a:

- testare SPND commerciali nel canale diametrale del reattore, in condizioni di flusso massimo;
- testare SPND di nuova concezioni (ad aumentata sensibilità) negli altri canali a minore flusso.

Il programma sperimentale potenzialmente conducibile all'interno di TAPIRO può distinguersi in due campagne di caratterizzazione:

- CAMPAGNA A: test della strumentazione commercialmente disponibile, così come acquistata (verifica di prestazione) o organizzata in assembly di strumenti;
- CAMPAGNA B: test di strumentazione di nuova concezione, per la quale si richiede approfondito studio e sviluppo in prototipo.

Essendo privilegiate le prove nel canale diametrale, per questioni di dimensione occorre orientarsi verso gli strumenti di misura inferiore a ~ 1 cm, applicabili potenzialmente in tutto il reattore ALFRED, perlomeno da un punto di vista di occupazione spaziale.

Per contro, il canale radiale 1 offrirebbe la possibilità di provare strumentazione di più grande dimensione, potenzialmente applicabile negli elementi riflettori radiali di ALFRED, o più lontano.

Le caratteristiche che possono studiarsi della strumentazione, commerciale o innovativa, sono:

- misura della sensibilità ai neutroni;
- misura della sensibilità gamma;
- valutazione dei limiti inferiori per i segnali elettrici statisticamente significativi (minimo flusso neutronico rivelabile in maniera affidabile).

7. Conclusioni

Nel presente lavoro si è studiato in dettaglio il progetto del reattore LFR ALFRED, con attenzione particolarmente rivolta a tematiche di strumentazione e controllo.

L'analisi condotta attraverso la simulazione Monte Carlo ha mostrato la necessità di provvedere a condurre ulteriori studi circa la strumentazione da applicare al reattore, perché quella commercialmente disponibile al momento risulta applicabile, ma non completamente adeguata. In breve, si prevedono dei consistenti margini di miglioramento. In particolare:

- le *camere a fissione* si dimostrano essere più adeguate a monitorare la potenza 0 e la salita in potenza, data la loro elevata sensibilità al flusso neutronico; il monitoraggio delle potenze dalle centinaia di kW in avanti richiede la rimozione delle sonde, per questioni di durabilità del tempo e massimo rateo di dose gamma tollerabile; a seconda del posizionamento prescelto e del range di potenza che si intende investigare, sono possibili ottimizzazioni attraverso modifiche funzionali, di layout e di materiali;
- i *SPND-pronti* si dimostrano, tecnologicamente, strumenti semplici, efficaci, resistenti e sicuri per il monitoraggio della potenza nominale; sono da investigare, tuttavia, ottimizzazioni di tali strumenti per le condizioni di reattore LFR, al fine di ottenere migliori prestazioni in termini di rapporto segnale/rumore nel range delle alte potenze; sono, inoltre, da investigare ulteriormente i limiti di bruciamento ammissibili per tali strumenti;
- i *rivelatori al diamante* non sono mai stati applicati alla reattoristica convenzionale, essendo stati concepiti più per esigenze di ricerca per neutronica delle alte energie. La caratteristica che li rende interessanti è la loro resistenza in ambienti sostanzialmente ostili in senso radiologico; occorre comunque notare che essi non sono adatti ad applicazioni in-vessel, a causa delle temperature e dei troppo elevati flussi neutronici. La loro applicazione può essere solo ex-vessel;
- la strumentazione di monitoraggio della salita in potenza (camere a fissione) va estratta e riposta nell'approccio alla potenza nominale; ne segue che, a seconda del posizionamento, va concepito un sistema di movimentazione rapido, efficace e sicuro. I SPND possono essere posizionati in maniera fissa, perché non si richiede la loro rimozione durante le variazioni di potenza del reattore.

Al fine di colmare la mancanza di dati sperimentali, il reattore TAPIRO di ENEA Casaccia può risultare una possibilità concreta di test di sonde commercialmente disponibili o prototipi innovativi, così da compilare un database sperimentale. Tale studio è funzionale alla verifica dell'applicabilità della strumentazione attuale ai reattori veloci di tipo LFR, nonché di enorme ausilio allo sviluppo di disegni innovativi ai fini della realizzazione di nuovi prototipi.

Gli aspetti finora elencati saranno approfonditamente studiati nel prosieguo del lavoro, con particolare attenzione allo sviluppo di prototipi di SPND innovativi, al fine di ottimizzarne disegni e materiali per l'applicazione LFR.

Ringraziamenti

Si ringraziano il Dott. Mario Carta e la Dott.ssa Lina Quintieri per la preziosa collaborazione, il sempre valido consiglio e l'infinita disponibilità al dialogo e al confronto.

Le risorse di calcolo ed il relativo supporto tecnico al presente lavoro sono stati forniti dall'infrastruttura HPC CRESCO/ENEAGRID e relativo staff [9], fondata da ENEA. Per maggiori informazioni, <http://www.cresco.enea.it/english>.

Si ringraziano i tecnici di ENEA\UTICT, ed in particolare l'Ing. Guido Guarnieri per il supporto costantemente fornito alla risoluzione dei problemi legati all'installazione ed al corretto funzionamento dei codici di calcolo sull'infrastruttura CRESCO.

Bibliografia

- [1] L. Lepore, R. Remetti e M. Cappelli, «Studio di fattibilità di sonde per la misura dei flussi neutronici di un reattore LFR - Concettualizzazione di test sperimentali nel reattore TAPIRO,» ENEA, 2013.
- [2] M. Angelone, A. Klix, M. Pillon, P. Batistoni, U. Fischer e A. Santagata, «Development of self-powered neutron detectors for neutron fluxmonitoring in HCLL and HCPB ITER-TBM,» *Fusion Engineering and Design*, vol. 89, p. 2194–2198, 2014.
- [3] E. Bubelis, K. Mikitjuk, W. Hering and A. Alemberti, “PLANT DATA FOR THE SAFETY ANALYSIS OF THE ETDR (ALFRED),” 2012.
- [4] F. Manni, L. Mansani and A. Alemberti, “DESCRIPTION, FUNCIONAL SIZING AND DRAWING OF THE MAIN COMPONENTS OF THE ETDR CONTROL AND SHUTDOWN RODS,” 2013.
- [5] J. C. Gauthier, G. Granget e M. Martini, «Techniques de mesures neutroniques au demarrage de SPX2,» in *Proceedings of a Specialists' Meeting on IN CORE INSTRUMENTATION AND REACTOR ASSESSMENT*, Cadarache, 1989.
- [6] J. C. Perrigreur, C. Berlin, J. C. Gauthier e J. Gourdon, «In core neutronic measurements in an industrial environment. Assessment of the performances of the in-vessel neutronic measurements chains of SUPER-PHENIX 1,» in *Proceedings of the Specialists' Meeting on IN CORE INSTRUMENTATION AND REACTOR ASSESSMENT*, 1989.
- [7] J. C. Nervi, P. Marmonier, A. Eyraud, J. C. Perrigreur, P. Rouches e L. Verset, «Experimental Devices used for Start-up Operations of the SUPER-PHENIX core,» in *International Conference*, Richland, USA, 1987.
- [8] R. Bove, “Nuclear Research Reactor: TAPIRO,” [Online]. Available: http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/nucleare/TAPIROBove.pdf.
- [9] G. Ponti, «The role of medium size facilities in the HPC ecosystem: the case of the new CRESCO4 cluster integrated in the ENEAGRID infrastructure,» in *2014 International Conference on High Performance Computing and Simulation*.

Workgroup

Luigi Lepore(UNIROMA1)

Nato a Napoli il 12 maggio 1987, consegue la laurea triennale in Ingegneria Energetica presso “La Sapienza” nel novembre 2010 con il massimo dei voti. Proseguendo alla magistrale nell’indirizzo nucleare, consegue il titolo nell’ottobre 2012 con il massimo dei voti. Vincitore del bando n°1/2013 SBAI-Sapienza relativamente all’attività di ricerca “Caratterizzazione radiometrica di barrette di combustibile nucleare per reattori veloci”, nel marzo 2013 inizia la sua attività di collaborazione con l’università “La Sapienza”. Vincitore della borsa di dottorato “Energia e Ambiente”, 29° ciclo, inizia nel novembre 2013 una collaborazione con il Laboratorio UTFISST-MEPING di ENEA Casaccia terminato ad agosto 2015. È abilitato all’esercizio della professione di Ingegnere.

Romolo Remetti(UNIROMA1)

Romolo Remetti ha conseguito la laurea in Ingegneria Nucleare nel 1982 e, successivamente, il Dottorato di Ricerca in Energetica. È abilitato all’esercizio della professione di Ingegnere ed è Esperto Qualificato di 3° grado. È Ricercatore Confermato nel SSD ING-IND/20 (Misure e Strumentazione Nucleare) e Professore Aggregato di ‘Misure e Caratterizzazione di Materiali Nucleari’ e di ‘Radioprotezione’, per il Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica dell’Università La Sapienza di Roma. È autore di più di cento pubblicazioni scientifiche.