



Ricerca di Sistema elettrico

Studio di Fattibilità di Sonde per la Misura dei Flussi Neutronici di un Reattore LFR. Concettualizzazione di Test Sperimentali Preliminari sul Reattore TAPIRO

L. Lepore, R. Remetti, M. Cappelli



Studio di Fattibilità di Sonde per la Misura dei Flussi Neutronici di un Reattore LFR. Concettualizzazione di Test Sperimentali Preliminari sul Reattore TAPIRO

L. Lepore, R. Remetti - CIRTEN UNIROMA1, M. Cappelli - ENEA

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

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: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

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 e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione"

Responsabile scientifico ENEA: Mariano Tarantino

Responsabile scientifico CIRTEN: Giuseppe Forasassi

Titolo

Studio di fattibilità di sonde per la misura dei flussi neutronici di un reattore LFR.
Concettualizzazione di test sperimentali preliminari sul reattore TAPIRO.

Ente emittente: UNIROMA1 (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: Reattori Nucleari Veloci
 Generation IV Reactors
 Strumentazione

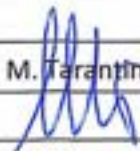
Sommario

Il presente lavoro ha come obiettivo lo studio dell'applicazione della strumentazione neutronica commercialmente disponibile ai reattori LFR (Lead Fast Reactor), proponendo miglioramenti e soluzioni innovative al fine di ottimizzare l'efficacia e l'adeguatezza del sistema di strumentazione, monitoraggio e controllo di reattore. Un tale lavoro deve necessariamente affiancare la fase di progetto del reattore cosicché la strumentazione prevista possa essere efficacemente integrata con le soluzioni progettuali previste. Come modello di riferimento è stato scelto il prototipo dimostrativo ALFRED, del quale si è simulato tramite MCNPX il pressure vessel e tutte le strutture interne a un elevato livello di dettaglio, al fine di ricavare il termine sorgente per la strumentazione, ovvero il flusso neutronico per le posizioni di reattore che potranno verosimilmente alloggiare componenti. Si sono dapprima valutate le prestazioni della strumentazione commercialmente disponibile, illustrandone criticamente le potenzialità e le problematiche d'impiego al caso in esame. Successivamente, sono stati proposti sviluppi e miglioramenti alle tecnologie in uso, con l'obiettivo di delineare modifiche potenzialmente attuabili al fine di ottimizzare la strumentazione per ambienti tipo LFR, prospettando così la possibilità di sviluppare e costruire rivelatori 'ad hoc' sia per il monitoraggio in-core che out-of-core, da testare in facilities sperimentali in grado di fornire spettri neutronici veloci adeguati.

Note
Autori

L. Lepore, R. Remetti (UNIROMA1)
M. Cappelli (ENEA)

Copia n.
In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	26/09/14	NOME	M. Tarantino	NA	M. Tarantino
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		CONVALIDA	VISTO	APPROVAZIONE



CIRTEN

Consorzio Interuniversitario per la Ricerca TEcnologica Nucleare

UNIVERSITÀ DI ROMA “LA SAPIENZA”

**Studio di fattibilità di sonde per la misura dei flussi
neutronici di un reattore LFR. Concettualizzazione di
test sperimentali preliminari sul reattore TAPIRO**

Autori:

**Luigi Lepore
Romolo Remetti**

CERSE-UNIRM RL 1198/2014

ROMA, 25 Settembre 2014

Indice

1. Introduzione.....	3
2. Il termine sorgente: il reattore dimostrativo ALFRED	3
2.1 Andamento spaziale del flusso neutronico (valutazione quantitativa)	5
2.2 Andamento spaziale del flusso neutronico (valutazione qualitativa)	10
2.3 <i>Prontezza e capacità di penetrazione</i> della risposta della sonda	11
3. Valutazione delle prestazioni della strumentazione commercialmente disponibile.....	13
3.1 Camera a fissione	13
3.2 Self Powered Neutron Detector.....	17
4. Analisi della risposta della strumentazione neutronica commercialmente disponibile	21
4.1 Analisi della risposta delle camere a fissione.....	21
4.1.1 Limiti di rivelazione per le camere a fissione.	22
4.1.2 Analisi del segnale proveniente dalle camere a fissione a diversi livelli di potenza	23
4.2 Analisi della risposta dei Self Powered Neutron Detector	32
4.2.1 Limiti di rivelazione per i SPND	33
4.2.2 Analisi del segnale proveniente dai SPND a diversi livelli di potenza	34
5. Proposta di sviluppo futuro di strumentazione dedicata per reattori LFR.....	43
5.1 Proposta di sonde basate sul principio dei SPND	44
5.1.1 Sonda basata su SPND commerciali per uso in-core.....	44
5.1.2 Sonda basata su SPND commerciali per uso out-of-core.....	46
5.1.3 Sonde basate sul principio SPND, a layout innovativo.....	47
5.2 Proposta di sonde basate sul principio delle camere a fissione.....	48
5.2.1 Miglioramenti applicabili	49
5.3 Proposta di sonde basate sul principio dei rivelatori al diamante.....	51
6. Concettualizzazione di prove sperimentali presso il reattore TAPIRO	51
6.1 Irraggiamenti effettuabili nel reattore TAPIRO	52
6.2 Concettualizzazione di test sperimentali nel reattore TAPIRO.....	54
6.2.1 CAMPAGNA A: prove effettuabili nel canale diametrale.....	55
6.2.2 CAMPAGNA A: prove effettuabili nel canale radiale 1	56
7. Conclusioni.....	58
Bibliografia	59
Workgroup.....	60

1. Introduzione

L'identificazione di modelli innovativi per la strumentazione neutronica specializzata per reattori LFR richiede che sia ben identificato il tipo di ambiente in cui le sonde andranno ad operare.

Non essendo al momento presente una sufficiente quantità di dati sperimentali in grado di fornire indicazioni precise riguardo alla strumentazione da impiegare in tali reattori, l'approccio più efficace per raggiungere tale obiettivo è la simulazione mediante codici di calcolo.

Focalizzandosi questo lavoro sull'aspetto del monitoraggio neutronico, saranno assunte le condizioni chimiche e termo-idrauliche dell'ambiente reattore, mentre saranno estensivamente studiati gli aspetti nucleari mediante il codice di trasporto Monte Carlo MCNPX.

In tale lavoro, si è partiti dalla verifica della possibilità di applicare la strumentazione correntemente utilizzata per SFR (Sodium Fast Reactor) al reattore ALFRED, mostrandone limiti e criticità. Sulla base di ciò, viene proposto un modello innovativo di sonda, concettualizzandone la costruzione in prototipo con la successiva prova sperimentale presso il reattore TAPIRO di ENEA Casaccia.

2. Il termine sorgente: il reattore dimostrativo ALFRED

Il reattore ALFRED è stato modellato dentro MCNPX ver. 2.7.0ad un livello di dettagli molto spinto, simulandone tutte le componenti del nocciolo e gli internals, con esclusione dei corpi pompa, degli scambiatori di calore e del coperchio di reattore. Tale livello di dettaglio si ritiene funzionale all'approfondito studio che si vuole condurre, visto che la popolazione neutronica e lo spettro energetico del flusso neutronico sono influenzati sia dal nocciolo del reattore che dalle strutture intorno ad esso.

I dati necessari alla modellizzazione si basano su un modello analogo a quello sviluppato all'interno del Progetto LEADER(1)(2).

La Figura 1 mostra lo spaccato del reattore dentro MCNPX.

La simulazione della reazione di fissione a catena attraverso la routine 'kcode' del codice richiede che il reattore sia critico per poter essere 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 20 cm al di sotto della quota superiore dell'altezza attiva del nocciolo, come mostrato in Figura 2. 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} [-]
183,0776999	300	2,92418	0,996

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

$$C = \frac{P \cdot \bar{\nu}}{k_{eff} \cdot E_{fiss}} = 3,00276 \cdot 10^{19} \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

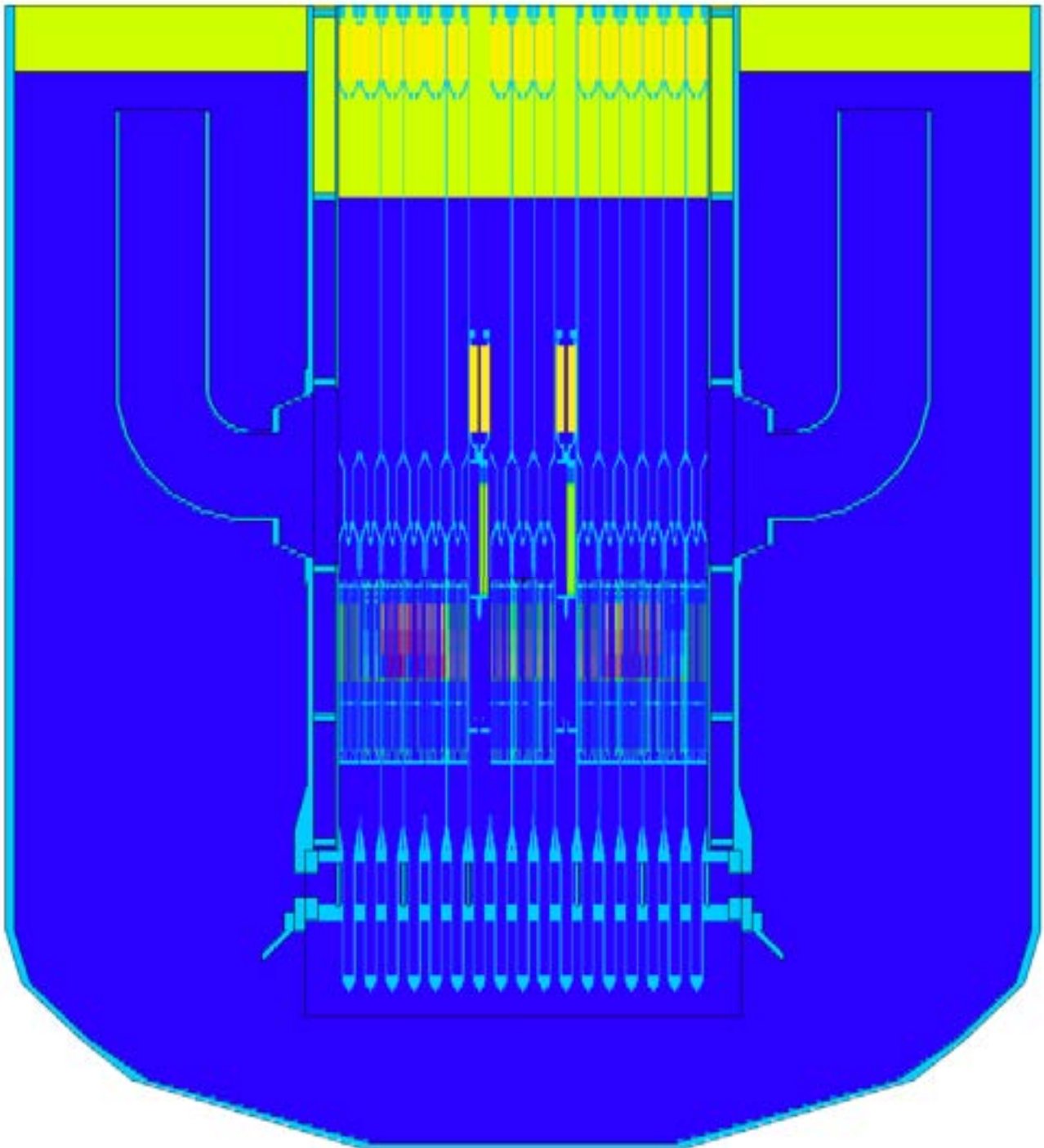


Figura 1 – Vista in sezione del reattore LFR dimostrativo Alfred, all'interno del codice MCNPX (piano xz).

Il significato fisico del fattore di normalizzazione (1) è il seguente: il rapporto $[P/E_{fiss}]$ rappresenta il numero di fissioni al secondo che devono verificarsi per ottenere la potenza P prevista; il prodotto $[(P/E_{fiss}) \cdot \bar{\nu}]$ rappresenta il numero di neutroni di fissione originati dalle (P/E_{fiss}) reazioni.

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.

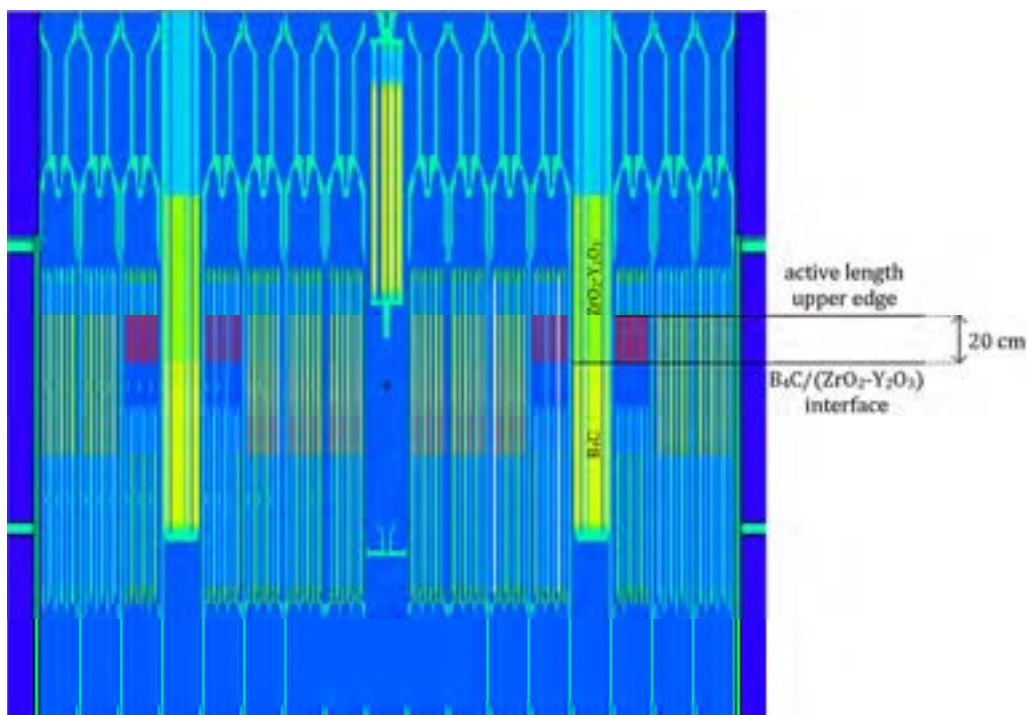


Figura 2 - Posizione delle CRs in configurazione critica.

L'andamento della popolazione neutronica nello spazio, in termini quantitativi (ordine di grandezza del flusso neutronico) ed qualitativi (spettro energetico), costituisce la base di partenza per un corretto approccio allo studio della strumentazione applicabile al reattore.

2.1 Andamento spaziale del flusso neutronico (valutazione quantitativa)

Come anticipato, è fondamentale conoscere la variazione spaziale del flusso neutronico in termini assoluti, cioè nel suo ordine di grandezza, sebbene ciò non sia sufficiente come informazione visto che spazialmente varia anche la distribuzione energetica della popolazione neutronica.

Si è discretizzato il nocciolo in 3 piani (Figura 3) e per ciascun elemento di combustibile (FA, Fuel Assembly) si sono poste 3 tally nella barretta centrale (Figura 3), in corrispondenza del canale vuoto passante all'interno della colonna di pellets. In più si è voluto investigare il flusso neutronico anche nei canali vuoti in corrispondenza dei *noses* dei FAs ponendo una tally nel cavo di ogni singolo elemento: si suppone che questa posizione possa essere quella privilegiata per il posizionamento della strumentazione, data la facilità di accesso e lo spazio disponibile.

Complessivamente, quindi, si è calcolato l'andamento del flusso neutronico in corrispondenza di 4 *midplanes* (Figura 3) attraverso quattro distinte *run* di MCNPX: i dettagli delle singole simulazioni sono riportati in Tabella 2.

run	cicli attivi kcode	source particles	k_{eff}	σ_{keff}	tally max error
lower midplane	90	900000	1,00123	0,00055	0.2313
midplane	90	900000	0,99977	0,00055	0.1366
upper midplane	90	900000	1,00019	0,00051	0.1305
nose plane	120	1100000	1,00049	0,00044	0.1232

Tabella 2 – Dettagli delle simulazioni MCNPX per la stima del flusso neutronico su quattro piani del reattore (Figura 3).

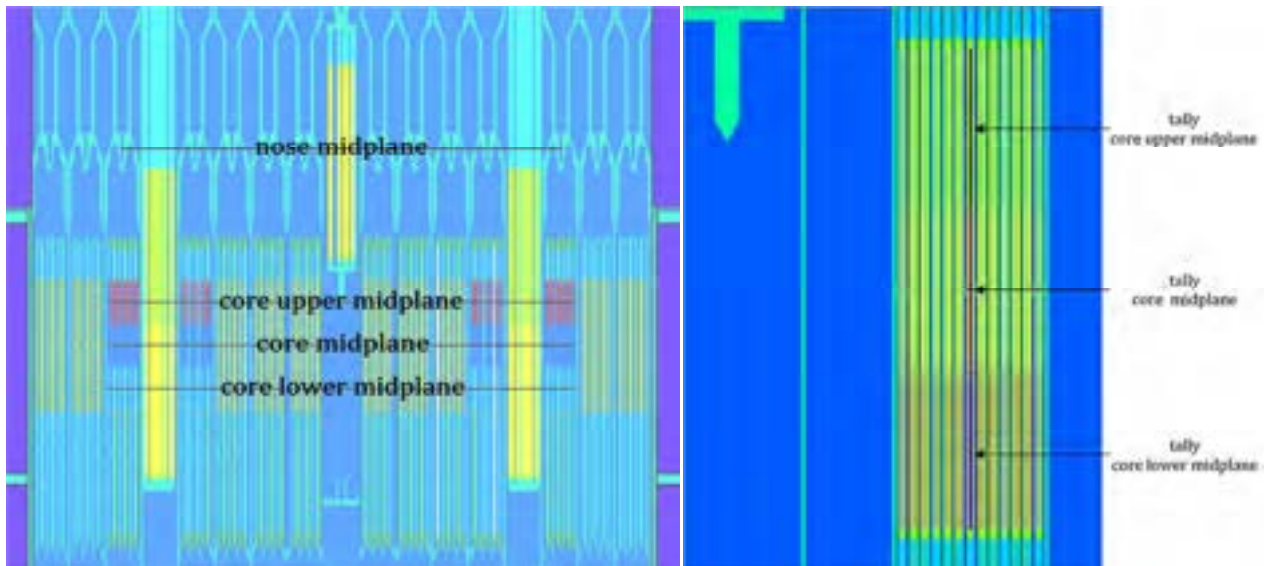


Figura 3–A sinistra: discretizzazione a piani del nocciolo e il piano di posizionamento delle tally dentro in "noses" degli elementi di combustibile. A destra: posizionamento delle tallies nella barretta centrale di ogni singolo elemento di combustibile.

Sebbene la statistica delle simulazioni riportate in Tabella 2 sia migliorabile, gli errori massimi si verificano solo nelle tally corrispondenti agli elementi più esterni, mentre avvicinandosi radialmente al centro, gli errori scendono al di sotto di 0,1: ciò è più che accettabile per le tally f4 utilizzate.

Come ci si attendeva, spostandosi radialmente ad assialmente dal centro del reattore, il flusso neutronico si riduce in entità, e ciò comporta una riduzione della popolazione neutronica che potenzialmente interagirebbe con il rivelatore, con una riduzione del segnale elettrico potenzialmente ottenibile. Sul piano mediano di nocciolo si ritrova un andamento 'a cupola' (Figura 4), con una riduzione in valore medio del flusso dal centro verso la periferia di circa un ordine di grandezza. I profili di flusso corrispondenti ai *lower midplane* e *upper midplane* sono in forma simili al profilo corrispondente al piano mediano di nocciolo, e la riduzione in valore del flusso neutronico andando dal centro verso la periferia è meno sentita. Sul piano medio corrispondente ai *noses* degli elementi di combustibile si ritrova l'andamento riportato in Figura 5, in cui il flusso neutronico si trova mediamente decresciuto di oltre un ordine di grandezza rispetto al massimo valore misurabile nel reattore; inoltre, si riscontra la presenza di un vuoto centrale nel profilo del flusso: la presenza delle 4 SRs sul piano dei *noses* fa sì che le sonde installate su esso radialmente vicine all'asse centrale soffrano una pesante influenza dei materiali assorbitori.

Complessivamente, si riportano in Figura 6i quattro piani di reattore investigati (Figura 3), attraverso una rappresentazione in scale di colore, ottenuti mediante l'elaborazione dei dati provenienti da MCNPX nel codice MATLAB.

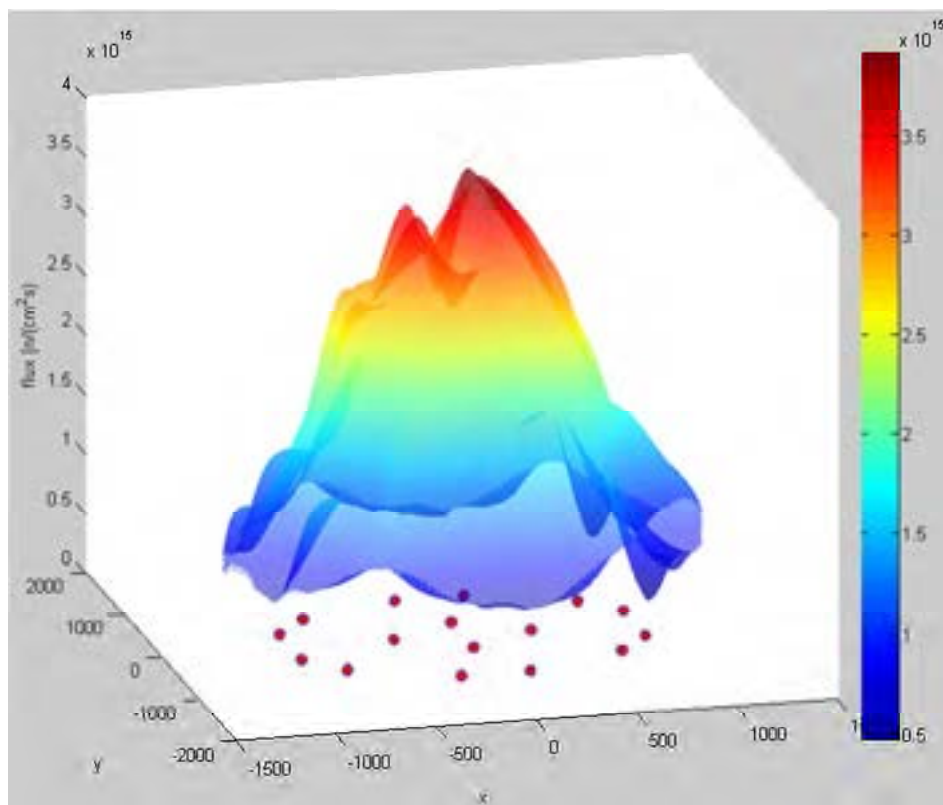


Figura 4 - Andamento del valor medio del flusso neutronico sul piano mediano di nocciolo.

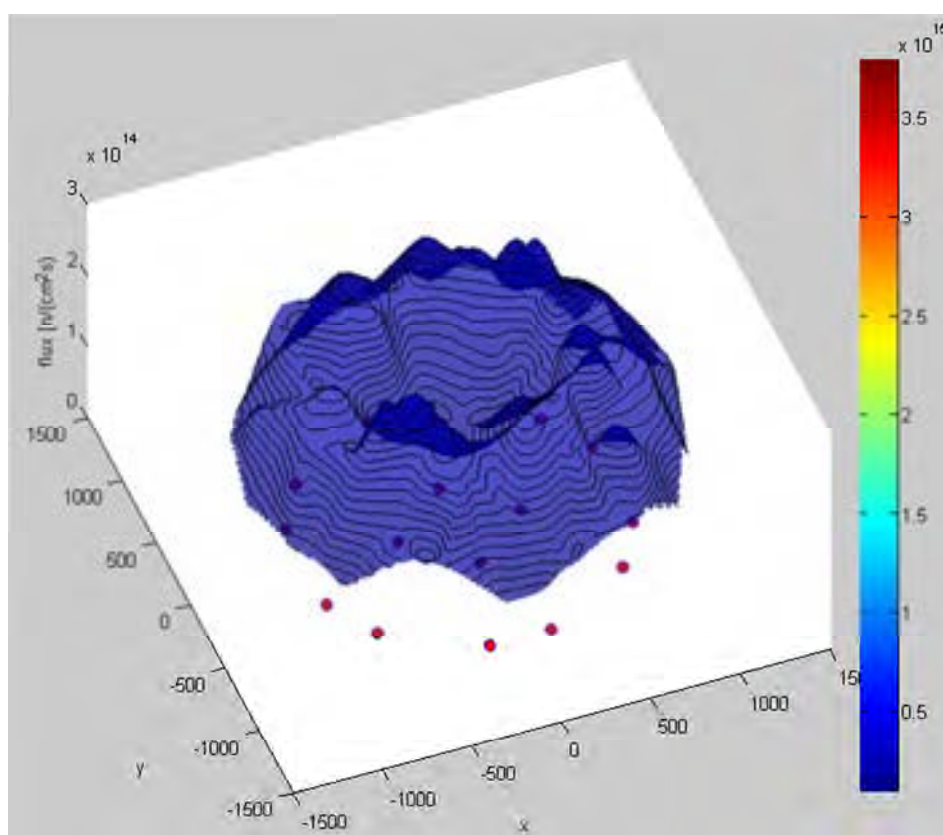


Figura 5 - Andamento del valor medio del flusso neutronico sul piano dei *noses* degli elementi di combustibile.

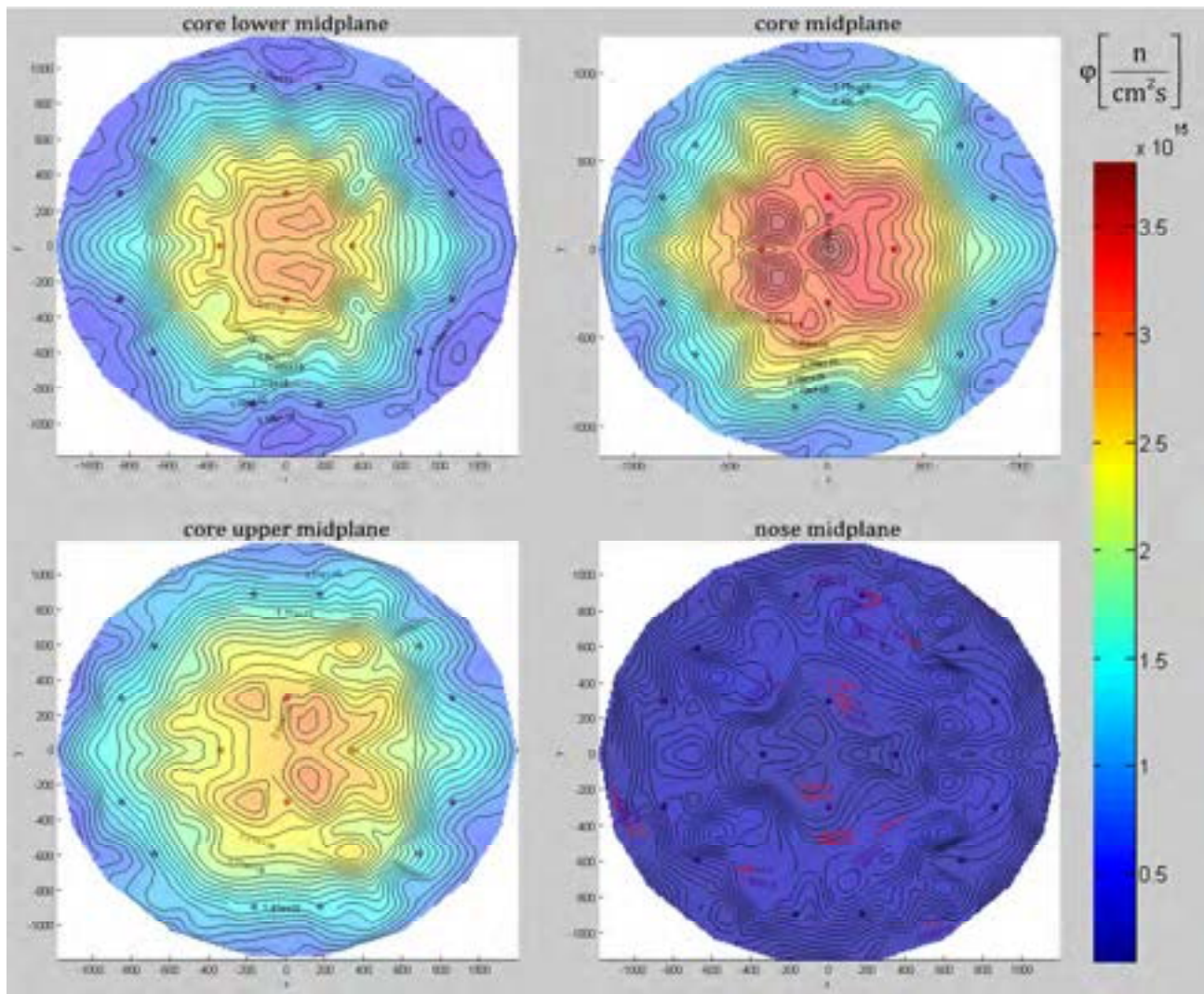


Figura 6 - Andamento del flusso neutronico nei quattro piani specificati in Figura 3.

Lo studio condotto finora si è ripetuto anche per la cintura di elementi *dummy* che costituiscono il riflettore radiale del nocciolo. In questo caso, si sono considerati solo i tre piani che coinvolgono il *core*, ponendo per ciascun elemento una tally in forma di 'repeated structure' coinvolgente tutte le barrette del materiale riflettore, adottando una suddivisione in tre tronconi esattamente come quella scelta per il combustibile (Figura 3). Essendo l'area di campionamento più elevata, queste simulazioni hanno richiesto un numero minore di cicli *kcode* e i risultati ottenuti in termini di errore sono nettamente migliori rispetto alle simulazioni precedenti.

Complessivamente, quindi, si è calcolato l'andamento del flusso neutronico negli elementi riflettori in corrispondenza dei 3 *midplanes* individuati nel nocciolo a mezzo di 3 distinte *run* di MCNPX: i dettagli delle singole simulazioni sono riportati in Tabella 3.

run	cicli attivi kcode	source particles	k _{eff}	σ _{k_{eff}}	tally max error
reflector lower midplane	40	400000	0,99979	0,00082	0,0637
reflector midplane	40	400000	0,99937	0,00071	0,0610
reflector upper midplane	40	400000	0,99874	0,00082	0,0592

Tabella 3 - Dettagli delle simulazioni MCNPX per la stima del flusso neutronico negli elementi riflettori in corrispondenza dei tre piani individuati nel nocciolo (Figura 3).

La statistica riportata in Tabella 3 è più che soddisfacente per quanto riguarda le tally, visto che l'errore massimo risulta inferiore a 0.1, il che rende i risultati più che accettabili. Inoltre, questi ultimi ben si accordano con quelli dei *run* precedenti in termini di valori assunti dal flusso neutronico.

In Figura 7 si riporta l'andamento del flusso neutronico sul piano mediano di nocciolo, componendo i risultati dei due set di simulazioni realizzati finora; in Figura 8 i tre *midplane* di nocciolo investigati. Si evince che i risultati delle due simulazioni ben si accordano fra loro.

Si è particolarmente interessati ai questi ultimi risultati visto che si pensa che i riflettori radiali possano essere una buona soluzione per il collocamento della strumentazione attraverso pin strumentate, eventualmente mobili.

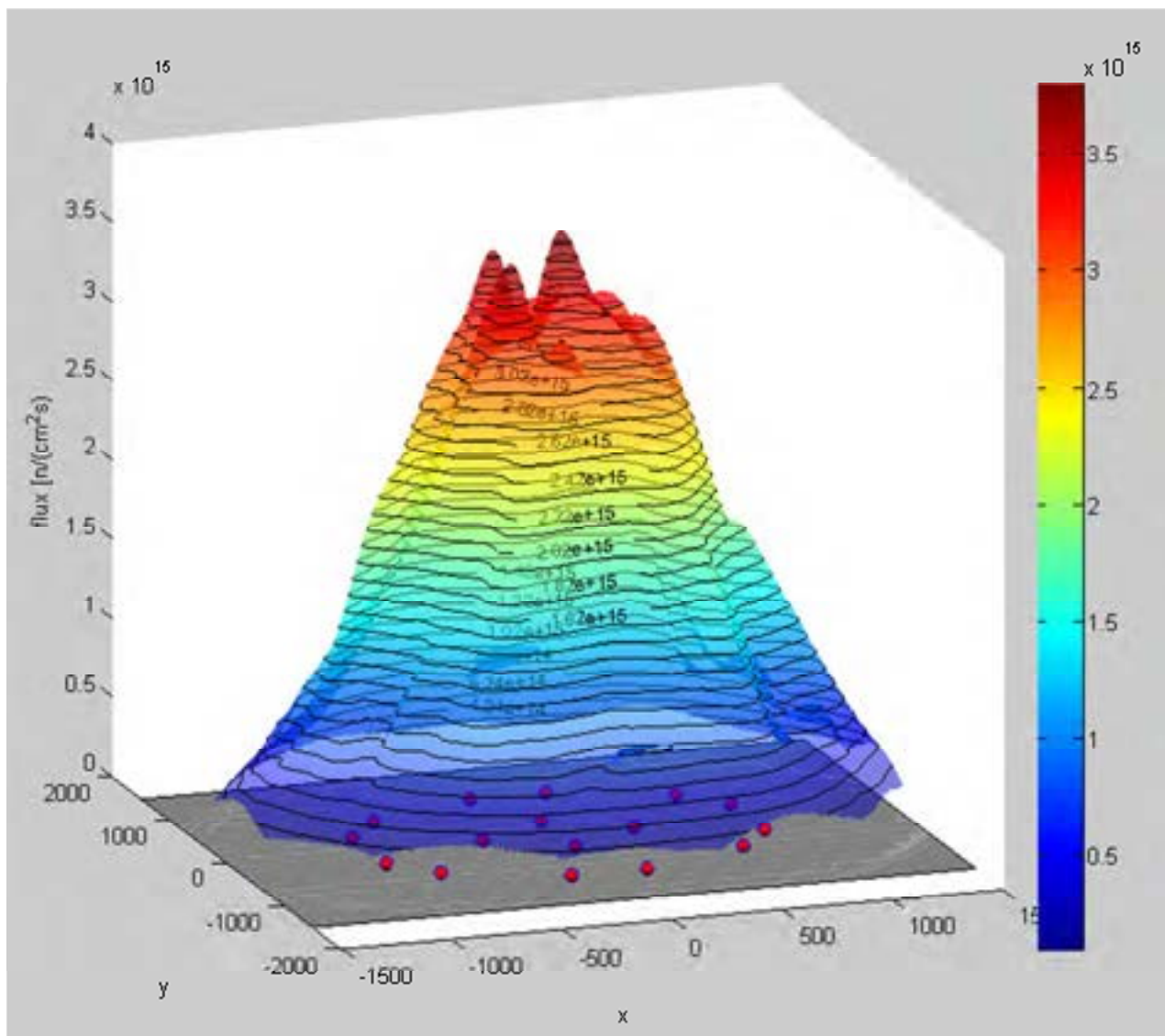


Figura 7 - Andamento del valor medio del flusso neutronico sull'intero piano mediano di nocciolo, includendo gli elementi riflettori radiali.

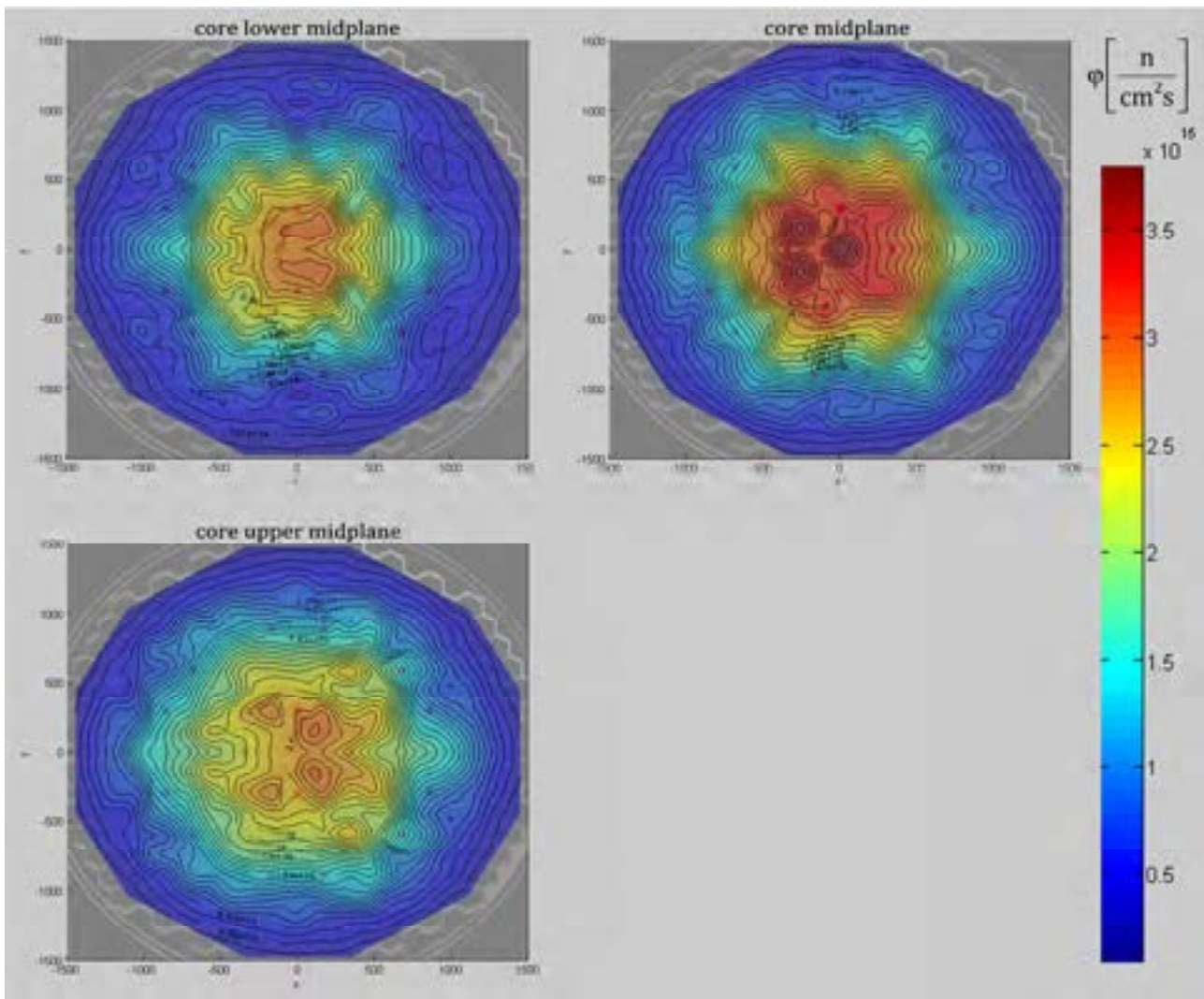


Figura 8 - Andamento del flusso neutronico nei tre piani di nocciolo specificati in Figura 3, includendo i valori calcolati per gli elementi riflettori radiali.

2.2 Andamento spaziale del flusso neutronico (valutazione qualitativa)

Come anticipato, è di fondamentale importanza conoscere non solo il flusso neutronico, ma anche la sua energia media, visto che le sezioni d'urto dei materiali che generalmente costituiscono il materiale sensibile degli strumenti di misura possono variare sensibilmente con l'energia.

Al fine di comprendere come la distribuzione energetica cambia localmente, è stato preparato un run MCNPX con delle tally spettrometriche, opportunamente disposte in alcune posizioni di reattore, in corrispondenza del piano mediano di nocciolo e del piano medio dei *noses* degli elementi di combustibile (Figura 9). Al fine di ottenere un risultato statisticamente significativo si è impostata la tally f4 sul combustibile nella forma di *repeated structure*, e quindi si è calcolato un flusso mediato su tutto su tutto l'elemento analizzato, come riportato nella figura. Per quanto concerne i *noses* si è impostata una tally f4 a riempire tutto il volume disponibile nel cavo. Le posizioni investigate sono state numerate in progressione dall'interno verso l'esterno, con prefisso 'C' per il piano mediano di nocciolo e con il prefisso 'N' per il piano corrispondente ai *noses* (Figura 9).

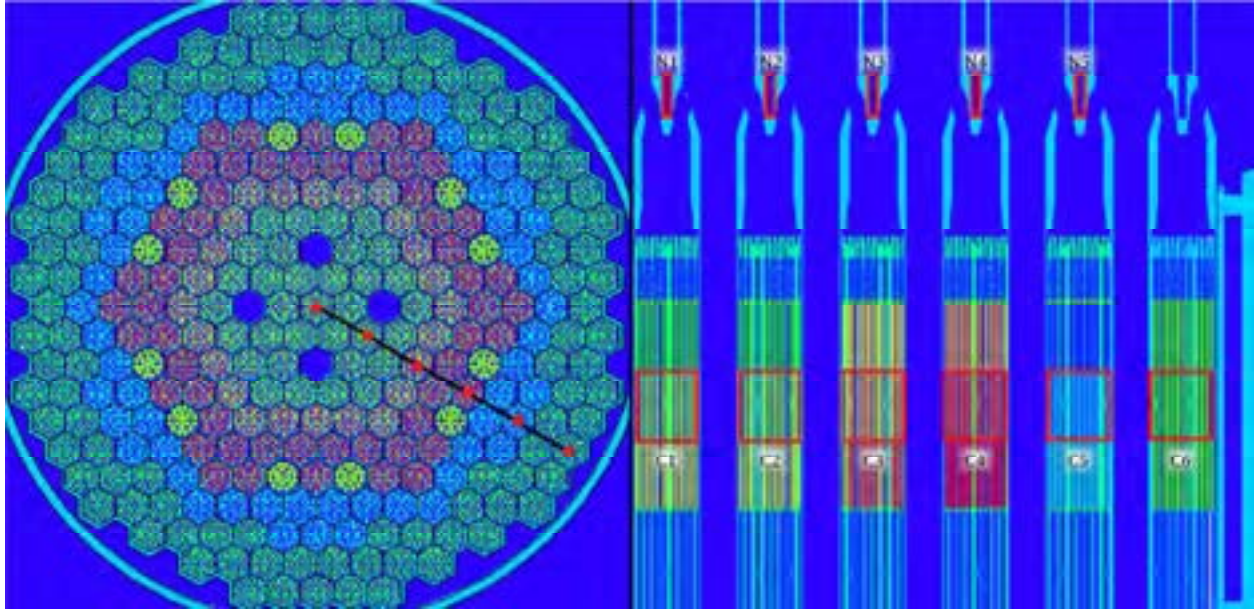


Figura 9 - Posizioni di reattore in cui si è calcolato lo spettro del flusso neutronico per mezzo di MCNPX. L'elemento #1 corrisponde al centro del reattore.

Avendo fissato come obiettivo del calcolo un flusso neutronico molto discretizzato sulla base delle energie (binning per le tally di 1-10 eV), al fine di vedere molto bene gli effetti locali delle sezioni d'urto dei materiali sul suo andamento energetico, dopo vari tentativi, non si è riusciti nell'impresa a causa della potenza limitata delle risorse di calcolo disponibili, che avrebbero imposto delle run sperimentali lunghe qualche mese ciascuna.

Questo limite è stato superato sfruttando la capacità di MCNPX di moltiplicare internamente al codice una tally f4 per una sezione d'urto, fornendo in output direttamente la media pesata sullo spettro della sezione d'urto in questione

$$\int_E \phi(E) \sigma_i(E) dE = \left| \phi \right| \int_E N(E) \sigma_i(E) dE = \left| \phi \right| \cdot \bar{\sigma}_i \quad (2)$$

In buona sostanza, quindi, si sono calcolati dei gruppi come espresso dall'equazione (2), dove MCNPX consente agevolmente si ottenere il valore finale, laddove l'informazione sulla distribuzione energetica della popolazione neutronica è comunque tenuta in considerazione, sebbene non si riesca a vedere lo spettro.

2.3 *Prontezza e capacità di penetrazione della risposta della sonda*

Essendo il nocciolo del reattore ALFRED fortemente accoppiato e considerate le sue ridotte dimensioni, si prevede che sia possibile adottare un controllo esterno, ponendo la strumentazione in corrispondenza del riflettore radiale e/o eventualmente nei *noses* degli elementi di combustibile. Ciò che occorre verificare è quanto il segnale ricavato dalla sonda sia in grado di seguire *prontamente* il reattore, oppure possa soffrire un ritardo di cui bisogna tener conto. Di per sé, lo strumento e tutta l'elettronica associata presentano un intrinseco ritardo, dovuto ai tempi della fisica, dall'istante in cui il neutrone interagisce col volume sensibile, fino all'utilizzazione del segnale elettrico corrispondente; a questo 'tempo tecnico' non vanno aggiunti ulteriori ritardi, ad esempio a causa di un posizionamento 'lontano' dello strumento.

Inoltre, oltre all'entità e all'affidabilità del segnale elettrico in uscita dalla sonda a seconda della posizione occupata, è necessario comprendere quale sia la sua *capacità di penetrazione*, ovvero la porzione del volume di reattore che essa riesce a monitorare. In altri termini, si vuole investigare i punti da cui provengono i neutroni di fissione che interagiscono con la sonda nella posizione selezionata, per comprendere la significatività del monitoraggio.

A tale proposito, si è condotto un apposito run sperimentale ($k=0.99993\pm0.00008$ con $nps=50000000$) i cui risultati sono riportati in Figura 10. Attraverso il flagging dei neutroni interagenti con una specifica posizione individuata per la strumentazione (esagono bordato di rosso in Figura 10), è possibile determinare gli elementi di combustibile da cui essi provengono, e quindi comprendere la "capacità volumetrica di monitoraggio" della sonda stessa, precedentemente intesa come *capacità di penetrazione*.

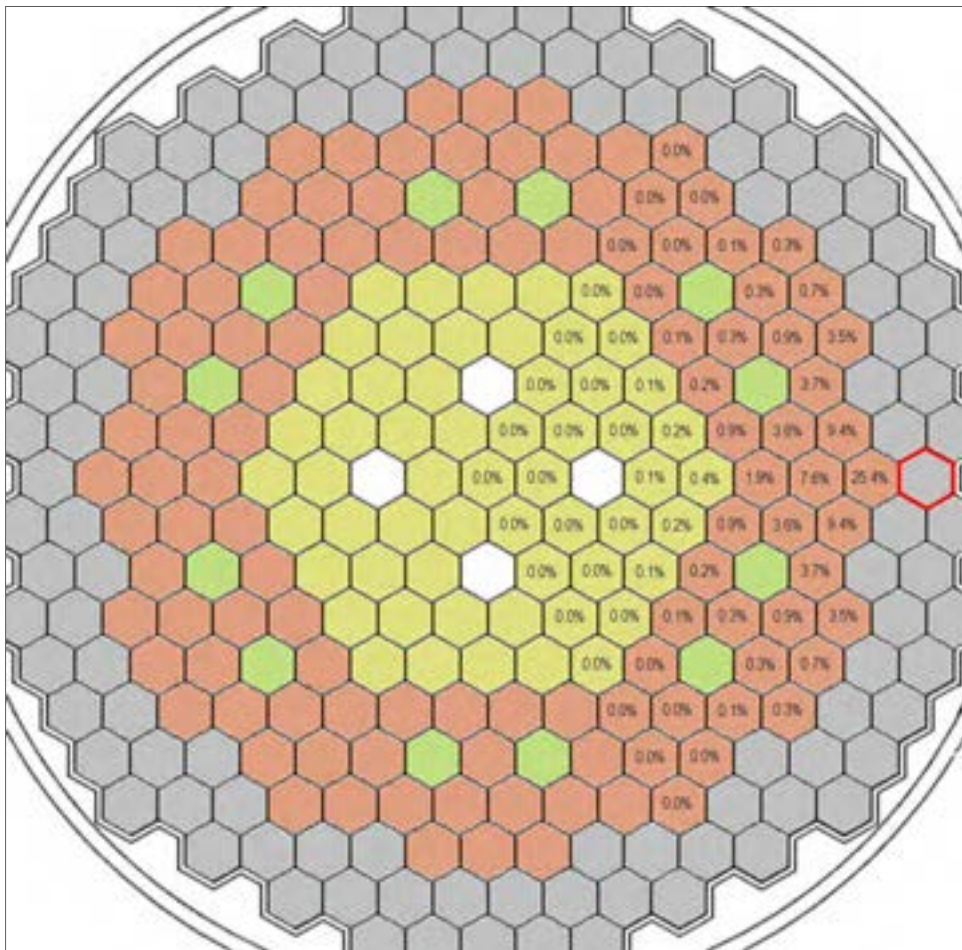


Figura 10 - Distribuzione spaziale della provenienza dei neutroni di fissione contribuenti al segnale elettrico ricavabile dalla sonda collocata nella posizione evidenziata dall'esagono bordato di rosso.
In giallo il combustibile interno, in rosso quello esterno; in verde le Control Rods e in grigio gli elementi riflettori.

È evidente che al segnale totale collezionabile dalla sonda nella posizione evidenziata in Figura 10 contribuiscono maggiormente gli elementi più vicini; via via che ci si allontana da essa, i contributi diventano sempre meno importanti, fino ad essere del tutto insignificanti nella parte più interna del nocciolo. In sostanza, lo strumento non riesce "a vedere" fin dentro il nocciolo, ma lo monitora indirettamente attraverso ciò che accade agli elementi più esterni, ovviamente influenzati da ciò che accade più internamente. Questo limite non dovrebbe risultare problematico, essendo il nocciolo progettato per essere fortemente accoppiato: eventuali escursioni di reattività nella parte più interna

dovrebbero risultare visibili anche con la strumentazione ex-core. Su un nocciolo disaccoppiato (tipicamente per *cores* di grandi dimensioni), tale parametro è da tenere fortemente in considerazione, perché indica quanto fitta deve essere la rete di strumenti -necessariamente *in-core*- atti a monitorare il nocciolo.

L'aspetto della *prontezza* della risposta in relazione alle posizioni ipotizzate per la collocazione della strumentazione di controllo e alla tipologia di sonda potenzialmente utilizzabile non è stato ancora pienamente investigato per il reattore ALFRED. Si prevede pertanto di approfondire questa analisi nel prosieguo del lavoro.

3. Valutazione delle prestazioni della strumentazione commercialmente disponibile

È possibile ora valutare le prestazioni della strumentazione commercialmente disponibile e potenzialmente applicabile al reattore ALFRED.

A parte l'aggressività chimica dell'ambiente 'piombo', il principale parametro a sfavore per quanto concerne la 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). Se poi si pensa che la strumentazione deve essere in grado di seguire -in qualche modo- anche le eventuali condizioni incidentali, il problema diventa ben più sentito visto che le temperature in condizioni avverse possono superare quelle massime previste per le sonde (attualmente, le camere a fissione ad alta temperatura arrivano al massimo a 600 °C).

Inoltre, rispetto ai reattori termici, i reattori veloci sono caratterizzati da flussi neutronici a piena potenza superiori di due ordini di grandezza (10^{16} n/(cm²s) contro 10^{14} n/(cm²s)), il che significa che la strumentazione deve seguire un range di flusso neutronico ancora più ampio, dalla potenza '0' alla potenza nominale. Le problematiche maggiori si ravvisano agli estremi della finestra: inizialmente la popolazione neutronica potrebbe risultare troppo scarsa ad ottenere segnali elettrici significativi ed affidabili per seguire la salita in potenza (presenza di una *blind window*); in prossimità della potenza nominale, l'abbondante popolazione neutronica procura segnali elettrici molto significativi, ma lo strumento è fortemente sollecitato, in termini di bombardamento neutronico, e consumo del materiale sensibile (può essere necessaria una schermatura o un riposizionamento in una collocazione più protetta).

Ciò che appare chiaro è che un singolo strumento difficilmente può esser sufficiente, sebbene i range di applicazione possano essere largamente ampi: ad esempio, alcune camere a fissione riescono a coprire una decina di decenni di escursione del flusso neutronico, combinando i funzionamenti in *pulse-mode*, *Campbelling-mode* e *current-mode*.

Considerando tutti questi aspetti, e valutando i prodotti disponibili nel mercato, si trovano adattabili alle predette condizioni operative, alcuni modelli di camere a fissione e Self Powered Neutron Detector, SPND(3)(4). Le loro capacità e prestazioni nell'ambiente reattore di interesse saranno discusse nei paragrafi successivi.

3.1 Camera a fissione

Le camere a fissione sono sostanzialmente dei condensatori come strutture elettriche, dove fra gli elettrodi si interpone un gas (argon-azoto) in cui si viene a produrre la carica che, raccolta all'anodo, da origine al segnale elettrico in uscita dallo strumento. Il materiale sensibile ai neutroni è generalmente un fissile (o anche un fertile, sebbene sia rara questa applicazione) e le particelle che causano la ionizzazione del gas sono i frammenti di fissione. A causa della cinetica della fissione nel

layer di materiale sensibile (generalmente si riveste il catodo con uno strato molto sottile di un materiale contenente fissile), per singolo evento di fissione, solo uno dei due frammenti riesce a causare creazione di coppie ioniche nel gas visto che i due frammenti sono emessi praticamente nella stessa direzione, ma in verso opposto, quindi uno ‘muore’ nel layer e l’altro ne fuoriesce (sempre che il layer non sia troppo spesso e la fissione non sia avvenuta troppo in profondità). Appare immediatamente chiaro che la configurazione e le caratteristiche del layer sensibile sono parametri chiave nelle prestazioni/sensibilità della camera a fissione.

La peculiarità delle camere a fissione risiede nell’enorme quantitativo di coppie ioniche che vengono a prodursi per singolo evento di fissione visto che i frammenti emergenti posseggono una energia cinetica di circa 70/100 MeV rispettivamente per quello leggero e quello pesante. L’abbondanza delle coppie create per singolo evento fa sì che il segnale elettrico potenzialmente collezionabile sia molto forte e ben distinguibile dal fondo, specie in *pulse-mode*.

Le camere a fissione commercialmente disponibili sfruttano generalmente ^{235}U che si dimostra sensibile ai neutroni fin dalle energie termiche; difficilmente si usano fertili perché, anche se la reazione di fissione non è una reazione a soglia, la fissione di un fertile richiede che il neutrone proiettile abbia una certa energia cinetica iniziale per poter indurre il nucleo bersaglio a fissionarsi. Nel caso del ^{238}U , ad esempio, la camera a fissione sarebbe sensibile a neutroni con energie superiori o uguali a circa 600 keV.

Diversi sono i produttori di camere a fissione sul mercato: LND Inc., Mirion Technologies – IST, GE, Thermoscientific, Centronic (5), Photonis(6)(7), ecc. e tra questi sono stati selezionati alcuni modelli che potrebbero essere applicati alle misure neutroniche del reattore ALFRED (Tabella 4).

Supplier	Product Code	Neutron Sensitivity			Diameter [mm]	Length [mm]
		Pulse [cps/nv]	MSV [$\text{A}^2\text{Hz}^{-1}/\text{nv}$]	Current [A/nv]		
Centronic	FC538	0,5 to 1,8	-	-	47,5	551
Photonis	CFUC06	1	$4 \cdot 10^{-26}$	$2 \cdot 10^{-13}$	48	412
Photonis	CFUC07	1	$4 \cdot 10^{-26}$	$2 \cdot 10^{-13}$	48	412
Photonis	CFUE32	0,001	$4 \cdot 10^{-29}$	$1 \cdot 10^{-16}$	7	150
Photonis	CFUE43	-	$3 \cdot 10^{-31}$	$7 \cdot 10^{-17}$	7	85,5

Tabella 4 - Caratteristiche di riferimento delle camere a fissione commercialmente disponibili applicabili al reattore ALFRED(5)(6)(7).

Le caratteristiche neutroniche sono riferite ad uno spettro di neutroni termici e, pertanto, vanno corrette visto lo spettro veloce del reattore.

Al fine di correggere i valori in Tabella 4 e riportarli ai valori corretti per il reattore ALFRED, si è proceduto a calcolare un fattore di correzione come di seguito spiegato.

Presa una qualsiasi camera a fissione, la sua risposta, quale che sia il modo di funzionamento risulta

$$R \propto \int_E \varphi(E) \sigma_f(E) dE \quad (3)$$

cioè proporzionale al flusso neutronico $\varphi(E)$ moltiplicato per la sezione d’urto di fissione $\sigma_f(E)$. Il flusso può essere riscritto come il suo valore assoluto $|\varphi|$ moltiplicato per la sua distribuzione energetica $N(E)$ normalizzata all’unità. Quindi,

$$R \propto \int_E \varphi(E) \sigma_f(E) dE = |\varphi| \int_E N(E) \sigma_f(E) dE = |\varphi| \cdot \bar{\sigma}_f \quad (4)$$

La risposta dello strumento è dunque proporzionale al valore assoluto del flusso neutronico $|\phi|$ e alla sezione d'urto di fissione pesata sulla distribuzione energetica dello spettro neutronico cui è esposto lo strumento.

Il fattore di correzione (ESCF, Energy Spectrum Correction Factor) per correggere i valori in Tabella 4 risulta, quindi esprimibile come il rapporto fra le sezioni d'urto mediate dello spettro veloce e dello spettro termico, rispettivamente:

$$ESCF = \frac{\int_E N_{\text{fast spectrum}}(E) \sigma_f(E) dE}{\int_E N_{\text{thermal spectrum}}(E) \sigma_f(E) dE} = \frac{\bar{\sigma}_f|_{\text{fast}}}{\bar{\sigma}_f|_{\text{thermal}}} \quad (5)$$

Variando l'energia media dello spettro localmente nel reattore, sono stati estratti diversi andamenti del flusso con l'energia e, di conseguenza, sono stati calcolati diversi fattori di correzione per diverse posizioni di reattore, così come specificato nella Figura 12. Nell'equazione (5) per il calcolo della correzione, il numeratore è stato estratto da un run appositamente predisposto sulla geometria del reattore ALFRED (run da 60100000 nps, con $k=1,00024 \pm 0,00007$). Per quanto riguarda il denominatore, esso è stato stimato supponendo uno spettro termico descrivibile attraverso una distribuzione di Maxwell-Boltzmann alla temperatura di $T=293$ K (Figura 11).

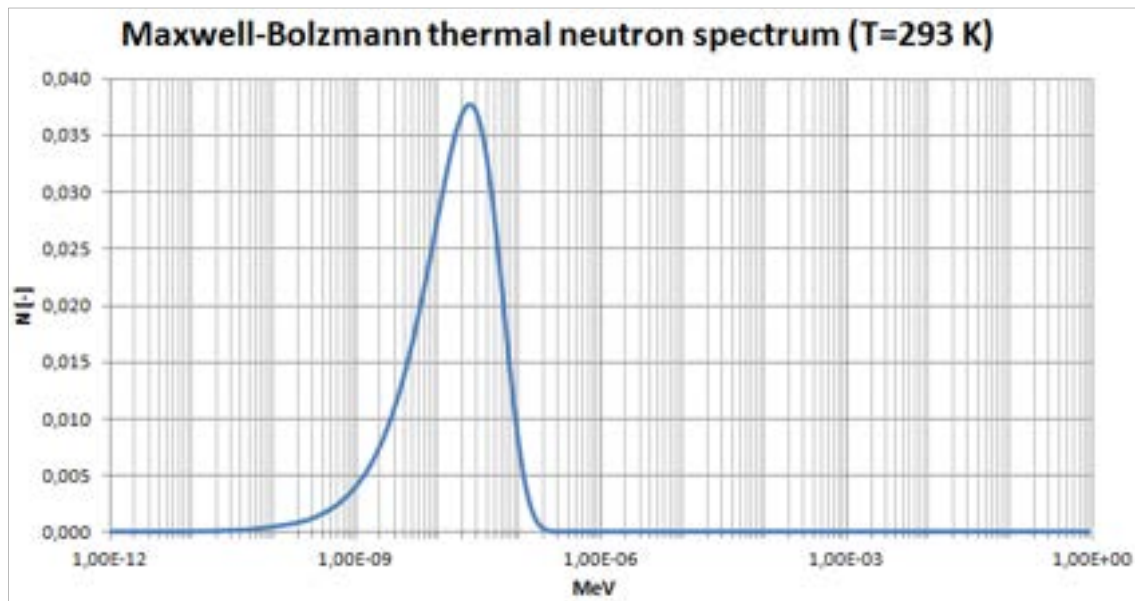


Figura 11 - Spettro termico di Maxwell-Boltzmann utilizzato per la stima del fattore di correzione nella equazione (5).

Avendo preso come riferimento il materiale sensibile di cui sono composti i layer fissili delle camere a fissione della Photonis,

	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U
% [at.]	0,99	93,0	0,08	5,94

Tabella 5 - Composizione isotopica dell'uranio utilizzato per i layer sensibili delle camere a fissione della Photonis.

il denominatore dell'equazione (5) risulta

$$\int_E N_{\text{Maxwell-Boltzmann}}(E) \sigma_f(E) dE = \bar{\sigma}_f \Big|_{\text{Maxwell-Boltzmann}} = 625,00 \pm 0,125 \text{ barn} \quad (6)$$

mentre i valori del numeratore della (5) sono stati ricavati con un run MCNPX in 12 posizioni diverse di reattore, sia in-core che out-of-core (Figura 12). In Tabella 6 si riportano i valori delle sezioni d'urto di fissione pesate sullo spettro neutronico veloce di ALFRED nelle diverse posizioni investigate, e i fattori di correzione ESCF (5).

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
σ_f [barn]	1.64	1.66	1.62	1.52	1.72	10.51	6.29	6.90	8.77	9.83	11.12	12.36
σ_{of} [barn]	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.64	0.19	0.24	0.21	0.25	0.35	0.52
$ESCF_i$ [-]	0.00262	0.00266	0.00258	0.00243	0.00274	0.01681	0.01006	0.01104	0.01404	0.01573	0.01778	0.01977
σ_{ESCF} [-]	0.00003	0.00003	0.00003	0.00004	0.00007	0.00102	0.00031	0.00038	0.00034	0.00039	0.00056	0.00083
σ_{ESCF} [%]	1.01%	1.03%	1.17%	1.75%	2.57%	6.08%	3.03%	3.48%	2.39%	2.51%	3.15%	4.21%

Tabella 6 – Valori delle sezioni d'urto di fissione del materiale in Tabella 5, pesate sullo spettro neutronico veloce di ALFRED, nelle diverse posizioni di reattore specificate in Figura 12. In corrispondenza, anche i valori della correzione ESCF da applicare alle prestazioni delle camere a fissione specificate in Tabella 4.

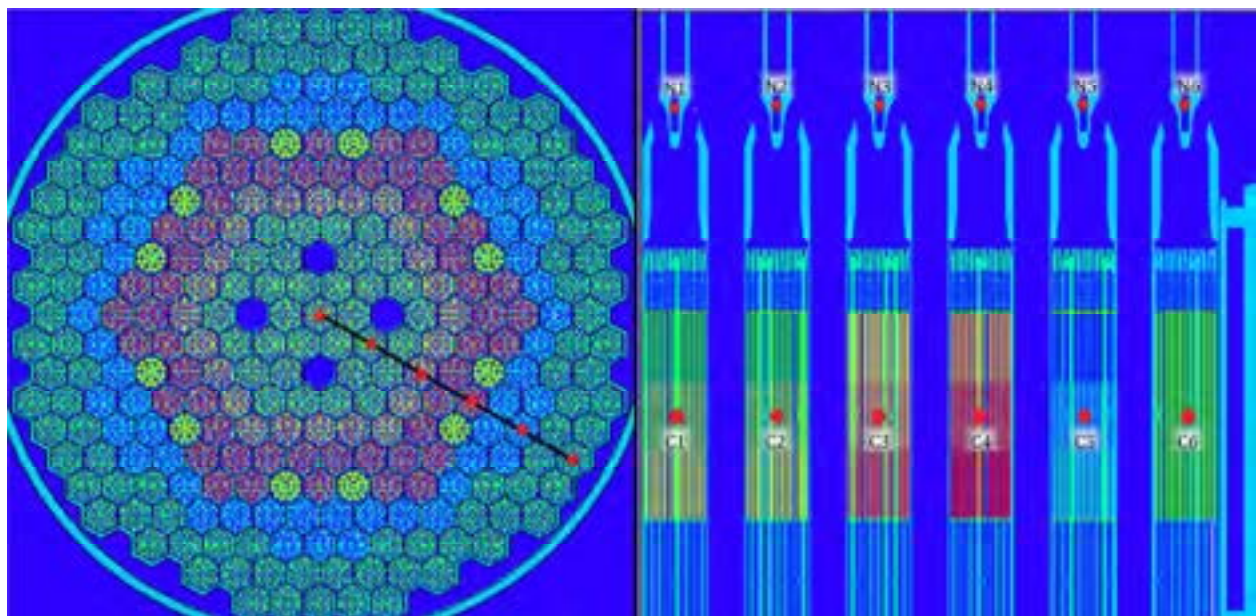


Figura 12 - Posizioni di reattore in cui sono stati calcolati i fattori di correzione da applicare alle prestazioni nominali delle camere a fissione specificate in Tabella 4. L'elemento #1 corrisponde al centro del reattore.

Come risulta evidente da Tabella 6, la variazione della correzione ESCF è significativa fra le posizioni investigate: ad esempio, fra C1 e N6 si ritrova un fattore ~8, il che dimostra che la posizione di installazione della sonda ha un impatto significativo sui segnali che proverranno da essa.

Si riportano in Tabella 7 le sensibilità corrette delle camere a fissione riportate in Tabella 4 nelle posizioni di reattore investigate. I valori barrati vogliono significare che nella posizione specificata la sonda in questione non risulta applicabile per insufficiente spazio di installazione; i valori sottolineati vogliono significare che l'applicabilità della sonda nella posizione va verificata, a causa dei vincoli funzionali e di ingombro.

Centronics FC538 corrected neutron sensitivity in different reactor positions												
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
ESCF [-]	0.00262	0.00266	0.00258	0.00243	0.00274	0.01681	0.01006	0.01104	0.01404	0.01573	0.01778	0.01977
Pulse [cps/nv]	<u>3.02E-03</u>	<u>3.06E-03</u>	<u>2.97E-03</u>	<u>2.79E-03</u>	<u>3.16E-03</u>	1.93E-02	<u>1.16E-02</u>	<u>1.27E-02</u>	<u>1.61E-02</u>	<u>1.81E-02</u>	<u>2.04E-02</u>	2.27E-02

Photonis CFUC06 corrected neutron sensitivity in different reactor positions												
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
ESCF [-]	0.00262	0.00266	0.00258	0.00243	0.00274	0.01681	0.01006	0.01104	0.01404	0.01573	0.01778	0.01977
Pulse [cps/nv]	<u>2.62E-03</u>	<u>2.66E-03</u>	<u>2.58E-03</u>	<u>2.43E-03</u>	<u>2.74E-03</u>	1.68E-02	<u>1.01E-02</u>	<u>1.10E-02</u>	<u>1.40E-02</u>	<u>1.57E-02</u>	<u>1.78E-02</u>	1.98E-02
MSV [A ² Hz ⁻¹ /nv]	<u>1.05E-28</u>	<u>1.06E-28</u>	<u>1.03E-28</u>	<u>9.71E-29</u>	<u>1.10E-28</u>	6.72E-28	<u>4.02E-28</u>	<u>4.42E-28</u>	<u>5.61E-28</u>	<u>6.29E-28</u>	<u>7.11E-28</u>	7.91E-28
Current [A/nv]	<u>5.25E-16</u>	<u>5.31E-16</u>	<u>5.17E-16</u>	<u>4.85E-16</u>	<u>5.49E-16</u>	3.36E-15	<u>2.01E-15</u>	<u>2.21E-15</u>	<u>2.81E-15</u>	<u>3.15E-15</u>	<u>3.56E-15</u>	3.95E-15

Photonis CFUC07 corrected neutron sensitivity in different reactor positions												
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
ESCF [-]	0.00262	0.00266	0.00258	0.00243	0.00274	0.01681	0.01006	0.01104	0.01404	0.01573	0.01778	0.01977
Pulse [cps/nv]	<u>2.62E-03</u>	<u>2.66E-03</u>	<u>2.58E-03</u>	<u>2.43E-03</u>	<u>2.74E-03</u>	1.68E-02	<u>1.01E-02</u>	<u>1.10E-02</u>	<u>1.40E-02</u>	<u>1.57E-02</u>	<u>1.78E-02</u>	1.98E-02
MSV [A ² Hz ⁻¹ /nv]	<u>1.05E-28</u>	<u>1.06E-28</u>	<u>1.03E-28</u>	<u>9.71E-29</u>	<u>1.10E-28</u>	6.72E-28	<u>4.02E-28</u>	<u>4.42E-28</u>	<u>5.61E-28</u>	<u>6.29E-28</u>	<u>7.11E-28</u>	7.91E-28
Current [A/nv]	<u>5.25E-16</u>	<u>5.31E-16</u>	<u>5.17E-16</u>	<u>4.85E-16</u>	<u>5.49E-16</u>	3.36E-15	<u>2.01E-15</u>	<u>2.21E-15</u>	<u>2.81E-15</u>	<u>3.15E-15</u>	<u>3.56E-15</u>	3.95E-15

Photonis CFUE32 corrected neutron sensitivity in different reactor positions												
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
ESCF [-]	0.00262	0.00266	0.00258	0.00243	0.00274	0.01681	0.01006	0.01104	0.01404	0.01573	0.01778	0.01977
Pulse [cps/nv]	<u>2.62E-06</u>	<u>2.66E-06</u>	<u>2.58E-06</u>	<u>2.43E-06</u>	<u>2.74E-06</u>	1.68E-05	<u>1.01E-05</u>	<u>1.10E-05</u>	<u>1.40E-05</u>	<u>1.57E-05</u>	<u>1.78E-05</u>	1.98E-05
MSV [A ² Hz ⁻¹ /nv]	<u>1.05E-31</u>	<u>1.06E-31</u>	<u>1.03E-31</u>	<u>9.71E-32</u>	<u>1.10E-31</u>	6.72E-31	<u>4.02E-31</u>	<u>4.42E-31</u>	<u>5.61E-31</u>	<u>6.29E-31</u>	<u>7.11E-31</u>	7.91E-31
Current [A/nv]	<u>2.62E-19</u>	<u>2.66E-19</u>	<u>2.58E-19</u>	<u>2.43E-19</u>	<u>2.74E-19</u>	1.68E-18	<u>1.01E-18</u>	<u>1.10E-18</u>	<u>1.40E-18</u>	<u>1.57E-18</u>	<u>1.78E-18</u>	1.98E-18

Photonis CFUE43 corrected neutron sensitivity in different reactor positions												
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
ESCF [-]	0.00262	0.00266	0.00258	0.00243	0.00274	0.01681	0.01006	0.01104	0.01404	0.01573	0.01778	0.01977
MSV [A ² Hz ⁻¹ /nv]	<u>7.87E-34</u>	<u>7.97E-34</u>	<u>7.75E-34</u>	<u>7.28E-34</u>	<u>8.23E-34</u>	5.04E-33	<u>3.02E-33</u>	<u>3.31E-33</u>	<u>4.21E-33</u>	<u>4.72E-33</u>	<u>5.33E-33</u>	5.93E-33
Current [A/nv]	<u>1.84E-19</u>	<u>1.86E-19</u>	<u>1.81E-19</u>	<u>1.70E-19</u>	<u>1.92E-19</u>	1.18E-18	<u>7.04E-19</u>	<u>7.73E-19</u>	<u>9.82E-19</u>	<u>1.10E-18</u>	<u>1.24E-18</u>	1.38E-18

Tabella 7 – Sensibilità corrette delle camere a fissione riportate in Tabella 4 per le diverse posizioni di reattore investigate del reattore ALFRED (Figura 12). I valori barrati vogliono significare che nella posizione specificata la sonda in questione non risulta applicabile per insufficiente spazio di installazione; i valori sottolineati vogliono significare che l'applicabilità della sonda nella posizione va verificata, a causa dei vincoli funzionali e di ingombro.

3.2 Self Powered Neutron Detector

I SPND assumono sempre una struttura elettrica simile ad un condensatore, dove l'elettrodo interno è costituito da un opportuno materiale sensibile ai neutroni; tra l'elettrodo esterno e il materiale sensibile ai neutroni (generalmente rodio o vanadio) è interposto un isolante.

Si basano sul principio dell'attivazione neutronica di opportuni materiali, la cui interazione coi neutroni produce radionuclidi β -emettitori; le cariche prodotte dal decadimento β (proporzionali al rateo di interazione dei neutroni) costituiscono il segnale elettrico ricavabile dallo strumento.

Uno dei grandi vantaggi di questa categoria è la non necessità dell'alimentazione esterna per la creazione di un campo elettrico che metta in moto le cariche; il movimento è assicurato dal Q-valore delle reazione di decadimento. Hanno tuttavia problemi concernenti le dimensioni, poiché per collezionare un segnale sufficientemente forte è necessario esporre al flusso neutronico quantità di materiale sensibile non indifferenti e ciò comporta un ingombro intrinseco dello strumento.

Una variante dei SPND classici è costituita dalla classe che sfrutta le reazioni (n,γ), ove i fotoni prodottisi per attivazione del materiale sensibile sono sfruttati per produrre carica elettrica a valle delle interazioni fotoelettriche, Compton e creazione di coppie. In questo caso sono generalmente utilizzati afnio e cobalto.

Dal punto di vista del controllo di reattore, i SPND hanno un problema fondamentale: il tempo di risposta. Le versioni basate sul decadimento β, presentano un ritardo intrinseco dovuto al tempo di dimezzamento del nuclide prodottosi per attivazione del materiale sensibile. Quelli basati sulle emissioni gamma dei radionuclidi prodottisi per attivazione sono più pronti, perché nella cattura radiativa l'emissione dei gamma è sufficientemente immediata; essendo però questi ultimi basati sull'interazione dei fotoni, sono più suscettibili di influenza dal fondo gamma del reattore ed avranno un limite inferiore di accettabilità del segnale di corrente più elevato di quelli basati sul decadimento beta.

		Emitter Composition		Activation cross section [barn]	Useful nuclide after activation	T _{1/2}	Response time	Melting point [°C]
β decay-based SPND	V	⁵⁰ V	0,24%	100	⁵¹ V	stable	delayed	1910
		⁵¹ V	99,76%	4,9	⁵² V	3,76 min		
	Rh	¹⁰³ Rh	100%	11 (8%) 135 (92%)	^{104m} Rh ¹⁰⁴ Rh	4,4 min 42 s	delayed	1964
prompt γ-emission based SPND	Ag	¹⁰⁷ Ag	51,82%	35	¹⁰⁸ Ag	2,42 min	delayed	961,78
		¹⁰⁹ Ag	48,18%	93	¹¹⁰ Ag	24,4 s		
	Co	⁵⁹ Co	100%	37	⁶⁰ Co	5,27 y	prompt	1495
	HfO ₂	¹⁷⁴ Hf	0,18%	390	¹⁷⁵ Hf	70 day	prompt	2758
		¹⁷⁶ Hf	5,20%	15	^{177m} Hf	51,4 min		
		¹⁷⁷ Hf	18,50%	180	^{178m} Hf	31 y		
		¹⁷⁸ Hf	27,14%	75	^{179m} Hf	25,1 day		
		¹⁷⁹ Hf	13,75%	65	^{180m} Hf	5,5 h		
		¹⁸⁰ Hf	35,23%	14	^{181m} Hf	42,4 day		
	Pt	¹⁹² Pt	0,78%	14	^{193m} Pt	4,3 day	prompt	1768,4
		¹⁹⁴ Pt	32,90%	2	^{195m} Pt	4,1 day		
		¹⁹⁵ Pt	33,80%	24	¹⁹⁶ Pt	stable		
		¹⁹⁶ Pt	25,30%	1	^{197m} Pt	1,3 h		
		¹⁹⁸ Pt	7,22%	4	¹⁹⁹ Pt	30,8 min		

Tabella 8 - Caratteristiche dei materiali sensibili generalmente impiegati nei Self Powered Neutron Detector.

Diversi sono i produttori di SPND sul mercato: KWD Nuclear Instrument(8), ARi Industries(9), Thermocoax,ecc. e tra questi sono stati selezionati alcuni modelli che potrebbero essere applicati alle misure neutroniche del reattore ALFRED (Tabella 9). Si procederà allo studio dei primi sei strumenti, di cui si ha un riferimento certo circa il fornitore; si riportano anche le caratteristiche della strumentazione tipicamente utilizzata per i reattori LWR, a titolo di completezza.

Supplier	Model	Neutron Sensitivity [A/nv]	Emitter dimensions [mm]	Overall dimensions [mm]	Thermal burn-up [%/month/nv]
KWD Instruments	5503-V-100	$5,1 \cdot 10^{-21}$	D=2; L=100	D=3,5	$1,2 \cdot 10^{-15}$
KWD Instruments	5503-Rh-50	$8,7 \cdot 10^{-21}$	D=0,7; L=50	D=2,5	$3,9 \cdot 10^{-14}$
KWD Instruments	5503-Co-210	$5,4 \cdot 10^{-21}$	D=2; L=210	D=3,7	$1,0 \cdot 10^{-14}$
ARi Industries	V-type	$1,54 \cdot 10^{-21}$	D=0,5; L=200	D=1,5	$1,3 \cdot 10^{-15}$
ARi Industries	Rh-type	$2,4 \cdot 10^{-20}$	D=0,5; L=200	D=1,5	$2,3 \cdot 10^{-14}$
ARi Industries	Co-type	$3,2 \cdot 10^{-22}$	D=0,5; L=200	D=1,5	$1,0 \cdot 10^{-14}$
-	V-type	$4,8 \cdot 10^{-21}$	D=2,0; L=100	D=3,5	$1,0 \cdot 10^{-15}$
-	Rh-type	$3,6 \cdot 10^{-20}$	D=0,46; L=400	D=1,57	$3,9 \cdot 10^{-14}$
-	Co-type	$5,4 \cdot 10^{-21}$	D=2,0; L=210	D=3,5	$9,0 \cdot 10^{-15}$
-	Hf-type	$7,9 \cdot 10^{-21}$	D=1,24; L=700	D=3,0	$3,0 \cdot 10^{-14}$
-	Ag-type	$42 \cdot 10^{-21}$	D=0,65; L=700	D=3,0	$1,6 \cdot 10^{-14}$
-	Pt-type	$2,5 \cdot 10^{-23}$	D=0,51; L=305	D=1,6	$3,0 \cdot 10^{-15}$

Tabella 9 - Caratteristiche di riferimento dei SPND commercialmente disponibili applicabili al reattore ALFRED. Gli strumenti di cui non è specificato il fornitore sono quelli tipicamente utilizzati per i reattori LWR(8)(9).

Le caratteristiche neutroniche sono riferite ad uno spettro di neutroni termici e, pertanto, vanno corrette visto lo spettro veloce del reattore.

Al fine di correggere i valori in Tabella 4 e riportarli ai valori corretti per il reattore ALFRED, si è calcolato un fattore di correzione, come per le camere a fissione. Stando la notazione utilizzata in precedenza, la risposta dello strumento risulta

$$R \propto \int_E \phi(E) \sigma_{(n,\gamma)}(E) dE \quad (7)$$

cioè proporzionale al flusso neutronico $\phi(E)$ moltiplicato per la sezione d'urto di cattura radiativa $\sigma_{(n,\gamma)}(E)$. Esattamente come realizzato in precedenza, ipotizzando una distribuzione Maxwelliana per i neutroni termici (Figura 11), si approda alla correzione

$$ESCF = \frac{\int_E N_{\text{fast spectrum}}(E) \sigma_{(n,\gamma)}(E) dE}{\int_E N_{\text{Maxwell-Boltzmann}}(E) \sigma_{(n,\gamma)}(E) dE} = \frac{\bar{\sigma}_{(n,\gamma)}|_{\text{fast}}}{\bar{\sigma}_{(n,\gamma)}|_{\text{Maxwell-Boltzmann}}} \quad (8)$$

che andrà qui calcolata per ognuno dei materiali in Tabella 8, ed in tutte le posizioni investigate in Figura 12.

Un run appositamente predisposto ha fornito i denominatori (9) da introdurre nell'equazione (8).

$$\begin{aligned}
\int_E N_{\text{Maxwell-Boltzmann}}(E) \sigma_{(n,\gamma)}^V(E) dE &= \bar{\sigma}_{(n,\gamma)}^V \Big|_{\text{Maxwell-Boltzmann}} = 5,748 \pm 0,001 \text{ barn} \\
\int_E N_{\text{Maxwell-Boltzmann}}(E) \sigma_{(n,\gamma)}^{\text{Rh}}(E) dE &= \bar{\sigma}_{(n,\gamma)}^{\text{Rh}} \Big|_{\text{Maxwell-Boltzmann}} = 166,369 \pm 0,037 \text{ barn} \\
\int_E N_{\text{Maxwell-Boltzmann}}(E) \sigma_{(n,\gamma)}^{\text{Ag}}(E) dE &= \bar{\sigma}_{(n,\gamma)}^{\text{Ag}} \Big|_{\text{Maxwell-Boltzmann}} = 72,620 \pm 0,016 \text{ barn} \\
\int_E N_{\text{Maxwell-Boltzmann}}(E) \sigma_{(n,\gamma)}^{\text{Co}}(E) dE &= \bar{\sigma}_{(n,\gamma)}^{\text{Co}} \Big|_{\text{Maxwell-Boltzmann}} = 42,594 \pm 0,010 \text{ barn} \\
\int_E N_{\text{Maxwell-Boltzmann}}(E) \sigma_{(n,\gamma)}^{\text{Hf}}(E) dE &= \bar{\sigma}_{(n,\gamma)}^{\text{Hf}} \Big|_{\text{Maxwell-Boltzmann}} = 119,497 \pm 0,027 \text{ barn} \\
\int_E N_{\text{Maxwell-Boltzmann}}(E) \sigma_{(n,\gamma)}^{\text{Pt}}(E) dE &= \bar{\sigma}_{(n,\gamma)}^{\text{Pt}} \Big|_{\text{Maxwell-Boltzmann}} = 11,530 \pm 0,003 \text{ barn}
\end{aligned} \tag{9}$$

Di seguito si riportano i fattori di correzione calcolati attraverso la (8) nelle 12 posizioni di reattore investigate (Figura 12), per i materiali sensibili dei SPND individuati in Tabella 9.

		C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
V	$\sigma_{(n,\gamma)}$ [b]	0,0191	0,0199	0,0188	0,0154	0,0188	0,0992	0,0608	0,0627	0,0792	0,0901	0,0975	0,1088
	$\sigma_{\sigma(n,\gamma)}$ [b]	0,0003	0,0003	0,0004	0,0005	0,0006	0,0042	0,0014	0,0014	0,0014	0,0017	0,0023	0,0034
	ESCFi [-]	0,0033	0,0035	0,0033	0,0027	0,0033	0,0173	0,0106	0,0109	0,0138	0,0157	0,0170	0,0189
	σ_{ESCF} [-]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0007	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003	0,0004	0,0006
	σ_{ESCF} [%]	1,52%	1,56%	2,05%	3,09%	3,35%	4,19%	2,33%	2,21%	1,81%	1,89%	2,36%	3,15%
Rh	$\sigma_{(n,\gamma)}$ [b]	0,5152	0,5252	0,5088	0,4240	0,5121	12,6044	6,2350	6,6596	11,8909	15,3562	15,8512	19,9413
	$\sigma_{\sigma(n,\gamma)}$ [b]	0,0078	0,0083	0,0098	0,0100	0,0232	1,7595	0,6554	0,6961	0,8818	1,1264	1,3089	2,1346
	ESCFi [-]	0,0031	0,0032	0,0031	0,0025	0,0031	0,0758	0,0375	0,0400	0,0715	0,0923	0,0953	0,1199
	σ_{ESCF} [-]	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0106	0,0039	0,0042	0,0053	0,0068	0,0079	0,0128
	σ_{ESCF} [%]	1,51%	1,58%	1,92%	2,36%	4,54%	13,96%	10,51%	10,45%	7,42%	7,34%	8,26%	10,70%
Co	$\sigma_{(n,\gamma)}$ [b]	0,0252	0,0364	0,0324	0,0203	0,1368	3,6512	2,1221	2,5964	3,7520	3,7866	4,0823	4,9764
	$\sigma_{\sigma(n,\gamma)}$ [b]	0,0010	0,0085	0,0061	0,0008	0,0634	0,5158	0,1705	0,2148	0,2413	0,2294	0,2979	0,5549
	ESCFi [-]	0,0006	0,0009	0,0008	0,0005	0,0032	0,0857	0,0498	0,0610	0,0881	0,0889	0,0958	0,1168
	σ_{ESCF} [-]	0,0000	0,0002	0,0001	0,0000	0,0015	0,0121	0,0040	0,0050	0,0057	0,0054	0,0070	0,0130
	σ_{ESCF} [%]	4,14%	23,33%	18,79%	3,78%	46,35%	14,13%	8,03%	8,27%	6,43%	6,06%	7,30%	11,15%

Tabella 10 – Valori delle sezioni d’urto di cattura radiativa dei materiali in Tabella 8, pesate sullo spettro neutronico veloce di ALFRED, nelle diverse posizioni di reattore specificate in Figura 12. In corrispondenza, anche i valori della correzione ESCF da applicare alle prestazioni dei SPND specificati in Tabella 9.

Come risulta evidente da Tabella 10, la variazione della correzione ESCF è significativa fra le posizioni investigate: spostandosi da C1 e N6 si ritrovano differenze anche oltre un fattore 10, il che dimostra che la posizione di installazione della sonda ha un forte impatto sui segnali che proverranno da essa. Le differenze sono più sentite rispetto ai valori calcolati per le camere a fissione perché sono maggiormente coinvolte le strutture di risonanza delle sezioni d’urto di cattura (n,γ); ciò si è riflesso anche nel maggiore tempo di calcolo che è stato necessario per ridurre gli errori a valori accettabili, sebbene qualcuno di essi ecceda ancora i limiti consentiti (posizione C5 per il cobalto): questa specifica simulazione ha richiesto un run da 100000000 nps, con risultato $k=1,00028 \pm 0,00005$. Si riportano in Tabella 11 le sensitività corrette di alcuni dei SPND riportati in Tabella 9 nelle posizioni di reattore investigate.

KWD 5503-V-100												
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
ESCF [-]	0,0033	0,0035	0,0033	0,0027	0,0033	0,0173	0,0106	0,0109	0,0138	0,0157	0,0170	0,0189
Current [A/nv]	1,69E-23	1,76E-23	1,67E-23	1,37E-23	1,67E-23	8,80E-23	5,39E-23	5,56E-23	7,03E-23	8,00E-23	8,65E-23	9,65E-23

ARi Industries V-type 0.5mm emitter diameter and L=20cm (and 1.5 mm diameter sheath)												
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
ESCF [-]	0,0033	0,0035	0,0033	0,0027	0,0033	0,0173	0,0106	0,0109	0,0138	0,0157	0,0170	0,0189
Current [A/nv]	5,11E-24	5,32E-24	5,04E-24	4,13E-24	5,03E-24	2,66E-23	1,63E-23	1,68E-23	2,12E-23	2,42E-23	2,61E-23	2,91E-23

KWD 5503-Rh-50												
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
ESCF [-]	0,0031	0,0032	0,0031	0,0025	0,0031	0,0758	0,0375	0,0400	0,0715	0,0923	0,0953	0,1199
Current [A/nv]	2,69E-23	2,75E-23	2,66E-23	2,22E-23	2,68E-23	6,59E-22	3,26E-22	3,48E-22	6,22E-22	8,03E-22	8,29E-22	1,04E-21

ARi Industries Rh-type 0.5mm emitter diameter and L=20cm (and 1.5 mm diameter sheath)												
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
ESCF [-]	0,0031	0,0032	0,0031	0,0025	0,0031	0,0758	0,0375	0,0400	0,0715	0,0923	0,0953	0,1199
Current [A/nv]	7,43E-23	7,58E-23	7,34E-23	6,12E-23	7,39E-23	1,82E-21	8,99E-22	9,61E-22	1,72E-21	2,22E-21	2,29E-21	2,88E-21

KWD 5503-Co-210												
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
ESCF [-]	0,0006	0,0009	0,0008	0,0005	0,0032	0,0857	0,0498	0,0610	0,0881	0,0889	0,0958	0,1168
Current [A/nv]	3,20E-24	4,62E-24	4,11E-24	2,58E-24	1,73E-23	4,63E-22	2,69E-22	3,29E-22	4,76E-22	4,80E-22	5,18E-22	6,31E-22

ARi Industries Co-type 0.5mm emitter diameter and L=20cm (and 1.5 mm diameter sheath)												
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
ESCF [-]	0,0006	0,0009	0,0008	0,0005	0,0032	0,0857	0,0498	0,0610	0,0881	0,0889	0,0958	0,1168
Current [A/nv]	1,89E-25	2,74E-25	2,43E-25	1,53E-25	1,03E-24	2,74E-23	1,59E-23	1,95E-23	2,82E-23	2,84E-23	3,07E-23	3,74E-23

Tabella 11 – Sensitività corrette di alcuni dei SPND riportati in Tabella 9 Tabella 4 per le diverse posizioni di reattore investigate del reattore ALFRED (Figura 12).

4. Analisi della risposta della strumentazione neutronica commercialmente disponibile

In questo paragrafo sarà verificata l'applicabilità della strumentazione attualmente commercialmente disponibile alla misura del flusso neutronico, in termini di affidabilità del segnale elettrico ricavato dalle sonde nelle diverse modalità di funzionamento. Per tutti gli strumenti esiste, difatti, un limite inferiore al di sotto del quale il segnale elettrico in uscita non risulta accettabile poiché il rapporto segnale/rumore è troppo basso, le interferenze diventano predominanti e la sonda diviene incapace di seguire il fenomeno in monitoraggio. Analogamente, esistono limiti superiori imposti dal 'consumo' eccessivo dello strumento o fenomeni di saturazione.

4.1 Analisi della risposta delle camere a fissione

Di seguito sarà studiata la risposta delle camere a fissione commercialmente disponibili, ai diversi livelli di potenza del reattore, andando a investigare in quali range gli strumenti diventano insufficienti a seguire l'evoluzione della reazione a catena nella salita dalla potenza "0" alla potenza nominale.

4.1.1 Limiti di rivelazione per le camere a fissione.

Le camere a fissione possono operare in tre diverse modalità, a seconda del termine sorgente.

Il *Pulse mode*, è generalmente utilizzato per popolazioni neutroniche di scarsa entità, poiché l'intervallo di rivelazione, in termini di impulsi in uscita, risulta andare da 10 cps (count per second) fino ad un massimo di 10^6 cps. Oltre non si riesce ad ottenere perché lo strumento perderebbe la proporzionalità diretta con il flusso neutronico che si intende monitorare. In questa modalità di funzionamento, si ha una intrinseca discriminazione del fondo gamma e del fondo α derivante dal layer di fissile, oltre che del fondo gamma di reattore, visto l'elevato Q-valore della reazione di fissione, che rende l'impulso elettrico connesso estremamente facile da discriminare. Elevati flussi gamma possono comunque essere di disturbo per l'elettronica di preamplificazione/amplificazione¹ e conteggio visto che complicano notevolmente il treno d'impulsi da analizzare: ne segue che più è elevato il fondo gamma, più si riduce il rateo di conteggio massimo misurabile dalla camera senza che essa perda la proporzionalità col flusso neutronico. Le camere a fissione della Photonis, ad esempio, supportano un rateo di dose gamma massimo di 10^4 Gy/h.

Il *Campbell mode* (o *MSV*, *Mean Square Voltage*) e il *Current mode* sono utilizzati tipicamente nei reattori, dove il flusso neutronico elevato impedisce in breve tempo di operare lo strumento in pulse mode. A seconda della tipologia di reattore e della taglia, infatti, il pulse mode potrebbe essere in grado di monitorare al massimo la potenza "0" e le prime decadi di evoluzione del flusso neutronico; successivamente occorre passare al *MSV* per le decadi centrali e al *Current mode* in prossimità dei livelli di potenza nominale. I principali problemi che si ritrovano nei funzionamenti in *dc* (*direct current*) riguardano la significatività del segnale di corrente che si deriva dallo strumento, vista la presenza di alcuni effetti di disturbo come:

- *alpha current*: è la porzione del segnale in corrente che viene provocata dalla ionizzazione del gas indotta dalle particelle α emergenti dal layer fissile;
- *gamma current*: è la porzione del segnale in corrente che viene provocata dalla ionizzazione indiretta del gas da parte dei fotoni che interagiscono con la camera, sia che essi provengano dall'ambiente reattore, sia che siano originati dal decadimento dei prodotti di fissione incapsulati nel layer fissile, la cui percentuale va incrementandosi via via che cresce l'utilizzazione e, quindi, il burn-up della camera;
- *leakage current*: è la porzione del segnale in corrente dovuta alle perdite ohmiche dell'isolante che separa gli elettrodi dello strumento. Le qualità isolanti dell'allumina (Al_2O_3) generalmente utilizzate peggiorano rapidamente con l'aumentare della temperatura: a 600°C la *leakage current* può essere 10^4 volte superiore del corrispondente valore a 20°C .

Per gli effetti appena discussi, esiste un limite inferiore al segnale di corrente portante informazione sul flusso neutronico ricavabile dallo strumento. Al di sopra di questo limite, la corrente ricavata dallo strumento è proporzionale al rateo di fissione nel layer sensibile e, quindi, al flusso neutronico.

Per effetti di crescita della densità di carica nel gas man mano che aumenta il rateo degli eventi di ionizzazione, si ha anche un limite superiore al segnale di corrente ricavabile: difatti, superato un certo valore di interazioni nella camera, si hanno effetti secondari che ostacolano la corretta raccolta degli elettroni all'anodo e questo implica una perdita di proporzionalità del segnale elettrico con il flusso neutronico.

¹ Quand'anche si ottenga una risoluzione temporale migliore per l'elettronica associata alla camera a fissione, non è possibile ampliare il range dell'utilizzo in pulse mode se non si riduce il '*collection time*' degli elettroni nella camera.

Questi limiti sono propri di ogni strumento e dipendono dalla geometria, dalla tensione esterna applicata e dalla sensitività della camera, nonché dalle capacità dell'elettronica. La Tabella 12 riporta i limiti di utilizzo in *dc* per alcune delle camere a fissione evidenziate precedentemente.

	<i>MSV mode</i>		<i>Current mode</i>	
	lower limit [A ² /Hz]	upper limit [A ² /Hz]	lower limit [A]	upper limit [A]
CFUC06 ²	N.D.	N.D.	7·10 ⁻⁵	N.D.
CFUC07 ²	N.D.	N.D.	7·10 ⁻⁵	N.D.
CFUE32	4·10 ⁻²²	1,2·10 ⁻¹⁶	1·10 ⁻⁷	1·10 ⁻³
CFUE43	6·10 ⁻²²	4,5·10 ⁻¹⁸	1,4·10 ⁻⁷	1,05·10 ⁻³

Tabella 12 - Limiti di rivelazione in *MSV mode* e *Current mode* per alcune delle camere a fissione commercialmente disponibili(6)(7).

La camera a fissione ideale dovrebbe essere in grado di coprire tutte le decadi del flusso neutronico, dalla potenza '0' fino alla potenza nominale, attraverso le diverse modalità di esercizio. Tuttavia, far funzionare lo strumento in tutte le modalità richiede che si scenda a compromessi perché ciascun modo richiederebbe una ottimizzazione di per sé. Uno dei problemi più significativi risiede nella pressione di esercizio del gas nella camera: il *pulse mode* e il *MSV mode* richiederebbero una elevata pressione per raggiungere le migliori prestazioni; il *current mode* richiede una pressione inferiore, per evitare un eccessivo addensamento di carica che influisce sul limite superiore di rivelazione. Una possibilità di miglioramento può essere costituita da una camera "a doppia pressione", con due sezioni separate, a pressioni diverse.

4.1.2 Analisi del segnale proveniente dalle camere a fissione a diversi livelli di potenza

Avendo delineato nel paragrafo precedente i limiti di applicazione delle camere a fissione potenzialmente utilizzabili nel reattore ALFRED, si vuole ora andare a verificarne il comportamento operativo nelle diverse condizioni di esercizio, evidenziando per ogni strumento i range di applicabilità di ciascuna delle modalità di funzionamento.

L'obiettivo è quello di mostrare eventuali criticità nel monitoraggio del reattore con i detti strumenti, scoprendo se possano esser sufficienti, oppure sia necessario provvedere a sviluppare una categorie di sonde 'ad hoc' per i reattori refrigerati a piombo.

Di seguito, le Tabella 14, Tabella 15, Tabella 16, Tabella 17 e Tabella 18 riportano (rispettivamente per gli strumenti FC538, CFUC06, CFUC07, CFUE32, CFUE43) le risposte delle sonde nelle diverse posizioni investigate, per i diversi livelli di potenza del reattore, calcolate attraverso la (10).

La risposta, R , è stata ottenuta moltiplicando il flusso neutronico, φ , nella posizione i -sima al livello di potenza j -simo per la sensitività, S , dello strumento nella posizione i -sima, nella modalità di funzionamento m -sima.

$$R_{i,j,m} = \varphi_{i,j} \cdot S_{i,m} \quad (10)$$

² Per questi strumenti non sono disponibili i range di applicabilità dei *MSV* e *Current mode*. Si può inferire il limite inferiore del *current mode* dalla sensitività gamma della camera, ipotizzando un irraggiamento gamma pari al massimo tollerabile dallo strumento (10⁴Gy/h).

I flussi neutronici locali (calcolati attraverso MCNPX) sono riportati in Tabella 13; le sensitività degli strumenti, differenziate per posizione e modalità di funzionamento delle camere a fissione sono riportate precedentemente nella Tabella 7.

Ulteriore parametro da tenere in considerazione è la durata dello strumento, corrispondente ad una riduzione ammissibile della sensitività della sonda: chiaramente, la durata dipende dal valore del flusso neutronico incidente, visto che il limite è generalmente espresso in fluenza. 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 $ESCF_i$ (Tabella 6) calcolati in precedenza. Attraverso la conoscenza del flusso neutronico $\phi_{i,j}$ nella posizione i-sima e al livello di potenza j-simo, possono calcolarsi i tempi come segue

$$t_{i,j} = \frac{E_{th} / ESCF_i}{\phi_{i,j}} \quad (11)$$

In Tabella 19 si riportano i tempi di durata delle camere a fissione analizzate nelle posizioni i-sime, ad alcuni dei j-simi livelli di potenza. Questi valori sono da intendersi dei limiti superiori, in quanto sono calcolati tenendo solo conto del consumo del fissile nello strumento. Avendo a che fare con flussi neutronici veloci, le sonde potrebbero soffrire di un danneggiamento eccessivo (dovuto all'elevata energia dei neutroni) che potrebbe pregiudicarne le prestazioni e, quindi, la durata.

	Local neutron flux [n/cm ² s]											
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
1 W	1.14E+10	1.06E+07	8.38E+06	3.48E+06	2.39E+06	9.32E+05	6.78E+05	6.20E+05	8.72E+05	7.45E+05	4.57E+05	2.47E+05
1 kW	1.14E+07	1.06E+07	8.38E+06	3.48E+06	2.39E+06	9.32E+05	6.78E+05	6.20E+05	8.72E+05	7.45E+05	4.57E+05	2.47E+05
50 kW	5.69E+11	5.28E+11	4.19E+11	1.74E+11	1.19E+11	4.66E+10	3.39E+10	3.10E+10	4.36E+10	3.72E+10	2.28E+10	1.24E+10
100 kW	1.14E+12	1.06E+12	8.38E+11	3.48E+11	2.39E+11	9.32E+10	6.78E+10	6.20E+10	8.72E+10	7.45E+10	4.57E+10	2.47E+10
500 kW	5.69E+12	5.28E+12	4.19E+12	1.74E+12	1.19E+12	4.66E+11	3.39E+11	3.10E+11	4.36E+11	3.72E+11	2.28E+11	1.24E+11
1 MW	1.14E+13	1.06E+13	8.38E+12	3.48E+12	2.39E+12	9.32E+11	6.78E+11	6.20E+11	8.72E+11	7.45E+11	4.57E+11	2.47E+11
10 MW	1.14E+14	1.06E+14	8.38E+13	3.48E+13	2.39E+13	9.32E+12	6.78E+12	6.20E+12	8.72E+12	7.45E+12	4.57E+12	2.47E+12
50 MW	5.69E+14	5.28E+14	4.19E+14	1.74E+14	1.19E+14	4.66E+13	3.39E+13	3.10E+13	4.36E+13	3.72E+13	2.28E+13	1.24E+13
100 MW	1.14E+15	1.06E+15	8.38E+14	3.48E+14	2.39E+14	9.32E+13	6.78E+13	6.20E+13	8.72E+13	7.45E+13	4.57E+13	2.47E+13
200 MW	2.28E+15	2.11E+15	1.68E+15	6.96E+14	4.78E+14	1.86E+14	1.36E+14	1.24E+14	1.74E+14	1.49E+14	9.13E+13	4.94E+13
300 MW	3.42E+15	3.17E+15	2.51E+15	1.04E+15	7.17E+14	2.79E+14	2.03E+14	1.86E+14	2.62E+14	2.23E+14	1.37E+14	7.42E+13

Tabella 13 - Flusso neutronico locale nelle posizioni investigate (Figura 12) per l'installazione delle sonde di monitoraggio.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Pulse [cps]	Pulse [cps]	Pulse [cps]	Pulse [cps]	Pulse [cps]	Pulse [cps]
1 W	3.44E+04	3.23E+04	2.49E+04	9.71E+03	7.54E+03	1.80E+04
1 kW	3.44E+07	3.23E+07	2.49E+07	9.71E+06	7.54E+06	1.80E+07
50 kW	1.72E+09	1.61E+09	1.25E+09	4.85E+08	3.77E+08	9.00E+08
100 kW	3.44E+09	3.23E+09	2.49E+09	9.71E+08	7.54E+08	1.80E+09
500 kW	1.72E+10	1.61E+10	1.25E+10	4.85E+09	3.77E+09	9.00E+09
1 MW	3.44E+10	3.23E+10	2.49E+10	9.71E+09	7.54E+09	1.80E+10
10 MW	3.44E+11	3.23E+11	2.49E+11	9.71E+10	7.54E+10	1.80E+11
50 MW	1.72E+12	1.61E+12	1.25E+12	4.85E+11	3.77E+11	9.00E+11
100 MW	3.44E+12	3.23E+12	2.49E+12	9.71E+11	7.54E+11	1.80E+12
200 MW	6.87E+12	6.46E+12	4.98E+12	1.94E+12	1.51E+12	3.60E+12
300 MW	1.03E+13	9.69E+12	7.47E+12	2.91E+12	2.26E+12	5.40E+12

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
	Pulse [cps]	Pulse [cps]	Pulse [cps]	Pulse [cps]	Pulse [cps]	Pulse [cps]
1 W	7.84E+03	7.87E+03	1.41E+04	1.35E+04	9.34E+03	5.62E+03
1 kW	7.84E+06	7.87E+06	1.41E+07	1.35E+07	9.34E+06	5.62E+06
50 kW	3.92E+08	3.93E+08	7.04E+08	6.74E+08	4.67E+08	2.81E+08
100 kW	7.84E+08	7.87E+08	1.41E+09	1.35E+09	9.34E+08	5.62E+08
500 kW	3.92E+09	3.93E+09	7.04E+09	6.74E+09	4.67E+09	2.81E+09
1 MW	7.84E+09	7.87E+09	1.41E+10	1.35E+10	9.34E+09	5.62E+09
10 MW	7.84E+10	7.87E+10	1.41E+11	1.35E+11	9.34E+10	5.62E+10
50 MW	3.92E+11	3.93E+11	7.04E+11	6.74E+11	4.67E+11	2.81E+11
100 MW	7.84E+11	7.87E+11	1.41E+12	1.35E+12	9.34E+11	5.62E+11
200 MW	1.57E+12	1.57E+12	2.81E+12	2.70E+12	1.87E+12	1.12E+12
300 MW	2.35E+12	2.36E+12	4.22E+12	4.04E+12	2.80E+12	1.69E+12

NOTE ALLA LETTURA:

- i valori barrati vogliono intendere che la sonda specifica non è applicabile nella posizione investigata o che si trova ad operare al di fuori del range consentito;
 - i valori sottolineati vogliono significare che la sonda opera nel range consentito, ma occorre verificare che sia essa sia effettivamente collocabile nella posizione investigata;
- i valori in rosso indicano indisponibilità dei range di applicazione dello strumento: la possibile applicabilità è inferita sulla base dei dati delle altre sonde.

Tabella 14– Segnali ottenibili dalla camera a fissione Centronics FC538 nelle diverse posizioni investigate(Figura 12).

	C1			C2			C3			C4			C5			C6		
	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]
1 W	2.99E+04	1.20E-21	5.98E-09	2.81E+04	1.12E-21	5.61E-09	2.17E+04	8.66E-22	4.33E-09	8.44E+03	3.38E-22	1.69E-09	6.55E+03	2.62E-22	1.31E-09	1.57E+04	6.26E-22	3.13E-09
1 kW	2.99E+07	1.20E-18	5.98E-06	2.81E+07	1.12E-18	5.61E-06	2.17E+07	8.66E-19	4.33E-06	8.44E+06	3.38E-19	1.69E-06	6.55E+06	2.62E-19	1.31E-06	1.57E+07	6.26E-19	3.13E-06
50 kW	1.49E+09	5.98E-17	2.99E-04	1.40E+09	5.61E-17	2.81E-04	1.08E+09	4.33E-17	2.17E-04	4.22E+08	1.69E-17	8.44E-05	3.28E+08	1.31E-17	6.55E-05	7.83E+08	3.13E-17	1.57E-04
100 kW	2.99E+09	1.20E-16	5.98E-04	2.81E+09	1.12E-16	5.61E-04	2.17E+09	8.66E-17	4.33E-04	8.44E+08	3.38E-17	1.69E-04	6.55E+08	2.62E-17	1.31E-04	1.57E+09	6.26E-17	3.13E-04
500 kW	1.49E+10	5.98E-16	2.99E-03	1.40E+10	5.61E-16	2.81E-03	1.08E+10	4.33E-16	2.17E-03	4.22E+09	1.69E-16	8.44E-04	3.28E+09	1.31E-16	6.55E-04	7.83E+09	3.13E-16	1.57E-03
1 MW	2.99E+10	1.20E-15	5.98E-03	2.81E+10	1.12E-15	5.61E-03	2.17E+10	8.66E-16	4.33E-03	8.44E+09	3.38E-16	1.69E-03	6.55E+09	2.62E-16	1.31E-03	1.57E+10	6.26E-16	3.13E-03
10 MW	2.99E+11	1.20E-14	5.98E-02	2.81E+11	1.12E-14	5.61E-02	2.17E+11	8.66E-15	4.33E-02	8.44E+10	3.38E-15	1.69E-02	6.55E+10	2.62E-15	1.31E-02	1.57E+11	6.26E-15	3.13E-02
50 MW	1.49E+12	5.98E-14	2.99E-01	1.40E+12	5.61E-14	2.81E-01	1.08E+12	4.33E-14	2.17E-01	4.22E+11	1.69E-14	8.44E-02	3.28E+11	1.31E-14	6.55E-02	7.83E+11	3.13E-14	1.57E-01
100 MW	2.99E+12	1.20E-13	5.98E-01	2.81E+12	1.12E-13	5.61E-01	2.17E+12	8.66E-14	4.33E-01	8.44E+11	3.38E-14	1.69E-01	6.55E+11	2.62E-14	1.31E-01	1.57E+12	6.26E-14	3.13E-01
200 MW	5.98E+12	2.39E-13	1.20E+00	5.61E+12	2.25E-13	1.12E+00	4.33E+12	1.73E-13	8.66E-01	1.69E+12	6.75E-14	3.38E-01	1.31E+12	5.24E-14	2.62E-01	3.13E+12	1.25E-13	6.26E-01
300 MW	8.96E+12	3.59E-13	1.79E+00	8.42E+12	3.37E-13	1.68E+00	6.50E+12	2.60E-13	1.30E+00	2.53E+12	1.01E-13	5.06E-01	1.97E+12	7.87E-14	3.93E-01	4.70E+12	1.88E-13	9.40E-01

	N1			N2			N3			N4			N5			N6		
	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]
1 W	<u>6.82E+03</u>	2.73E-22	1.36E-09	<u>6.84E+03</u>	2.74E-22	1.37E-09	<u>1.22E+04</u>	4.90E-22	2.45E-09	<u>1.17E+04</u>	4.69E-22	2.34E-09	<u>8.12E+03</u>	3.25E-22	1.62E-09	4.89E+03	1.95E-22	9.77E-10
1 kW	6.82E+06	2.73E-19	1.36E-06	6.84E+06	2.74E-19	1.37E-06	1.22E+07	4.90E-19	2.45E-06	1.17E+07	4.69E-19	2.34E-06	8.12E+06	3.25E-19	1.62E-06	4.89E+06	1.95E-19	9.77E-07
50 kW	3.41E+08	1.36E-17	6.82E-05	3.42E+08	1.37E-17	6.84E-05	6.12E+08	2.45E-17	1.22E-04	5.86E+08	2.34E-17	1.17E-04	4.06E+08	1.62E-17	8.12E-05	2.44E+08	9.77E-18	4.89E-05
100 kW	6.82E+08	2.73E-17	1.36E-04	6.84E+08	2.74E-17	1.37E-04	1.22E+09	4.90E-17	2.45E-04	1.17E+09	4.69E-17	2.34E-04	8.12E+08	3.25E-17	1.62E-04	4.89E+08	1.95E-17	9.77E-05
500 kW	3.41E+09	1.36E-16	6.82E-04	3.42E+09	1.37E-16	6.84E-04	6.12E+09	2.45E-16	1.22E-03	5.86E+09	2.34E-16	1.17E-03	4.06E+09	1.62E-16	8.12E-04	2.44E+09	9.77E-17	4.89E-04
1 MW	6.82E+09	2.73E-16	1.36E-03	6.84E+09	2.74E-16	1.37E-03	1.22E+10	4.90E-16	2.45E-03	1.17E+10	4.69E-16	2.34E-03	8.12E+09	3.25E-16	1.62E-03	4.89E+09	1.95E-16	9.77E-04
10 MW	6.82E+10	2.73E-15	1.36E-02	6.84E+10	2.74E-15	1.37E-02	1.22E+11	4.90E-15	2.45E-02	1.17E+11	4.69E-15	2.34E-02	8.12E+10	3.25E-15	1.62E-02	4.89E+10	1.95E-15	9.77E-03
50 MW	3.41E+11	1.36E-14	6.82E-02	3.42E+11	1.37E-14	6.84E-02	6.12E+11	2.45E-14	1.22E-01	5.86E+11	2.34E-14	1.17E-01	4.06E+11	1.62E-14	8.12E-02	2.44E+11	9.77E-15	4.89E-02
100 MW	6.82E+11	2.73E-14	1.36E-01	6.84E+11	2.74E-14	1.37E-01	1.22E+12	4.90E-14	2.45E-01	1.17E+12	4.69E-14	2.34E-01	8.12E+11	3.25E-14	1.62E-01	4.89E+11	1.95E-14	9.77E-02
200 MW	1.36E+12	5.46E-14	2.73E-01	1.37E+12	5.47E-14	2.74E-01	2.45E+12	9.79E-14	4.90E-01	2.34E+12	9.37E-14	4.69E-01	1.62E+12	6.49E-14	3.25E-01	9.77E+11	3.91E-14	1.95E-01
300 MW	2.05E+12	8.19E-14	4.09E-01	2.05E+12	8.21E-14	4.10E-01	3.67E+12	1.47E-13	7.34E-01	3.52E+12	1.41E-13	7.03E-01	2.44E+12	9.74E-14	4.87E-01	1.47E+12	5.86E-14	2.93E-01

NOTE ALLA LETTURA:

- i valori barrati vogliono intendere che la sonda specifica non è applicabile nella posizione investigata o che si trova ad operare al di fuori del range consentito;
- i valori sottolineati vogliono significare che la sonda opera nel range consentito, ma occorre verificare che sia essa sia effettivamente collocabile nella posizione investigata;
- i valori in rosso indicano indisponibilità dei range di applicazione dello strumento: la possibile applicabilità è inferita sulla base dei dati delle altre sonde.

Tabella 15–Segnali ottenibili dalla camera a fissione Photonis CFUC06 nelle diverse posizioni investigate (Figura 12).

	C1			C2			C3			C4			C5			C6		
	Pulse [cps]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]
1 W	2.99E+04	1.20E-21	5.98E-09	2.81E+04	1.12E-21	5.61E-09	2.17E+04	8.66E-22	4.33E-09	8.44E+03	3.38E-22	1.69E-09	6.55E+03	2.62E-22	1.31E-09	1.57E+04	6.26E-22	3.13E-09
1 kW	2.99E+07	1.20E-18	5.98E-06	2.81E+07	1.12E-18	5.61E-06	2.17E+07	8.66E-19	4.33E-06	8.44E+06	3.38E-19	1.69E-06	6.55E+06	2.62E-19	1.31E-06	1.57E+07	6.26E-19	3.13E-06
50 kW	1.49E+09	5.98E-17	2.99E-04	1.40E+09	5.61E-17	2.81E-04	1.08E+09	4.33E-17	2.17E-04	4.22E+08	1.69E-17	8.44E-05	3.28E+08	1.31E-17	6.55E-05	7.83E+08	3.13E-17	1.57E-04
100 kW	2.99E+09	1.20E-16	5.98E-04	2.81E+09	1.12E-16	5.61E-04	2.17E+09	8.66E-17	4.33E-04	8.44E+08	3.38E-17	1.69E-04	6.55E+08	2.62E-17	1.31E-04	1.57E+09	6.26E-17	3.13E-04
500 kW	1.49E+10	5.98E-16	2.99E-03	1.40E+10	5.61E-16	2.81E-03	1.08E+10	4.33E-16	2.17E-03	4.22E+09	1.69E-16	8.44E-04	3.28E+09	1.31E-16	6.55E-04	7.83E+09	3.13E-16	1.57E-03
1 MW	2.99E+10	1.20E-15	5.98E-03	2.81E+10	1.12E-15	5.61E-03	2.17E+10	8.66E-16	4.33E-03	8.44E+09	3.38E-16	1.69E-03	6.55E+09	2.62E-16	1.31E-03	1.57E+10	6.26E-16	3.13E-03
10 MW	2.99E+11	1.20E-14	5.98E-02	2.81E+11	1.12E-14	5.61E-02	2.17E+11	8.66E-15	4.33E-02	8.44E+10	3.38E-15	1.69E-02	6.55E+10	2.62E-15	1.31E-02	1.57E+11	6.26E-15	3.13E-02
50 MW	1.49E+12	5.98E-14	2.99E-01	1.40E+12	5.61E-14	2.81E-01	1.08E+12	4.33E-14	2.17E-01	4.22E+11	1.69E-14	8.44E-02	3.28E+11	1.31E-14	6.55E-02	7.83E+11	3.13E-14	1.57E-01
100 MW	2.99E+12	1.20E-13	5.98E-01	2.81E+12	1.12E-13	5.61E-01	2.17E+12	8.66E-14	4.33E-01	8.44E+11	3.38E-14	1.69E-01	6.55E+11	2.62E-14	1.31E-01	1.57E+12	6.26E-14	3.13E-01
200 MW	5.98E+12	2.39E-13	1.20E+00	5.61E+12	2.25E-13	1.12E+00	4.33E+12	1.73E-13	8.66E-01	1.69E+12	6.75E-14	3.38E-01	1.31E+12	5.24E-14	2.62E-01	3.13E+12	1.25E-13	6.26E-01
300 MW	8.96E+12	3.59E-13	1.79E+00	8.42E+12	3.37E-13	1.68E+00	6.50E+12	2.60E-13	1.30E+00	2.53E+12	1.01E-13	5.06E-01	1.97E+12	7.87E-14	3.93E-01	4.70E+12	1.88E-13	9.40E-01

	N1			N2			N3			N4			N5			N6		
	Pulse [cps]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]
1 W	<u>6.82E+03</u>	2.73E-22	1.36E-09	<u>6.84E+03</u>	2.74E-22	1.37E-09	<u>1.22E+04</u>	4.90E-22	2.45E-09	<u>1.17E+04</u>	4.69E-22	2.34E-09	<u>8.12E+03</u>	3.25E-22	1.62E-09	4.89E+03	1.95E-22	9.77E-10
1 kW	6.82E+06	2.73E-19	1.36E-06	6.84E+06	2.74E-19	1.37E-06	1.22E+07	4.90E-19	2.45E-06	1.17E+07	4.69E-19	2.34E-06	8.12E+06	3.25E-19	1.62E-06	4.89E+06	1.95E-19	9.77E-07
50 kW	3.41E+08	1.36E-17	6.82E-05	3.42E+08	1.37E-17	6.84E-05	6.12E+08	2.45E-17	1.22E-04	5.86E+08	2.34E-17	1.17E-04	4.06E+08	1.62E-17	8.12E-05	2.44E+08	9.77E-18	4.89E-05
100 kW	6.82E+08	2.73E-17	1.36E-04	6.84E+08	2.74E-17	1.37E-04	1.22E+09	4.90E-17	2.45E-04	1.17E+09	4.69E-17	2.34E-04	8.12E+08	3.25E-17	1.62E-04	4.89E+08	1.95E-17	9.77E-05
500 kW	3.41E+09	1.36E-16	6.82E-04	3.42E+09	1.37E-16	6.84E-04	6.12E+09	2.45E-16	1.22E-03	5.86E+09	2.34E-16	1.17E-03	4.06E+09	1.62E-16	8.12E-04	2.44E+09	9.77E-17	4.89E-04
1 MW	6.82E+09	2.73E-16	1.36E-03	6.84E+09	2.74E-16	1.37E-03	1.22E+10	4.90E-16	2.45E-03	1.17E+10	4.69E-16	2.34E-03	8.12E+09	3.25E-16	1.62E-03	4.89E+09	1.95E-16	9.77E-04
10 MW	6.82E+10	2.73E-15	1.36E-02	6.84E+10	2.74E-15	1.37E-02	1.22E+11	4.90E-15	2.45E-02	1.17E+11	4.69E-15	2.34E-02	8.12E+10	3.25E-15	1.62E-02	4.89E+10	1.95E-15	9.77E-03
50 MW	3.41E+11	1.36E-14	6.82E-02	3.42E+11	1.37E-14	6.84E-02	6.12E+11	2.45E-14	1.22E-01	5.86E+11	2.34E-14	1.17E-01	4.06E+11	1.62E-14	8.12E-02	2.44E+11	9.77E-15	4.89E-02
100 MW	6.82E+11	2.73E-14	1.36E-01	6.84E+11	2.74E-14	1.37E-01	1.22E+12	4.90E-14	2.45E-01	1.17E+12	4.69E-14	2.34E-01	8.12E+11	3.25E-14	1.62E-01	4.89E+11	1.95E-14	9.77E-02
200 MW	1.36E+12	5.46E-14	2.73E-01	1.37E+12	5.47E-14	2.74E-01	2.45E+12	9.79E-14	4.90E-01	2.34E+12	9.37E-14	4.69E-01	1.62E+12	6.49E-14	3.25E-01	9.77E+11	3.91E-14	1.95E-01
300 MW	2.05E+12	8.19E-14	4.09E-01	2.05E+12	8.21E-14	4.10E-01	3.67E+12	1.47E-13	7.34E-01	3.52E+12	1.41E-13	7.03E-01	2.44E+12	9.74E-14	4.87E-01	1.47E+12	5.86E-14	2.93E-01

NOTE ALLA LETTURA:

- i valori barrati vogliono intendere che la sonda specifica non è applicabile nella posizione investigata o che si trova ad operare al di fuori del range consentito;
- i valori sottolineati vogliono significare che la sonda opera nel range consentito, ma occorre verificare che sia essa sia effettivamente collocabile nella posizione investigata;
- i valori in rosso indicano indisponibilità dei range di applicazione dello strumento: la possibile applicabilità è inferita sulla base dei dati delle altre sonde.

Tabella 16–Segnali ottenibili dalla camera a fissione Photonis CFUC07 nelle diverse posizioni investigate (Figura 12).

	C1			C2			C3			C4			C5			C6		
	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]
1 W	2.99E+01	1.20E-24	2.99E-12	2.81E+01	1.12E-24	2.81E-12	2.17E+01	8.66E-25	2.17E-12	8.44E+00	3.38E-25	8.44E-13	6.55E+00	2.62E-25	6.55E-13	1.57E+01	6.26E-25	1.57E-12
1 kW	2.99E+04	1.20E-21	2.99E-09	2.81E+04	1.12E-21	2.81E-09	2.17E+04	8.66E-22	2.17E-09	8.44E+03	3.38E-22	8.44E-10	6.55E+03	2.62E-22	6.55E-10	1.57E+04	6.26E-22	1.57E-09
50 kW	1.49E+06	5.98E-20	1.49E-07	1.40E+06	5.61E-20	1.40E-07	1.08E+06	4.33E-20	1.08E-07	4.22E+05	1.69E-20	4.22E-08	3.28E+05	1.31E-20	3.28E-08	7.83E+05	3.13E-20	7.83E-08
100 kW	2.99E+06	1.20E-19	2.99E-07	2.81E+06	1.12E-19	2.81E-07	2.17E+06	8.66E-20	2.17E-07	8.44E+05	3.38E-20	8.44E-08	6.55E+05	2.62E-20	6.55E-08	1.57E+06	6.26E-20	1.57E-07
500 kW	1.49E+07	5.98E-19	1.49E-06	1.40E+07	5.61E-19	1.40E-06	1.08E+07	4.33E-19	1.08E-06	4.22E+06	1.69E-19	4.22E-07	3.28E+06	1.31E-19	3.28E-07	7.83E+06	3.13E-19	7.83E-07
1 MW	2.99E+07	1.20E-18	2.99E-06	2.81E+07	1.12E-18	2.81E-06	2.17E+07	8.66E-19	2.17E-06	8.44E+06	3.38E-19	8.44E-07	6.55E+06	2.62E-19	6.55E-07	1.57E+07	6.26E-19	1.57E-06
10 MW	2.99E+08	1.20E-17	2.99E-05	2.81E+08	1.12E-17	2.81E-05	2.17E+08	8.66E-18	2.17E-05	8.44E+07	3.38E-18	8.44E-06	6.55E+07	2.62E-18	6.55E-06	1.57E+08	6.26E-18	1.57E-05
50 MW	1.49E+09	5.98E-17	1.49E-04	1.40E+09	5.61E-17	1.40E-04	1.08E+09	4.33E-17	1.08E-04	4.22E+08	1.69E-17	4.22E-05	3.28E+08	1.31E-17	3.28E-05	7.83E+08	3.13E-17	7.83E-05
100 MW	2.99E+09	1.20E-16	2.99E-04	2.81E+09	1.12E-16	2.81E-04	2.17E+09	8.66E-17	2.17E-04	8.44E+08	3.38E-17	8.44E-05	6.55E+08	2.62E-17	6.55E-05	1.57E+09	6.26E-17	1.57E-04
200 MW	5.98E+09	2.39E-16	5.98E-04	5.61E+09	2.25E-16	5.61E-04	4.33E+09	1.73E-16	4.33E-04	1.69E+09	6.75E-17	1.69E-04	1.31E+09	5.24E-17	1.31E-04	3.13E+09	1.25E-16	3.13E-04
300 MW	8.96E+09	3.59E-16	8.96E-04	8.42E+09	3.37E-16	8.42E-04	6.50E+09	2.60E-16	6.50E-04	2.53E+09	1.01E-16	2.53E-04	1.97E+09	7.87E-17	1.97E-04	4.70E+09	1.88E-16	4.70E-04

	N1			N2			N3			N4			N5			N6		
	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]	Pulse [cps]	MSV [A²/Hz]	Current [A]
1 W	6.82E+00	2.73E-25	6.82E-13	6.84E+00	2.74E-25	6.84E-13	1.22E+01	4.90E-25	1.22E-12	1.17E+01	4.69E-25	1.17E-12	8.12E+00	3.25E-25	8.12E-13	4.89E+00	1.95E-25	4.89E-13
1 kW	6.82E+03	2.73E-22	6.82E-10	6.84E+03	2.74E-22	6.84E-10	1.22E+04	4.90E-22	1.22E-09	1.17E+04	4.69E-22	1.17E-09	8.12E+03	3.25E-22	8.12E-10	4.89E+03	1.95E-22	4.89E-10
50 kW	3.41E+05	1.36E-20	3.41E-08	3.42E+05	1.37E-20	3.42E-08	6.12E+05	2.45E-20	6.12E-08	5.86E+05	2.34E-20	5.86E-08	4.06E+05	1.62E-20	4.06E-08	2.44E+05	9.77E-21	2.44E-08
100 kW	6.82E+05	2.73E-20	6.82E-08	6.84E+05	2.74E-20	6.84E-08	1.22E+06	4.90E-20	1.22E-07	1.17E+06	4.69E-20	1.17E-07	8.12E+05	3.25E-20	8.12E-08	4.89E+05	1.95E-20	4.89E-08
500 kW	3.41E+06	1.36E-19	3.41E-07	3.42E+06	1.37E-19	3.42E-07	6.12E+06	2.45E-19	6.12E-07	5.86E+06	2.34E-19	5.86E-07	4.06E+06	1.62E-19	4.06E-07	2.44E+06	9.77E-20	2.44E-07
1 MW	6.82E+06	2.73E-19	6.82E-07	6.84E+06	2.74E-19	6.84E-07	1.22E+07	4.90E-19	1.22E-06	1.17E+07	4.69E-19	1.17E-06	8.12E+06	3.25E-19	8.12E-07	4.89E+06	1.95E-19	4.89E-07
10 MW	6.82E+07	2.73E-18	6.82E-06	6.84E+07	2.74E-18	6.84E-06	1.22E+08	4.90E-18	1.22E-05	1.17E+08	4.69E-18	1.17E-05	8.12E+07	3.25E-18	8.12E-06	4.89E+07	1.95E-18	4.89E-06
50 MW	3.41E+08	1.36E-17	3.41E-05	3.42E+08	1.37E-17	3.42E-05	6.12E+08	2.45E-17	6.12E-05	5.86E+08	2.34E-17	5.86E-05	4.06E+08	1.62E-17	4.06E-05	2.44E+08	9.77E-18	2.44E-05
100 MW	6.82E+08	2.73E-17	6.82E-05	6.84E+08	2.74E-17	6.84E-05	1.22E+09	4.90E-17	1.22E-04	1.17E+09	4.69E-17	1.17E-04	8.12E+08	3.25E-17	8.12E-05	4.89E+08	1.95E-17	4.89E-05
200 MW	1.36E+09	5.46E-17	1.36E-04	1.37E+09	5.47E-17	1.37E-04	2.45E+09	9.79E-17	2.45E-04	2.34E+09	9.37E-17	2.34E-04	1.62E+09	6.49E-17	1.62E-04	9.77E+08	3.91E-17	9.77E-05
300 MW	2.05E+09	8.19E-17	2.05E-04	2.05E+09	8.21E-17	2.05E-04	3.67E+09	1.47E-16	3.67E-04	3.52E+09	1.41E-16	3.52E-04	2.44E+09	9.74E-17	2.44E-04	1.47E+09	5.86E-17	1.47E-04

NOTE ALLA LETTURA:

-

i valori barrati vogliono intendere che la sonda specifica non è applicabile nella posizione investigata o che si trova ad operare al di fuori del range consentito;

-

i valori sottolineati vogliono significare che la sonda opera nel range consentito, ma occorre verificare che sia essa sia effettivamente collocabile nella posizione investigata;

-

i valori in rosso indicano indisponibilità dei range di applicazione dello strumento: la possibile applicabilità è inferita sulla base dei dati delle altre sonde.

Tabella 17– Segnali ottenibili dalla camera a fissione Photonis CFUE32 nelle diverse posizioni investigate (Figura 12).

	C1		C2		C3		C4		C5		C6	
	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]
1 W	8.96E-27	2.09E-12	8.42E-27	1.97E-12	6.50E-27	1.52E-12	2.53E-27	5.91E-13	1.97E-27	4.59E-13	4.70E-27	1.10E-12
1 kW	8.96E-24	2.09E-09	8.42E-24	1.97E-09	6.50E-24	1.52E-09	2.53E-24	5.91E-10	1.97E-24	4.59E-10	4.70E-24	1.10E-09
50 kW	4.48E-22	1.05E-07	4.21E-22	9.83E-08	3.25E-22	7.58E-08	1.27E-22	2.95E-08	9.83E-23	2.29E-08	2.35E-22	5.48E-08
100 kW	8.96E-22	2.09E-07	8.42E-22	1.97E-07	6.50E-22	1.52E-07	2.53E-22	5.91E-08	1.97E-22	4.59E-08	4.70E-22	1.10E-07
500 kW	4.48E-21	1.05E-06	4.21E-21	9.83E-07	3.25E-21	7.58E-07	1.27E-21	2.95E-07	9.83E-22	2.29E-07	2.35E-21	5.48E-07
1 MW	8.96E-21	2.09E-06	8.42E-21	1.97E-06	6.50E-21	1.52E-06	2.53E-21	5.91E-07	1.97E-21	4.59E-07	4.70E-21	1.10E-06
10 MW	8.96E-20	2.09E-05	8.42E-20	1.97E-05	6.50E-20	1.52E-05	2.53E-20	5.91E-06	1.97E-20	4.59E-06	4.70E-20	1.10E-05
50 MW	4.48E-19	1.05E-04	4.21E-19	9.83E-05	3.25E-19	7.58E-05	1.27E-19	2.95E-05	9.83E-20	2.29E-05	2.35E-19	5.48E-05
100 MW	8.96E-19	2.09E-04	8.42E-19	1.97E-04	6.50E-19	1.52E-04	2.53E-19	5.91E-05	1.97E-19	4.59E-05	4.70E-19	1.10E-04
200 MW	1.79E-18	4.18E-04	1.68E-18	3.93E-04	1.30E-18	3.03E-04	5.06E-19	1.18E-04	3.93E-19	9.18E-05	9.40E-19	2.19E-04
300 MW	2.69E-18	6.27E-04	2.53E-18	5.90E-04	1.95E-18	4.55E-04	7.60E-19	1.77E-04	5.90E-19	1.38E-04	1.41E-18	3.29E-04

	N1		N2		N3		N4		N5		N6	
	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]	MSV [A ² /Hz]	Current [A]
1 W	2.05E-27	4.77E-13	2.05E-27	4.79E-13	3.67E-27	8.57E-13	3.52E-27	8.20E-13	2.44E-27	5.68E-13	1.47E-27	3.42E-13
1 kW	2.05E-24	4.77E-10	2.05E-24	4.79E-10	3.67E-24	8.57E-10	3.52E-24	8.20E-10	2.44E-24	5.68E-10	1.47E-24	3.42E-10
50 kW	1.02E-22	2.39E-08	1.03E-22	2.39E-08	1.84E-22	4.28E-08	1.76E-22	4.10E-08	1.22E-22	2.84E-08	7.33E-23	1.71E-08
100 kW	2.05E-22	4.77E-08	2.05E-22	4.79E-08	3.67E-22	8.57E-08	3.52E-22	8.20E-08	2.44E-22	5.68E-08	1.47E-22	3.42E-08
500 kW	1.02E-21	2.39E-07	1.03E-21	2.39E-07	1.84E-21	4.28E-07	1.76E-21	4.10E-07	1.22E-21	2.84E-07	7.33E-22	1.71E-07
1 MW	2.05E-21	4.77E-07	2.05E-21	4.79E-07	3.67E-21	8.57E-07	3.52E-21	8.20E-07	2.44E-21	5.68E-07	1.47E-21	3.42E-07
10 MW	2.05E-20	4.77E-06	2.05E-20	4.79E-06	3.67E-20	8.57E-06	3.52E-20	8.20E-06	2.44E-20	5.68E-06	1.47E-20	3.42E-06
50 MW	1.02E-19	2.39E-05	1.03E-19	2.39E-05	1.84E-19	4.28E-05	1.76E-19	4.10E-05	1.22E-19	2.84E-05	7.33E-20	1.71E-05
100 MW	2.05E-19	4.77E-05	2.05E-19	4.79E-05	3.67E-19	8.57E-05	3.52E-19	8.20E-05	2.44E-19	5.68E-05	1.47E-19	3.42E-05
200 MW	4.09E-19	9.55E-05	4.10E-19	9.58E-05	7.34E-19	1.71E-04	7.03E-19	1.64E-04	4.87E-19	1.14E-04	2.93E-19	6.84E-05
300 MW	6.14E-19	1.43E-04	6.16E-19	1.44E-04	1.10E-18	2.57E-04	1.05E-18	2.46E-04	7.31E-19	1.70E-04	4.40E-19	1.03E-04

NOTE ALLA LETTURA:

- i valori barrati vogliono intendere che la sonda specifica non è applicabile nella posizione investigata o che si trova ad operare al di fuori del range consentito;
- i valori sottolineati vogliono significare che la sonda opera nel range consentito, ma occorre verificare che sia essa sia effettivamente collocabile nella posizione investigata;
- i valori in rosso indicano indisponibilità dei range di applicazione dello strumento: la possibile applicabilità è inferita sulla base dei dati delle altre sonde.

Tabella 18 – Segnali ottenibili dalla camera a fissione Photonis CFUE43 nelle diverse posizioni investigate (Figura 12).

		Detector durability vs power and positioning											
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
		time [month]	time [month]	time [month]	time [month]	time [month]	time [month]	time [month]	time [month]	time [month]	time [month]	time [month]	time [month]
CFUC06 ¹	100 MW	2.55	2.71	3.51	9.02	11.61	4.86	11.16	11.13	6.22	6.49	9.37	15.57
	200 MW	1.27	1.36	1.76	4.51	5.81	2.43	5.58	5.56	3.11	3.25	4.69	7.79
	300 MW	0.85	0.90	1.17	3.01	3.87	1.62	3.72	3.71	2.07	2.16	3.12	5.19
CFUC07 ¹	100 MW	2.55	2.71	3.51	9.02	11.61	4.86	11.16	11.13	6.22	6.49	9.37	15.57
	200 MW	1.27	1.36	1.76	4.51	5.81	2.43	5.58	5.56	3.11	3.25	4.69	7.79
	300 MW	0.85	0.90	1.17	3.01	3.87	1.62	3.72	3.71	2.07	2.16	3.12	5.19
CFUE32 ¹	100 MW	2.55	2.71	3.51	9.02	11.61	4.86	11.16	11.13	6.22	6.49	9.37	15.57
	200 MW	1.27	1.36	1.76	4.51	5.81	2.43	5.58	5.56	3.11	3.25	4.69	7.79
	300 MW	0.85	0.90	1.17	3.01	3.87	1.62	3.72	3.71	2.07	2.16	3.12	5.19
CFUE43 ²	100 MW	19.10	20.33	26.36	67.61	87.08	36.45	83.68	83.44	46.64	48.71	70.31	116.80
	200 MW	9.55	10.17	13.18	33.81	43.54	18.22	41.84	41.72	23.32	24.35	35.16	58.40
	300 MW	6.37	6.78	8.79	22.54	29.03	12.15	27.89	27.81	15.55	16.24	23.44	38.93
(1) Tempi calcolati ipotizzando una fluenza termica massima ($E_{th}=2E+19$) corrispondente alla riduzione della sensitività di 1%. (2) Tempi calcolati ipotizzando una fluenza termica massima ($E_{th}=1,5E+20$) corrispondente alla riduzione della sensitività di 10%.													

Tabella 19 - Tempi di durata delle camere a fissione analizzate nelle diverse posizioni di reattore investigate (Figura 12), a diversi livelli di potenza.

A questo punto, possono trarsi delle conclusioni circa l'applicabilità delle camere a fissione commercialmente disponibili al reattore ALFRED:

- la FC Centronics FC538 non risulta utilizzabile, visto che in qualsiasi posizione di possibile installazione risulta fuori range di applicabilità;
- le FC Photonis CFUC06 e CFUC07 sono utilizzabili fino ad una massima potenza di 10 MW, per lo più in *MSV mode* e *Current mode*, dopo di che si troverebbero ad operare fuori dai range consentiti. Ciò significherebbe che, se utilizzate nell'avviamento di reattore, devono poi essere rimosse al limite dei 10 MW prima di poter continuare la salita a potenza, pena la loro andata fuori servizio. Se la rimozione può essere facilmente pensata negli elementi riflettori, che possono assumere un layout tale da consentire l'estrazione e la variazione di quota dello strumento, effettuare la medesima operazione negli elementi di combustibile può risultare notevolmente più complesso: ne segue che le posizioni N1, N2, N3, N4 e N5 non sono attuabili con semplicità. Ne segue che queste sonde possono essere utilizzate solo negli elementi riflettori o anche radialmente "più lontano" nel barrel o al di fuori di esso, sempre che l'informazione ricavata non sia troppo 'ritardata';
- la FC Photonis CFUE32 sembrerebbe essere lo strumento più adatto allo scopo di monitoraggio del flusso neutronico visto che riuscirebbe, con le tre modalità di funzionamento, a seguire tutta l'evoluzione del reattore, dalla potenza '0' alla potenza nominale, in posizioni in-core e out-of-core. Il problema fondamentale dell'uso in-core è nella durabilità alla potenza nominale: da Tabella 19 si evince che sul midplane di nocciolo e all'interno dei fasci di barrette combustibili, lo strumento non durerebbe più di 3 mesi, accettando una perdita in sensitività di 1%. Le installazioni out-of-core nei *nodes* degli elementi combustibili o negli elementi riflettori garantirebbero durate più elevate, fino ad un massimo di 6-9 mesi, sempre accettando una perdita in sensitività di 1%. Per allungare questi tempi, occorre o ridurre l'esposizione al flusso della camera (installazione 'più lontano') o accettare una maggiore degradazione della sua sensitività. Accettando una riduzione della sensitività nell'ordine del 10%, lo strumento durerebbe al massimo 2 anni nell'installazione in-core e 4-6 anni in posizioni out-of-core. Qualora non si possa accettare una variazione della sensitività così ampia, non resta che –in caso di un uso in-core dello strumento– di estrarlo durante la salita in potenza.
- la FC Photonis CFUE43 risulta utilizzabile a partire da circa 100 kW e, dunque, non è in grado di seguire inizialmente la salita in potenza. Questo strumento soffre le stesse problematiche di installazione e durata della CFUE32.

Da quanto riportato, le FC Photonis CFUE32 e CFUE43 sembrerebbero essere gli strumenti più adeguati al monitoraggio del reattore ALFRED, almeno per installazioni out-of-core. Rimane da determinare, tuttavia, quale sia la massima fluenza ammissibile per lo strumento, prima che esso non sia più in grado di seguire linearmente l'andamento del flusso neutronico: come detto in precedenza, la durate stimate in Tabella 19 sono da considerarsi dei limiti superiori, poiché potrebbero verificarsi danneggiamenti da flusso neutronico veloce che possono pregiudicare il buon funzionamento della camera a fissione già prima che essa perda sensitività a causa del bruciamento del fissile.

4.2 Analisi della risposta dei Self Powered Neutron Detector

Di seguito sarà studiata la risposta dei Self Powered Neutron Detector commercialmente disponibili ai diversi livelli di potenza del reattore, andando ad investigare in quali range gli strumenti diventano insufficienti a seguire l'evoluzione della reazione a catena nella salita dalla potenza "0" alla potenza nominale.

4.2.1 Limiti di rivelazione per i SPND

I SPND funzionano in *current mode*. Essendo strumenti a stato solido sono molto resistenti e adatti a funzionare in ambienti ostili, sottoposti ad un forte campo di radiazione ed una elevata temperatura. Il problema principale è la significatività del segnale ottenuto perché le sonde sono sensibili anche alla radiazione gamma e pertanto il contributo al segnale di corrente dovuto all'irraggiamento gamma proveniente dall'esterno deve essere reso trascurabile per poter utilizzare correttamente la sonda. Esiste, quindi, un limite inferiore al segnale elettrico in corrente considerabile come accettabile. Inoltre, a seconda della tipologia utilizzata, i SPND possono essere 'pronti' o 'ritardati': i primi possono essere applicati al controllo di reattore e alla mappatura del flusso neutronico; i secondi sono utilizzabili solo per monitorare l'andamento spaziale del flusso neutronico.

		Emission times	Response times			Burn-up
			0-63%	0-86%	0-95%	
β SPND	⁵² V	99% of signal in T _{1/2} =3,76 min 1% of signal prompt	5,4 min	10,8min	16,3 min	0,012%/month (LWR, 10 ¹³ nv)
	¹⁰⁴ Rh	92% of signal in T _{1/2} =42 s 8% of signal in T _{1/2} =4,4 min	1,08 min	2,14min	3,18 min	0,39%/month (LWR, 10 ¹³ nv)
γ SPND	⁶⁰ Co	100% prompt	10 ⁻¹⁴ s			0,094%/month (LWR, 10 ¹³ nv)

Tabella 20 - Emissioni principali e tempi di risposta dei più comuni materiali sensibili utilizzati per SPND.

A causa dei tempi caratteristici dei decadimenti nucleari, per un flusso neutronico costante, si ottiene un segnale di corrente costante, ma solo dopo aver atteso un certo tempo pari a 4-5 vite medie del nuclide che dà luogo al segnale: tale corrente prende il nome di corrente di saturazione. Evidentemente, poiché è necessario attendere affinché il segnale prelevato dal SPND(β) porti informazione circa il flusso neutronico (previa taratura dello strumento), ne segue che questi ultimi sono utili solo al monitoraggio locale del flusso neutronico a fini di studio del burn-up del combustibile ed ottimizzazione del ciclo di ricarica del nocciolo; solo i SPND(γ) possono essere usati come input al sistema di controllo, visto che il segnale di corrente è contestuale alla cattura neutronica, data la diseccitazione gamma praticamente immediata.

	<i>Current mode</i>	
	lower limit [A]	upper limit [A]
KWD-V-100	$7 \cdot 10^{-9}$	N.D.
KWD-Rh-50	$2 \cdot 10^{-9}$	N.D.
KWD-Co-210	$1 \cdot 10^{-8}$	N.D.
ARi V-type	N.D.	N.D.
ARi Rh-type	N.D.	N.D.
ARi Co-type	N.D.	N.D.

Tabella 21 - Limiti di rivelazione per i SPND studiati (riferiti all'interferenza gamma originantesi in ambiente LWR per 10^{14} n/cm²s)(8)(9).

In Tabella 21 si riportano i limiti di rivelazione per i SPND studiati: i valori sono validi per un tipico fondo gamma da reattore LWR; quindi andrebbero corretti per poter essere applicati ad ALFRED. Le

note proprietà di interazione dei fotoni con il piombo fanno attendere che esso si comporti da ottimo schermo, andando a ridurre in maniera significativa l'interferenza gamma alla sonda da parte dell'ambiente reattore, specie se si considerano posizioni 'lontane' come la C6, N1, N2, N3, N4, N5 e N6. Ciò consentirebbe abbassare i limiti inferiori di rivelazione per i SPND (sempre tenendo presente che i materiali della sonda si attivano e pertanto essa stessa diventa una sorgente gamma), rendendo 'possibile' in via teorica il loro utilizzo anche a potenze ridotte, laddove i segnali di corrente sono più contenuti.

Va, inoltre, sottolineato che i SPND(β) sono meno affetti dall'interferenza gamma rispetto ai SPND(γ) e tale interferenza è tanto più ridotta quanto più la sonda è affusolata e l'emettitore di piccolo diametro. Ne segue che è statisticamente più significativo il valore di corrente ricavato da un SPND(β) rispetto ad un SPND(γ).

Essendo nella pratica non semplice misurare valori di corrente nell'ordine dei nA in maniera affidabile e in tempi brevi, spesso si procede ad accorpare più SPND insieme, creando degli assembly elettricamente connessi tra loro, il cui output elettrico è maggiormente significativo. Questa necessità impiantistica può condurre, però, lontano dalle esigenze di monitoraggio locale, visto che per incrementare il segnale occorre aumentare in numero di SPND in loco o aumentarne le dimensioni, il che significa non riuscire più ad avere un monitoraggio locale, ma una informazione più globale, oltre che un maggiore disturbo al processo.

Ne segue che l'applicabilità della tecnologia dipende anche da cosa si desidera realizzare con essa.

4.2.2 Analisi del segnale proveniente dai SPND a diversi livelli di potenza

Di seguito si riporta l'analisi del segnale elettrico che proverrebbe dai SPND in Tabella 9 qualora venissero posti all'interno del reattore ALFRED nelle posizioni investigate in Figura 12, per diversi livelli di potenza. L'obiettivo è quello di mostrare eventuali criticità nel monitoraggio del reattore con i detti strumenti, scoprendo se possano esser sufficienti, oppure sia necessario provvedere a sviluppare una categoria di sonde 'ad hoc' per i reattori refrigerati a piombo.

Si fa riferimento ad un singolo SPND, e non una applicazione in assembly, che si pensa possibile solo in alcune posizioni quali le C6, N1, N2, N3, N4, N5 e N6.

Al fine di accettare o meno il segnale dalla sonda si farà riferimento al singolo strumento, e si prenderà come limite inferiore il valore di 0,1 μ A per SPND(γ) e 0,01 μ A per SPND(β). Tali valori sono in linea anche con i limiti inferiori adottati per le camere a fissione.

Di seguito, le Tabella 22, Tabella 23, Tabella 24, Tabella 25, Tabella 26 e Tabella 27 riportano (rispettivamente per gli strumenti KWD-V-100, ARi V-type, KWD-Rh-50, ARi Rh-type, KWD-Co-210, ARi Co-type,) le risposte delle sonde nelle diverse posizioni investigate, per i diversi livelli di potenza del reattore, calcolate attraverso la (10).

La risposta, R, è stata ottenuta moltiplicando il flusso neutronico, ϕ , nella posizione i-sima al livello di potenza j-simo per la sensibilità, S, dello strumento nella posizione i-sima, nell'unica modalità di funzionamento possibile, cioè il *current mode*. Le sensibilità dei SPND in questione sono riportate in Tabella 11, mentre i flussi neutronici locali in Tabella 13.

Ulteriore parametro da tenere in considerazione è la durata dello strumento, corrispondente ad un tasso ammissibile di burn-up del materiale sensibile: chiaramente, minore è il flusso neutronico, minori saranno le reazioni di attivazione, minore sarà il segnale, ma più tempo durerà lo strumento. Dalle specifiche degli strumenti (Tabella 9) si hanno i tassi di burn-up corrispondenti ad uno spettro termico: ne segue che tali valori andranno corretti attraverso i fattori correttivi calcolati in precedenza.

Preso un singolo strumento, i valori dei tassi di burn-up attualizzati per lo spettro veloce di ALFRED sono calcolati moltiplicando il tasso di burn-up termico, $B.U._{th}$, corrispondente al flusso termico ϕ_{th} , per i fattori di correzione $ESCF_i$ (Tabella 10) calcolati in precedenza e per il flusso neutronico, $\phi_{i,j}$, nella posizione i-sima e al livello di potenza j-simo:

$$B.U._{fast\ i,j} = \frac{B.U._{th}}{\phi_{th}} \cdot ESCF_i \cdot \phi_{i,j} \quad (12)$$

In Tabella 28 si riportano i ratei di burn-up corretti per i SPND analizzati, nelle posizioni i-sime, ad alcuni dei j-simi livelli di potenza. Sebbene tali valori siano inferiori rispetto a quelli termici, nella stima del tempo di permanenza plausibile dello strumento nel reattore non dovrà tenersi conto solo del burn-up, ma anche del maggior danneggiamento causato dal flusso neutronico veloce. Ne segue che, fissato un valore di 'bruciamento' ammissibile per la sonda, il tempo di permanenza calcolato attraverso il tasso di burn-up è da considerarsi un limite superiore visto che le sonde potrebbero soffrire di un danneggiamento eccessivo (dovuto all'elevata energia dei neutroni) che potrebbe pregiudicarne le prestazioni e, quindi, la durata. Per avere un'idea quantitativa, gli strumenti KWD 5503-Co-210 e KWD 5503-V-100 sono pensati per durare 20 anni in ambiente LWR, mentre la KWD 5503-Rh-50 circa 3 anni. Cautelativamente, si potrebbe stimare una durata circa la metà del tempo consigliato, ma la questione richiede approfondimento.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
1 W	<u>1,93E-16</u>	<u>1,86E-16</u>	<u>1,40E-16</u>	<u>4,75E-17</u>	<u>3,98E-17</u>	<u>8,20E-17</u>
1 kW	<u>1,93E-13</u>	<u>1,86E-13</u>	<u>1,40E-13</u>	<u>4,75E-14</u>	<u>3,98E-14</u>	<u>8,20E-14</u>
50 kW	<u>9,64E-12</u>	<u>9,31E-12</u>	<u>6,99E-12</u>	<u>2,38E-12</u>	<u>1,99E-12</u>	<u>4,10E-12</u>
100 kW	<u>1,93E-11</u>	<u>1,86E-11</u>	<u>1,40E-11</u>	<u>4,75E-12</u>	<u>3,98E-12</u>	<u>8,20E-12</u>
500 kW	<u>9,64E-11</u>	<u>9,31E-11</u>	<u>6,99E-11</u>	<u>2,38E-11</u>	<u>1,99E-11</u>	<u>4,10E-11</u>
1 MW	<u>1,93E-10</u>	<u>1,86E-10</u>	<u>1,40E-10</u>	<u>4,75E-11</u>	<u>3,98E-11</u>	<u>8,20E-11</u>
10 MW	<u>1,93E-09</u>	<u>1,86E-09</u>	<u>1,40E-09</u>	<u>4,75E-10</u>	<u>3,98E-10</u>	<u>8,20E-10</u>
50 MW	<u>9,64E-09</u>	<u>9,31E-09</u>	<u>6,99E-09</u>	<u>2,38E-09</u>	<u>1,99E-09</u>	<u>4,10E-09</u>
100 MW	<u>1,93E-08</u>	<u>1,86E-08</u>	<u>1,40E-08</u>	<u>4,75E-09</u>	<u>3,98E-09</u>	<u>8,20E-09</u>
200 MW	<u>3,86E-08</u>	<u>3,72E-08</u>	<u>2,80E-08</u>	<u>9,51E-09</u>	<u>7,96E-09</u>	<u>1,64E-08</u>
300 MW	<u>5,78E-08</u>	<u>5,59E-08</u>	<u>4,19E-08</u>	<u>1,43E-08</u>	<u>1,19E-08</u>	<u>2,46E-08</u>

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
1 W	<u>3,66E-17</u>	<u>3,45E-17</u>	<u>6,13E-17</u>	<u>5,96E-17</u>	<u>3,95E-17</u>	<u>2,39E-17</u>
1 kW	<u>3,66E-14</u>	<u>3,45E-14</u>	<u>6,13E-14</u>	<u>5,96E-14</u>	<u>3,95E-14</u>	<u>2,39E-14</u>
50 kW	<u>1,83E-12</u>	<u>1,72E-12</u>	<u>3,07E-12</u>	<u>2,98E-12</u>	<u>1,98E-12</u>	<u>1,19E-12</u>
100 kW	<u>3,66E-12</u>	<u>3,45E-12</u>	<u>6,13E-12</u>	<u>5,96E-12</u>	<u>3,95E-12</u>	<u>2,39E-12</u>
500 kW	<u>1,83E-11</u>	<u>1,72E-11</u>	<u>3,07E-11</u>	<u>2,98E-11</u>	<u>1,98E-11</u>	<u>1,19E-11</u>
1 MW	<u>3,66E-11</u>	<u>3,45E-11</u>	<u>6,13E-11</u>	<u>5,96E-11</u>	<u>3,95E-11</u>	<u>2,39E-11</u>
10 MW	<u>3,66E-10</u>	<u>3,45E-10</u>	<u>6,13E-10</u>	<u>5,96E-10</u>	<u>3,95E-10</u>	<u>2,39E-10</u>
50 MW	<u>1,83E-09</u>	<u>1,72E-09</u>	<u>3,07E-09</u>	<u>2,98E-09</u>	<u>1,98E-09</u>	<u>1,19E-09</u>
100 MW	<u>3,66E-09</u>	<u>3,45E-09</u>	<u>6,13E-09</u>	<u>5,96E-09</u>	<u>3,95E-09</u>	<u>2,39E-09</u>
200 MW	<u>7,32E-09</u>	<u>6,89E-09</u>	<u>1,23E-08</u>	<u>1,19E-08</u>	<u>7,90E-09</u>	<u>4,77E-09</u>
300 MW	<u>1,10E-08</u>	<u>1,03E-08</u>	<u>1,84E-08</u>	<u>1,79E-08</u>	<u>1,19E-08</u>	<u>7,16E-09</u>

NOTE ALLA LETTURA:

- i valori barrati vogliono intendere che la sonda specifica non è applicabile nella posizione investigata o che si trova ad operare al di fuori del range consentito;
- i valori sottolineati vogliono significare che la sonda opera nel range consentito, ma occorre verificare che sia essa sia effettivamente collocabile nella posizione investigata;
- i valori in rosso indicano indisponibilità dei range di applicazione dello strumento: la possibile applicabilità è inferita sulla base dei dati delle altre sonde.

Tabella 22 – Segnali ottenibili dal SPND KWD-V-100 (Tabella 9) nelle diverse posizioni investigate (Figura 12).

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
1 W	5,82E-17	5,62E-17	4,22E-17	1,44E-17	1,20E-17	2,48E-17
1 kW	5,82E-14	5,62E-14	4,22E-14	1,44E-14	1,20E-14	2,48E-14
50 kW	2,91E-12	2,81E-12	2,11E-12	7,18E-13	6,01E-13	1,24E-12
100 kW	5,82E-12	5,62E-12	4,22E-12	1,44E-12	1,20E-12	2,48E-12
500 kW	2,91E-11	2,81E-11	2,11E-11	7,18E-12	6,01E-12	1,24E-11
1 MW	5,82E-11	5,62E-11	4,22E-11	1,44E-11	1,20E-11	2,48E-11
10 MW	5,82E-10	5,62E-10	4,22E-10	1,44E-10	1,20E-10	2,48E-10
50 MW	2,91E-09	2,81E-09	2,11E-09	7,18E-10	6,01E-10	1,24E-09
100 MW	5,82E-09	5,62E-09	4,22E-09	1,44E-09	1,20E-09	2,48E-09
200 MW	1,16E-08	1,12E-08	8,44E-09	2,87E-09	2,40E-09	4,95E-09
300 MW	1,75E-08	1,69E-08	1,27E-08	4,31E-09	3,60E-09	7,43E-09

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
1 W	1,10E-17	1,04E-17	1,85E-17	1,80E-17	1,19E-17	7,20E-18
1 kW	1,10E-14	1,04E-14	1,85E-14	1,80E-14	1,19E-14	7,20E-15
50 kW	5,52E-13	5,20E-13	9,26E-13	9,00E-13	5,96E-13	3,60E-13
100 kW	1,10E-12	1,04E-12	1,85E-12	1,80E-12	1,19E-12	7,20E-13
500 kW	5,52E-12	5,20E-12	9,26E-12	9,00E-12	5,96E-12	3,60E-12
1 MW	1,10E-11	1,04E-11	1,85E-11	1,80E-11	1,19E-11	7,20E-12
10 MW	1,10E-10	1,04E-10	1,85E-10	1,80E-10	1,19E-10	7,20E-11
50 MW	5,52E-10	5,20E-10	9,26E-10	9,00E-10	5,96E-10	3,60E-10
100 MW	1,10E-09	1,04E-09	1,85E-09	1,80E-09	1,19E-09	7,20E-10
200 MW	2,21E-09	2,08E-09	3,70E-09	3,60E-09	2,39E-09	1,44E-09
300 MW	3,31E-09	3,12E-09	5,55E-09	5,40E-09	3,58E-09	2,16E-09

NOTE ALLA LETTURA:

- i valori barrati vogliono intendere che la sonda specifica non è applicabile nella posizione investigata o che si trova ad operare al di fuori del range consentito;
- i valori sottolineati vogliono significare che la sonda opera nel range consentito, ma occorre verificare che sia essa sia effettivamente collocabile nella posizione investigata;
- i valori in rosso indicano indisponibilità dei range di applicazione dello strumento: la possibile applicabilità è inferita sulla base dei dati delle altre sonde.

Tabella 23 – Segnali ottenibili dal SPND ARI-V-type (Tabella 9) nelle diverse posizioni investigate (Figura 12).

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
1 W	<u>3,07E-16</u>	<u>2,90E-16</u>	<u>2,23E-16</u>	<u>7,71E-17</u>	<u>6,40E-17</u>	<u>6,14E-16</u>
1 kW	<u>3,07E-13</u>	<u>2,90E-13</u>	<u>2,23E-13</u>	<u>7,71E-14</u>	<u>6,40E-14</u>	<u>6,14E-13</u>
50 kW	<u>1,53E-11</u>	<u>1,45E-11</u>	<u>1,12E-11</u>	<u>3,86E-12</u>	<u>3,20E-12</u>	<u>3,07E-11</u>
100 kW	<u>3,07E-11</u>	<u>2,90E-11</u>	<u>2,23E-11</u>	<u>7,71E-12</u>	<u>6,40E-12</u>	<u>6,14E-11</u>
500 kW	<u>1,53E-10</u>	<u>1,45E-10</u>	<u>1,12E-10</u>	<u>3,86E-11</u>	<u>3,20E-11</u>	<u>3,07E-10</u>
1 MW	<u>3,07E-10</u>	<u>2,90E-10</u>	<u>2,23E-10</u>	<u>7,71E-11</u>	<u>6,40E-11</u>	<u>6,14E-10</u>
10 MW	<u>3,07E-09</u>	<u>2,90E-09</u>	<u>2,23E-09</u>	<u>7,71E-10</u>	<u>6,40E-10</u>	<u>6,14E-09</u>
50 MW	<u>1,53E-08</u>	<u>1,45E-08</u>	<u>1,12E-08</u>	<u>3,86E-09</u>	<u>3,20E-09</u>	<u>3,07E-08</u>
100 MW	<u>3,07E-08</u>	<u>2,90E-08</u>	<u>2,23E-08</u>	<u>7,71E-09</u>	<u>6,40E-09</u>	<u>6,14E-08</u>
200 MW	<u>6,13E-08</u>	<u>5,80E-08</u>	<u>4,46E-08</u>	<u>1,54E-08</u>	<u>1,28E-08</u>	<u>1,23E-07</u>
300 MW	<u>9,20E-08</u>	<u>8,71E-08</u>	<u>6,69E-08</u>	<u>2,31E-08</u>	<u>1,92E-08</u>	<u>1,84E-07</u>

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
1 W	<u>2,21E-16</u>	<u>2,16E-16</u>	<u>5,42E-16</u>	<u>5,98E-16</u>	<u>3,78E-16</u>	<u>2,58E-16</u>
1 kW	<u>2,21E-13</u>	<u>2,16E-13</u>	<u>5,42E-13</u>	<u>5,98E-13</u>	<u>3,78E-13</u>	<u>2,58E-13</u>
50 kW	<u>1,11E-11</u>	<u>1,08E-11</u>	<u>2,71E-11</u>	<u>2,99E-11</u>	<u>1,89E-11</u>	<u>1,29E-11</u>
100 kW	<u>2,21E-11</u>	<u>2,16E-11</u>	<u>5,42E-11</u>	<u>5,98E-11</u>	<u>3,78E-11</u>	<u>2,58E-11</u>
500 kW	<u>1,11E-10</u>	<u>1,08E-10</u>	<u>2,71E-10</u>	<u>2,99E-10</u>	<u>1,89E-10</u>	<u>1,29E-10</u>
1 MW	<u>2,21E-10</u>	<u>2,16E-10</u>	<u>5,42E-10</u>	<u>5,98E-10</u>	<u>3,78E-10</u>	<u>2,58E-10</u>
10 MW	<u>2,21E-09</u>	<u>2,16E-09</u>	<u>5,42E-09</u>	<u>5,98E-09</u>	<u>3,78E-09</u>	<u>2,58E-09</u>
50 MW	<u>1,11E-08</u>	<u>1,08E-08</u>	<u>2,71E-08</u>	<u>2,99E-08</u>	<u>1,89E-08</u>	<u>1,29E-08</u>
100 MW	<u>2,21E-08</u>	<u>2,16E-08</u>	<u>5,42E-08</u>	<u>5,98E-08</u>	<u>3,78E-08</u>	<u>2,58E-08</u>
200 MW	<u>4,42E-08</u>	<u>4,31E-08</u>	<u>1,08E-07</u>	<u>1,20E-07</u>	<u>7,57E-08</u>	<u>5,15E-08</u>
300 MW	<u>6,63E-08</u>	<u>6,47E-08</u>	<u>1,63E-07</u>	<u>1,79E-07</u>	<u>1,14E-07</u>	<u>7,73E-08</u>

NOTE ALLA LETTURA:

- i valori barrati vogliono intendere che la sonda specifica non è applicabile nella posizione investigata o che si trova ad operare al di fuori del range consentito;
- i valori sottolineati vogliono significare che la sonda opera nel range consentito, ma occorre verificare che sia essa sia effettivamente collocabile nella posizione investigata;
- i valori in rosso indicano indisponibilità dei range di applicazione dello strumento: la possibile applicabilità è inferita sulla base dei dati delle altre sonde.

Tabella 24 – Segnali ottenibili dal SPND KWD-Rh-50 (Tabella 9) nelle diverse posizioni investigate (Figura 12).

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
1 W	8,46E-16	8,01E-16	6,15E-16	2,13E-16	1,76E-16	1,69E-15
1 kW	8,46E-13	8,01E-13	6,15E-13	2,13E-13	1,76E-13	1,69E-12
50 kW	4,23E-11	4,00E-11	3,08E-11	1,06E-11	8,82E-12	8,47E-11
100 kW	8,46E-11	8,01E-11	6,15E-11	2,13E-11	1,76E-11	1,69E-10
500 kW	4,23E-10	4,00E-10	3,08E-10	1,06E-10	8,82E-11	8,47E-10
1 MW	8,46E-10	8,01E-10	6,15E-10	2,13E-10	1,76E-10	1,69E-09
10 MW	8,46E-09	8,01E-09	6,15E-09	2,13E-09	1,76E-09	1,69E-08
50 MW	4,23E-08	4,00E-08	3,08E-08	1,06E-08	8,82E-09	8,47E-08
100 MW	8,46E-08	8,01E-08	6,15E-08	2,13E-08	1,76E-08	1,69E-07
200 MW	1,69E-07	1,60E-07	1,23E-07	4,26E-08	3,53E-08	3,39E-07
300 MW	2,54E-07	2,40E-07	1,85E-07	6,38E-08	5,29E-08	5,08E-07

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
1 W	6,10E-16	5,95E-16	1,50E-15	1,65E-15	1,04E-15	7,11E-16
1 kW	6,10E-13	5,95E-13	1,50E-12	1,65E-12	1,04E-12	7,11E-13
50 kW	3,05E-11	2,98E-11	7,48E-11	8,25E-11	5,22E-11	3,56E-11
100 kW	6,10E-11	5,95E-11	1,50E-10	1,65E-10	1,04E-10	7,11E-11
500 kW	3,05E-10	2,98E-10	7,48E-10	8,25E-10	5,22E-10	3,56E-10
1 MW	6,10E-10	5,95E-10	1,50E-09	1,65E-09	1,04E-09	7,11E-10
10 MW	6,10E-09	5,95E-09	1,50E-08	1,65E-08	1,04E-08	7,11E-09
50 MW	3,05E-08	2,98E-08	7,48E-08	8,25E-08	5,22E-08	3,56E-08
100 MW	6,10E-08	5,95E-08	1,50E-07	1,65E-07	1,04E-07	7,11E-08
200 MW	1,22E-07	1,19E-07	2,99E-07	3,30E-07	2,09E-07	1,42E-07
300 MW	1,83E-07	1,79E-07	4,49E-07	4,95E-07	3,13E-07	2,13E-07

NOTE ALLA LETTURA:

- i valori barrati vogliono intendere che la sonda specifica non è applicabile nella posizione investigata o che si trova ad operare al di fuori del range consentito;
- i valori sottolineati vogliono significare che la sonda opera nel range consentito, ma occorre verificare che sia essa sia effettivamente collocabile nella posizione investigata;
- i valori in rosso indicano indisponibilità dei range di applicazione dello strumento: la possibile applicabilità è inferita sulla base dei dati delle altre sonde.

Tabella 25 – Segnali ottenibili dal SPND ARI-Rh-type (Tabella 9) nelle diverse posizioni investigate (Figura 12).

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
1 W	3,64E-17	4,88E-17	3,44E-17	8,97E-18	4,14E-17	4,31E-16
1 kW	3,64E-14	4,88E-14	3,44E-14	8,97E-15	4,14E-14	4,31E-13
50 kW	1,82E-12	2,44E-12	1,72E-12	4,48E-13	2,07E-12	2,16E-11
100 kW	3,64E-12	4,88E-12	3,44E-12	8,97E-13	4,14E-12	4,31E-11
500 kW	1,82E-11	2,44E-11	1,72E-11	4,48E-12	2,07E-11	2,16E-10
1 MW	3,64E-11	4,88E-11	3,44E-11	8,97E-12	4,14E-11	4,31E-10
10 MW	3,64E-10	4,88E-10	3,44E-10	8,97E-11	4,14E-10	4,31E-09
50 MW	1,82E-09	2,44E-09	1,72E-09	4,48E-10	2,07E-09	2,16E-08
100 MW	3,64E-09	4,88E-09	3,44E-09	8,97E-10	4,14E-09	4,31E-08
200 MW	7,28E-09	9,76E-09	6,88E-09	1,79E-09	8,29E-09	8,62E-08
300 MW	1,09E-08	1,46E-08	1,03E-08	2,69E-09	1,24E-08	1,29E-07

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
1 W	1,82E-16	2,04E-16	4,15E-16	3,58E-16	2,36E-16	1,56E-16
1 kW	1,82E-13	2,04E-13	4,15E-13	3,58E-13	2,36E-13	1,56E-13
50 kW	9,12E-12	1,02E-11	2,07E-11	1,79E-11	1,18E-11	7,80E-12
100 kW	1,82E-11	2,04E-11	4,15E-11	3,58E-11	2,36E-11	1,56E-11
500 kW	9,12E-11	1,02E-10	2,07E-10	1,79E-10	1,18E-10	7,80E-11
1 MW	1,82E-10	2,04E-10	4,15E-10	3,58E-10	2,36E-10	1,56E-10
10 MW	1,82E-09	2,04E-09	4,15E-09	3,58E-09	2,36E-09	1,56E-09
50 MW	9,12E-09	1,02E-08	2,07E-08	1,79E-08	1,18E-08	7,80E-09
100 MW	1,82E-08	2,04E-08	4,15E-08	3,58E-08	2,36E-08	1,56E-08
200 MW	3,65E-08	4,08E-08	8,30E-08	7,15E-08	4,73E-08	3,12E-08
300 MW	5,47E-08	6,12E-08	1,24E-07	1,07E-07	7,09E-08	4,68E-08

NOTE ALLA LETTURA:

- i valori barrati vogliono intendere che la sonda specifica non è applicabile nella posizione investigata o che si trova ad operare al di fuori del range consentito;
- i valori sottolineati vogliono significare che la sonda opera nel range consentito, ma occorre verificare che sia essa sia effettivamente collocabile nella posizione investigata;
- i valori in rosso indicano indisponibilità dei range di applicazione dello strumento: la possibile applicabilità è inferita sulla base dei dati delle altre sonde.

Tabella 26 – Segnali ottenibili dal SPND KWD-Co-210 (Tabella 9) nelle diverse posizioni investigate (Figura 12).

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
1 W	2,16E-18	2,89E-18	2,04E-18	5,31E-19	2,45E-18	2,56E-17
1 kW	2,16E-15	2,89E-15	2,04E-15	5,31E-16	2,45E-15	2,56E-14
50 kW	1,08E-13	1,45E-13	1,02E-13	2,66E-14	1,23E-13	1,28E-12
100 kW	2,16E-13	2,89E-13	2,04E-13	5,31E-14	2,45E-13	2,56E-12
500 kW	1,08E-12	1,45E-12	1,02E-12	2,66E-13	1,23E-12	1,28E-11
1 MW	2,16E-12	2,89E-12	2,04E-12	5,31E-13	2,45E-12	2,56E-11
10 MW	2,16E-11	2,89E-11	2,04E-11	5,31E-12	2,45E-11	2,56E-10
50 MW	1,08E-10	1,45E-10	1,02E-10	2,66E-11	1,23E-10	1,28E-09
100 MW	2,16E-10	2,89E-10	2,04E-10	5,31E-11	2,45E-10	2,56E-09
200 MW	4,32E-10	5,78E-10	4,08E-10	1,06E-10	4,91E-10	5,11E-09
300 MW	6,47E-10	8,67E-10	6,12E-10	1,59E-10	7,36E-10	7,67E-09

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
1 W	1,08E-17	1,21E-17	2,46E-17	2,12E-17	1,40E-17	9,24E-18
1 kW	1,08E-14	1,21E-14	2,46E-14	2,12E-14	1,40E-14	9,24E-15
50 kW	5,41E-13	6,04E-13	1,23E-12	1,06E-12	7,00E-13	4,62E-13
100 kW	1,08E-12	1,21E-12	2,46E-12	2,12E-12	1,40E-12	9,24E-13
500 kW	5,41E-12	6,04E-12	1,23E-11	1,06E-11	7,00E-12	4,62E-12
1 MW	1,08E-11	1,21E-11	2,46E-11	2,12E-11	1,40E-11	9,24E-12
10 MW	1,08E-10	1,21E-10	2,46E-10	2,12E-10	1,40E-10	9,24E-11
50 MW	5,41E-10	6,04E-10	1,23E-09	1,06E-09	7,00E-10	4,62E-10
100 MW	1,08E-09	1,21E-09	2,46E-09	2,12E-09	1,40E-09	9,24E-10
200 MW	2,16E-09	2,42E-09	4,92E-09	4,24E-09	2,80E-09	1,85E-09
300 MW	3,24E-09	3,63E-09	7,37E-09	6,36E-09	4,20E-09	2,77E-09

NOTE ALLA LETTURA:

- i valori barrati vogliono intendere che la sonda specifica non è applicabile nella posizione investigata o che si trova ad operare al di fuori del range consentito;
- i valori sottolineati vogliono significare che la sonda opera nel range consentito, ma occorre verificare che sia essa sia effettivamente collocabile nella posizione investigata;
- i valori in rosso indicano indisponibilità dei range di applicazione dello strumento: la possibile applicabilità è inferita sulla base dei dati delle altre sonde.

Tabella 27 – Segnali ottenibili dal SPND ARI-Co-type (Tabella 9) nelle diverse posizioni investigate (Figura 12).

		Detector burn-up vs power and positioning											
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
		burn-up [%/month]	burn-up [%/month]	burn-up [%/month]	burn-up [%/month]	burn-up [%/month]	burn-up [%/month]	burn-up [%/month]	burn-up [%/month]	burn-up [%/month]	burn-up [%/month]	burn-up [%/month]	burn-up [%/month]
KWD 5503-V-100	100 MW	0,0045	0,0044	0,0033	0,0011	0,0009	0,0019	0,0009	0,0008	0,0014	0,0014	0,0009	0,0006
	200 MW	0,0091	0,0088	0,0066	0,0022	0,0019	0,0039	0,0017	0,0016	0,0029	0,0028	0,0019	0,0011
	300 MW	0,0136	0,0131	0,0099	0,0034	0,0028	0,0058	0,0026	0,0024	0,0043	0,0042	0,0028	0,0017
ARi V-type	100 MW	0,0049	0,0047	0,0036	0,0012	0,0010	0,0021	0,0009	0,0009	0,0016	0,0015	0,0010	0,0006
	200 MW	0,0098	0,0095	0,0071	0,0024	0,0020	0,0042	0,0019	0,0018	0,0031	0,0030	0,0020	0,0012
	300 MW	0,0147	0,0142	0,0107	0,0036	0,0030	0,0063	0,0028	0,0026	0,0047	0,0046	0,0030	0,0018
KWD 5503-Rh-50	100 MW	0,1375	0,1301	0,1000	0,0346	0,0287	0,2753	0,0991	0,0967	0,2431	0,2682	0,1696	0,1155
	200 MW	0,2750	0,2602	0,1999	0,0692	0,0573	0,5505	0,1983	0,1934	0,4861	0,5363	0,3393	0,2311
	300 MW	0,4125	0,3903	0,2999	0,1037	0,0860	0,8258	0,2974	0,2901	0,7292	0,8045	0,5089	0,3466
ARi Rh-type	100 MW	0,0811	0,0767	0,0590	0,0204	0,0169	0,1623	0,0585	0,0570	0,1433	0,1581	0,1000	0,0681
	200 MW	0,1622	0,1534	0,1179	0,0408	0,0338	0,3247	0,1169	0,1141	0,2867	0,3163	0,2001	0,1363
	300 MW	0,2433	0,2302	0,1769	0,0612	0,0507	0,4870	0,1754	0,1711	0,4300	0,4744	0,3001	0,2044
KWD 5503-Co-210	100 MW	0,0067	0,0090	0,0064	0,0017	0,0077	0,0799	0,0338	0,0378	0,0768	0,0662	0,0438	0,0289
	200 MW	0,0135	0,0181	0,0127	0,0033	0,0153	0,1597	0,0676	0,0755	0,1536	0,1324	0,0875	0,0578
	300 MW	0,0202	0,0271	0,0191	0,0050	0,0230	0,2396	0,1014	0,1133	0,2304	0,1987	0,1313	0,0866
ARi Co-type	100 MW	0,0067	0,0090	0,0064	0,0017	0,0077	0,0799	0,0338	0,0378	0,0768	0,0662	0,0438	0,0289
	200 MW	0,0135	0,0181	0,0127	0,0033	0,0153	0,1597	0,0676	0,0755	0,1536	0,1324	0,0875	0,0578
	300 MW	0,0202	0,0271	0,0191	0,0050	0,0230	0,2396	0,1014	0,1133	0,2304	0,1987	0,1313	0,0866

Tabella 28 – Tassi di burn-up dei SPND studiati, in corrispondenza di diverse posizioni di reattore (Figura 12) ed alcuni livelli di potenza.

È evidente che i SPND necessitano di flussi neutronici consistenti per poter funzionare.

I regimi di bassa potenza non sono facilmente monitorabili, sebbene sia possibile creare anche un assembly di SPND connettendo in parallelo più sonde al fine di aumentare la significatività statistica del segnale elettrico. Va detto però che aumentare il numero delle sonde o realizzarne di più grandi conduce verso la perdita dell'informazione 'locale', approdando ad una informazione 'più globale'. Se l'interesse è il controllo di reattore, avendo un nocciolo fortemente accoppiato, il reattore ALFRED risulterebbe ben controllabile dall'esterno: si può pensare, allora, di disporre una corona di SPND(γ) attorno al nocciolo, creando dei fasci di strumenti negli elementi riflettori, laddove c'è spazio a sufficienza e il flusso neutronico è ancora sufficientemente forte ad ottenere dei segnali significativi. Va verificata la capacità di un eventuale assembly di seguire i regimi di potenza '0'.

In linea teorica, sarebbe possibile installare dei SPND più grossi o fasci di strumenti anche al di sopra dei noses degli elementi combustibili, visto lo spazio disponibile: i risultati nelle tabelle precedenti mostrano, tuttavia, una scarsa significatività dei segnali per tali posizionamenti e ciò è dovuto al flusso neutronico intrinsecamente basso per le posizioni in questione.

Come è evidente, l'installazione dei SPND in-core fornisce segnali in output solo per elevate potenze e quindi l'installazione dentro il nocciolo è consigliabile solo a motivo di monitorare spazialmente il flusso neutronico ai fini di ottimizzazione del ciclo del combustibile.

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

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

- Le camere a fissione, come tecnologia di rivelazione, non riescono a coprire, con un singolo strumento le esigenze di monitoraggio di ALFRED. La sensitività della CFUE32 è adatta a monitorare il reattore dall'avviamento alla potenza nominale, ma esiste un problema di durabilità a tali livelli di potenza, perché l'eccessiva sensitività "brucia" la camera troppo in fretta (3 mesi). Per contro la CFUE43 segue bene le potenze più elevate anche in termini temporali, perché la vita dello strumento sarebbe nell'ordine di qualche anno per le installazioni appena fuori dal nocciolo.

Ne segue che la camera a fissione ottimizzata per l'applicazione nel reattore ALFRED deve avere una sensitività compresa fra le due precedentemente citate. Inoltre, tale parametro va scelto anche con il compromesso della durabilità richiesta alla sonda.

- 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.

Ne segue che, ottimizzando questa tecnica di monitoraggio, si pensa di ottenere uno strumento molto adatto al controllo del reattore ALFRED nei regimi prossimi alla potenza nominale.

Nei paragrafi successivi si delineeranno alcune modifiche che si prevede possano essere effettuate alla strumentazione corrente al fine di raggiungere i detti obiettivi di monitoraggio del reattore. È chiaro che l'ottimizzazione precisa degli strumenti dipenderà anche dalla strategia di monitoraggio e controllo che esigenze neutroniche o obiettivi di sicurezza richiedono.

Inoltre, si consideri che questa ottimizzazione è specifica per il reattore studiato, ma è estendibile anche ad altri LFR di pari potenza; potenze nominali di reattore diverse (inferiori o superiori)

conducono a flussi neutronici differenti e, variando il termine sorgente allo strumento, variano i segnali da esso ricavabili, la significatività statistica di essi e la durabilità dello strumento.

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 all'interferenza gamma di reattore, e ciò aumenta il valor 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 schermato dal piombo stesso, pertanto il termine sorgente che interagisce con lo strumento di misura è costituito per lo più dal solo flusso neutronico: ciò mette in evidenza che il segnale di corrente che un SPND-veloce può produrre in LFR può portare informazione del solo flusso neutronico.

In termini numerici, questa constatazione vuol significare che si riduce il valor 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.

Tutte le prestazioni dei SPND (capacità di monitoraggio ed interferenza della radiazione gamma) sono generalmente riferite ad applicazioni di tipo LWR, pertanto non sono disponibili dati sperimentali che mostrino cosa accade alla sensibilità gamma in ambiente LFR. In questo senso, è necessario andare a verificare sperimentalmente cosa accadrebbe alla sensibilità gamma delle sonde in ambiente LFR. Una stima numerica deve tener conto del trasporto gamma nei due diversi mezzi che conduce ad uno spettro fotonico attraverso il qual occorre pesare i coefficienti di interazione gamma; inoltre, il piombo favorisce interazioni fotoelettriche (distruttive per i fotoni), fino ad 1 MeV, mentre nell'acqua sono favorite interazioni Compton (non distruttive per i fotoni) visto che le interazioni fotoelettriche sono depresse da ~ 100 keV in avanti.

Come evidenziato in precedenza, l'aumento di sensibilità di un SPND richiede che sia aumentata la massa dell'elemento sensibile, ma questo può contrastare le esigenze di monitoraggio locale o semplicemente i vincoli di spazio disponibile.

Di seguito saranno proposte due sonde basate su SPND, diverse per dimensioni, la prima potenzialmente sfruttabile per un uso in-core, l'altra per un uso out-of core.

5.1.1 Sonda basata su SPND commerciali per uso in-core

Si vuole qui proporre una possibilità di utilizzo dei SPND ARI Industries Co-type commercialmente disponibili al fine di ottenere uno strumento semplice, affidabile, ed applicabile al reattore in studio, ai fini del monitoraggio in-core.

La proposta consiste nella realizzazione di un assembly di SPND, in una struttura tubolare la cui sezione è specificata in Figura 13: con riferimento alla figura, si hanno 8 SPND ARI-Co-type disposti radialmente attorno ad un canale centrale appositamente predisposto per la taratura della strumentazione mediante attivazione neutronica di opportuni materiali.

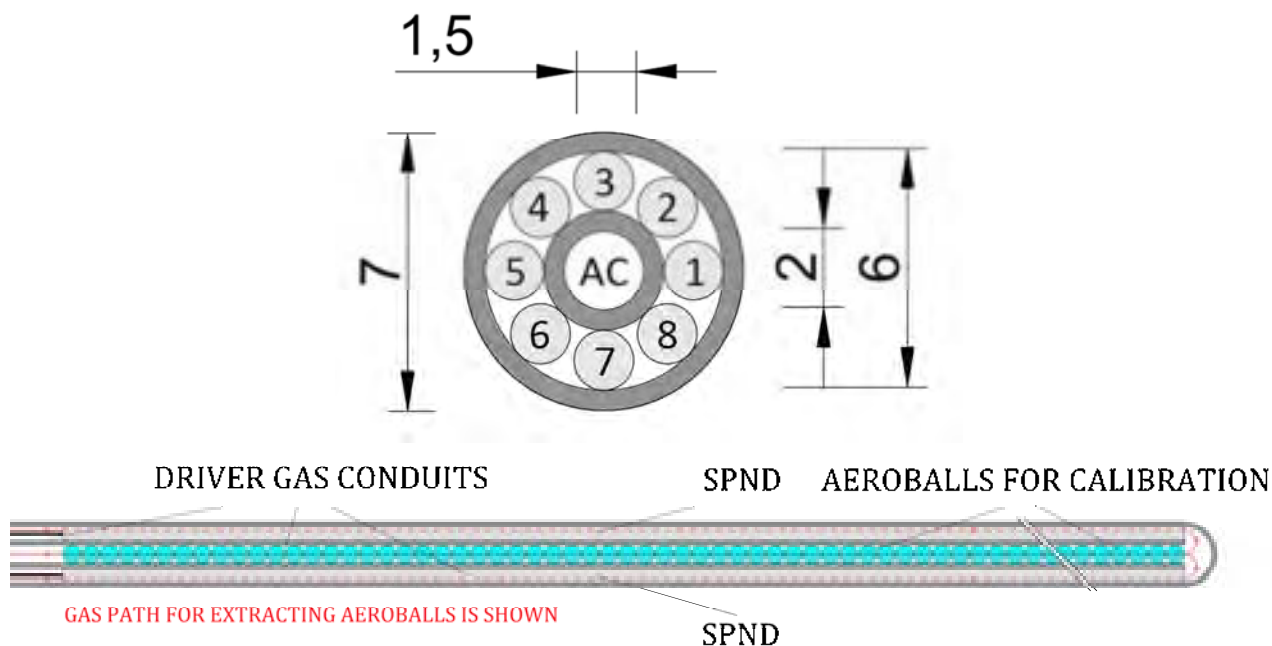


Figura 13 - Struttura della sonda in-core proposta, costituita da 8 ARi-Co-type SPND disposti radialmente attorno ad un canale centrale ricavato per la taratura della sonda stessa mediante attivazione neutronica di opportuno materiale. Tutte le dimensioni sono in [mm].

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;
- 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.

Collegando in parallelo gli 8 SPND ARi-Co-type precedentemente descritti, la carica complessivamente raccolta risulta la somma delle cariche dei singoli strumenti: si attende, dunque, che le prestazioni dell'assembly siano proporzionali al numero dei SPND impiegati. Non varia il rapporto segnale/rumore, ma cresce l'entità del segnale misurabile.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
100 MW	1,73E-09	2,31E-09	1,63E-09	4,25E-10	1,96E-09	2,04E-08
200 MW	3,45E-09	4,63E-09	3,26E-09	8,50E-10	3,93E-09	4,09E-08
300 MW	5,18E-09	6,94E-09	4,90E-09	1,28E-09	5,89E-09	6,13E-08

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
100 MW	8,65E-09	9,67E-09	1,97E-08	1,70E-08	1,12E-08	7,39E-09
200 MW	1,73E-08	1,93E-08	3,93E-08	3,39E-08	2,24E-08	1,48E-08
300 MW	2,60E-08	2,90E-08	5,90E-08	5,09E-08	3,36E-08	2,22E-08

Tabella 29 - Segnali ottenibili dall'assembly (Figura 13) di SPND ARi-Co-type (Tabella 9), nelle diverse posizioni investigate (Figura 12).

Da Tabella 29 si evince che i segnali che si ricaverebbero attraverso l'assembly di SPND proposto sono maggiormente significativi, poiché cresce l'entità dei valori di corrente da misurare. Sebbene, come precedentemente detto, la sensitività al campo gamma di reattore sia da verificare (e quindi il valor minimo di corrente statisticamente rappresentativa del flusso neutronico), le stime riportate in Tabella 29 conducono comunque a segnali nell'ordine di nA o frazioni di nA, ancora troppo contenuti: questo perché i SPND al cobalto della ARi Industries sono di dimensioni millimetriche e contengono 'poco' materiale sensibile. Incrementando anche di poco il massimo diametro esterno che si ritiene sia realizzabile per una sonda in-core, si pensa sia possibile raggiungere segnali elettrici più consistenti e facilmente misurabili.

5.1.2 Sonda basata su SPND commerciali per uso out-of-core

Si propone una possibilità di utilizzo dei SPND KWD 5503-Co-210. Quanto presentato di seguito presuppone una applicazione out-of-core, nella cintura di elementi riflettori che circonda il nocciolo. Essendoci maggiori spazi disponibili e minori vincoli, si ha più libertà di manovra.

Similmente alla sonda precedente, l'idea è quella di realizzare un parallelo di strumenti, con un canale centrale che alloggi il sistema di posta pneumatica per la taratura della strumentazione mediante attivazione neutronica. Fissando il canale di attivazione (AC) di 3 mm di diametro, si riescono a disporre attorno ad esso 5 SPND del tipo proposto, per un diametro massimo complessivo della sonda di 11,4 mm: chiaramente, tali dimensioni sono estendibili, visto che non occorre sottostare agli stretti vincoli di occupazione spaziale che incorrono nelle installazioni in-core, come nel caso precedente.

I vantaggi di un tale tipo di installazione sono stati evidenziati in precedenza.

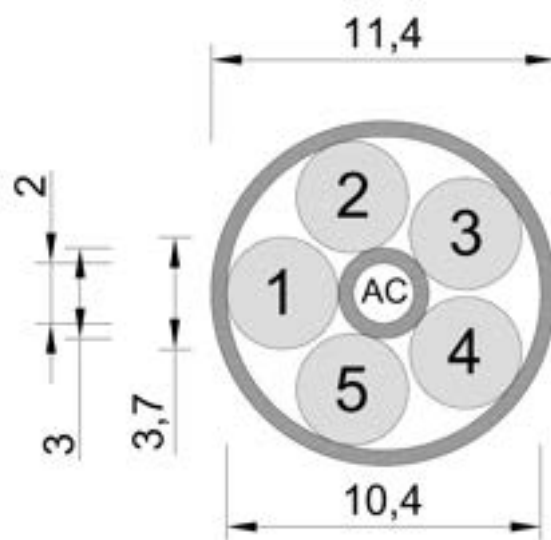


Figura 14 - Struttura della sonda out-of-core proposta, costituita da 5 SPND KWD 5503-Co-210 disposti radialmente attorno ad un canale centrale ricavato per la taratura della sonda stessa mediante attivazione neutronica di opportuno materiale. Tutte le dimensioni sono in [mm].

Essendo i SPND KWD 5503-Co-210 più grandi dei precedenti ARi-Co-type studiati, i segnali di corrente ricavabili sono maggiormente significativi già per singolo strumento, il che conduce ad un comportamento complessivo dell'assembly sicuramente migliore rispetto a quella proposta in precedenza. Senza dilungarsi in osservazioni già affrontate, si riportano in Tabella 30 i segnali di corrente ottenibili.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
100 MW	1,82E-08	2,44E-08	1,72E-08	4,48E-09	2,07E-08	2,16E-07
200 MW	3,64E-08	4,88E-08	3,44E-08	8,97E-09	4,14E-08	4,31E-07
300 MW	5,46E-08	7,32E-08	5,16E-08	1,34E-08	6,21E-08	6,47E-07

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]	Current [A]
100 MW	9,12E-08	1,02E-07	2,07E-07	1,79E-07	1,18E-07	7,80E-08
200 MW	1,82E-07	2,04E-07	4,15E-07	3,58E-07	2,36E-07	1,56E-07
300 MW	2,74E-07	3,06E-07	6,22E-07	5,36E-07	3,54E-07	2,34E-07

Tabella 30 - Segnali ottenibili dall'assembly (Figura 14) di SPND KWD 5503-Co-210 (Tabella 9), nelle diverse posizioni investigate (Figura 12).

5.1.3 Sonde basate sul principio SPND, a layout innovativo

Sempre basandosi sul principio dell'attivazione neutronica, è possibile ottimizzare il disegno dei SPND per massimizzare il contenuto di elemento sensibile a parità di occupazione spaziale. Conservando sempre una conformazione piuttosto allungata, i materiali e gli spessori usualmente utilizzati per l'isolante, si propongono due disegni innovativi per SPND, potenzialmente adottabili sia per strumenti pensati per applicazioni in-core che out-of-core.

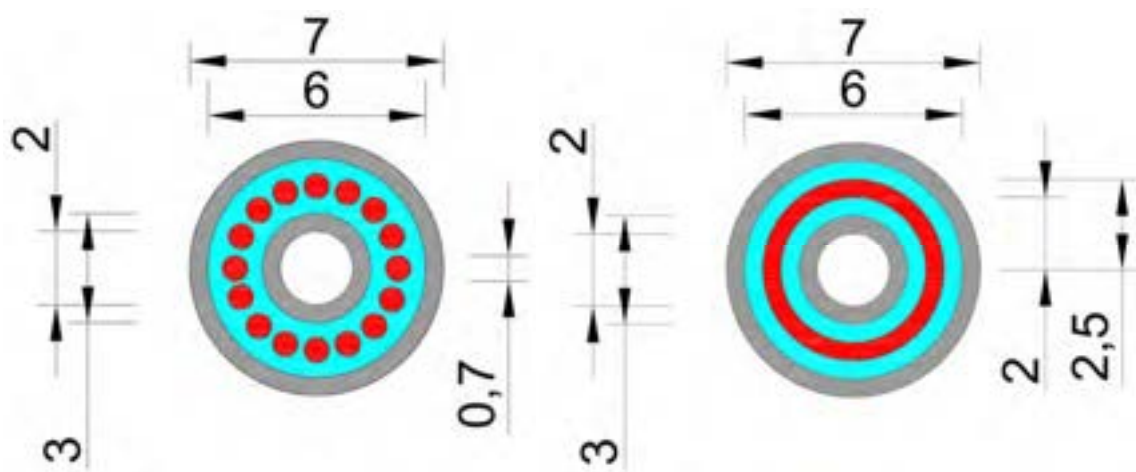


Figura 15 - Possibili configurazioni innovative per SPND: in rosso sono riportati gli elementi sensibili, in blu l'isolante e in grigio i materiali strutturali; al centro il canale per la misura di attivazione. Tutte le dimensioni sono in [mm].

La Figura 15 riporta due possibili schematizzazioni per SPND innovativi, ad incrementata sensibilità. Il riferimento è ad una applicazione in-core; il concetto è facilmente estensibile ad applicazioni out-of-core. Come anticipato, è possibile prevedere il canale di attivazione anche in periferia, qualora si verifichi che il posizionamento al centro della corona di elementi sensibili condizioni la misura di attivazione necessaria alla taratura.

Per quanto concerne la simulazione al calcolatore, gli SPND sono strumenti semplici da sviluppare perché non sono coinvolti campi elettrici imposti, il che significa che il trasporto di carica avviene esclusivamente a mezzo dell'energia che gli elettroni acquistano per effetto delle interazioni delle radiazioni o per il decadimento beta.

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.

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

5.2 Proposta di sonde basate sul principio delle camere a fissione

Come si è dimostrato in precedenza, le camere a fissione commercialmente disponibili sono capaci di monitorare efficacemente il reattore, sebbene occorra ricorrere ad una combinazione di strumenti ed estrarre quelli di monitoraggio della salita in potenza una volta arrivati a potenza nominale di reattore. Il problema principale che si ravvisa nelle camere a fissione è il loro burn-up troppo rapido in corrispondenza dei flussi nominali di reattore, che comporterebbe a dover sostituire frequentemente gli strumenti a causa del loro disservizio.

Appare evidente, quindi, che tali sonde si prestano poco a seguire il flusso neutronico a potenza nominale, perché sono più adatte a monitorare bassi flussi neutronici, corrispondenti alla salita in potenza.

Ciò che converrebbe, quindi, è una ottimizzazione delle camere a fissione per le basse potenze, migliorando la sensibilità dello strumento e il rapporto segnale/rumore in un particolare range di flusso neutronico, in modo da assicurare un'ottima capacità di monitoraggio della potenza zero e della salita in potenza.

Un limite da tenere in considerazione per questo strumento è la scelta dell'isolante: in genere si usa sesquiossido di alluminio (Al_2O_3) il cui principale problema è il degrado della resistività elettrica con l'aumentare della temperatura, che può condurre ad una corrente di fondo che disturba la misura al punto tale da renderla inefficace: chiaramente la questione è maggiormente sentita nelle condizioni di reattore che comportano una condizione di basso rapporto segnale/rumore, cioè le condizioni di bassa potenza. Inoltre, l'applicazione delle camere a fissione in ambiente LFR è del tutto particolare in termini di prestazioni e durabilità dello strumento. Oltre alla questione dell'aumento della *leakage-current* causata dalla riduzione della resistività elettrica dell'isolante, c'è da tener conto dell'accumulo dei prodotti di fissione (radioattivi, producono segnali spuri) e –in condizioni normali– anche del fondo gamma di reattore. Nei LFR il fondo gamma risulta maggiormente depresso a causa del refrigerante e pertanto i disturbi allo strumento pervengono maggiormente dai due effetti peggiorativi precedentemente detti: ne segue che una camera a fissione per LFR potrebbe tollerare maggiori burn-up prima di esser messa fuori servizio, rispetto ad una applicazione LWR o SFR. È chiaro, comunque, che questo aspetto va approfondito e verificato sperimentalmente.

5.2.1 Miglioramenti applicabili

La necessità di migliorare il rapporto segnale/rumore può condurre ad ipotizzare alcune modifiche ai classici layout utilizzati per le camere a fissione commercialmente disponibili.

Primariamente, il problema del deterioramento delle capacità di isolamento elettrico dell'isolante Al_2O_3 possono essere superate cambiando materiale, approdando ad uno più resistente come il diamante visto che la sua resistività elettrica è meno penalizzata dalla temperatura nel campo termico di interesse del reattore ALFRED: la Tabella 31 riporta un confronto fra i materiali detti.

	Electrical resistivity [$\Omega\cdot\text{m}$]	
	T=25 °C	T=500 °C
$\text{Al}_2\text{O}_3(10)$	$2\cdot 10^{11}$	$6.3\cdot 10^8$
Diamond(11)(12)	$10^{11}\div 10^{18}$	$10^{10}\div 10^{14}$

Tabella 31 - Resistività elettrica del sesquiossido di alluminio e del diamante al variare della temperatura, nel campo termico d'interesse del reattore ALFRED.

Inoltre, introducendo il diamante come isolante al posto del sesquiossido di alluminio, si può ipotizzare anche un suo funzionamento come materiale sensibile, nel campo di rivelazione in cui la camera a fissione risulta carente: in pratica si potrebbe realizzare un unico strumento combinazione di una camera a fissione e un rivelatore al diamante, sebbene sia da ben investigare questa ipotesi.

Per quanto concerne il burn-up delle tradizionali camere a fissione (cioè impieganti solo fissile), occorre tenere in considerazione due fenomeni fondamentali:

- consumo del fissile nella camera;
- accumulo dei prodotti di fissione.

Entrambe i fenomeni sono proporzionali alla fluenza neutronica e i loro effetti sono peggiorativi, perché va esaurendosi il materiale sensibile disponibile e nello strumento si crea radiazione che disturba la rivelazione del segnale utile. Se, da un lato si può intervenire a contrastare il consumo di fissile realizzando una camera a fissione autofertilizzata (cioè con un materiale fertile incorporato che si trasmuta a causa del bombardamento neutronico producendo fissile), si può intervenire meno sull'accumulo dei prodotti di fissione, poiché gran parte di essi risultano essere solidi e intrappolati nel

layer sensibile. È pur vero, però, che per singolo evento di fissione –a strumento ben progettato– un frammento di fissione rimane in seno al layer fissile e l'altro viene emesso nel gas: ne segue che vi sarà un accumulo dei prodotti di fissione anche nell'argon-azoto della camera, da cui poi le specie radioattive potranno anche depositarsi sulle superfici a contatto col gas.

Una possibile mitigazione dello sporcamento dello strumento da prodotti di fissione è il controllo dell'atmosfera gassosa interna, attraverso ventilazione: con riferimento alla Figura 16, si può pensare di realizzare un cavo coassiale con l'elettrodo interno cavo, così da creare un canale per l'estrazione del gas interno, al fine di purificarlo dai prodotti di fissione contenuti. È pensabile anche effettuare un ciclo di lavaggi della camera, sfruttando giochi di pressione per portare in seno al gas anche le specie radioattive solide depositatesi sulle superfici esposte all'argon-azoto, riducendo la contaminazione.

Un condotto di ventilazione per la camera a fissione (Figura 16) presenterebbe anche il vantaggio di poter variare la pressione di esercizio durante il passaggio da un modo di funzionamento ad un altro: è noto che il *pulse mode* e il *MSV mode* richiedono elevate pressioni della miscela Ar-N per ottimizzare le prestazioni della tecnica; il *current mode* richiede, invece, pressioni inferiori per ridurre l'addensamento di carica. Ne segue che la disponibilità di un canale di ventilazione allo strumento risulterebbe conveniente anche a variare la pressione di esercizio dello stesso a seconda della modalità di funzionamento, ottimizzandone le prestazioni e la sensibilità.

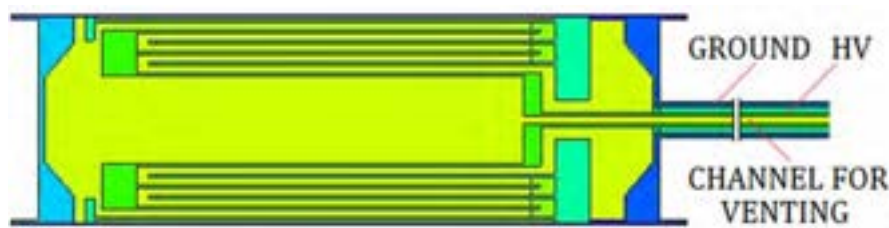


Figura 16 - Alimentazione di una camera a fissione attraverso un cavo coassiale ad elettrodo interno cavo. Il canale interno all'anodo consente di estrarre il gas dalla camera per effettuare una purificazione, riducendo il suo contenuto in prodotti di fissione.

Da un punto di vista meccanico, realizzare un'alimentazione elettrica attraverso un cavo coassiale cavo richiede che lo stesso sia a prova di perdita, nella connessione con la camera e nel suo sviluppo lineare: una possibilità realizzativa è quella di concepire il cavo di alimentazione *embedded* nello strumento, cioè costruirlo insieme ad esso, come un'unica entità. Il problema della rigidità del coassiale siffatto può essere superato concependo l'elettrodo interno con una struttura ad elica, come i cavi utilizzati per le radiofrequenze, commercialmente disponibili (Figura 17).



Figura 17 - Cavo coassiale per radiofrequenze ad elettrodo centrale cavo, commercialmente disponibile.

Evidentemente, le possibili soluzioni proposte necessitano di essere a fondo investigate, studiate ad un elevato livello di dettaglio attraverso la simulazione e verificate sperimentalmente in termini di effettiva fattibilità.

5.3 Proposta di sonde basate sul principio dei rivelatori al diamante

I rivelatori al diamante sono strumenti di nuova concezione, nati per scopi di misura di neutroni delle alte energie, e quindi –sostanzialmente– in ambito di ricerca per la fisica delle particelle e dei reattori a fusione(13).

Recentemente, a causa dell'aumento del prezzo dell' ^3He , questa tecnologia si sta mostrando un'alternativa promettente anche per la misura di neutroni delle basse energie, tipiche delle applicazioni reattoristiche e delle attività legate al ciclo del combustibile nucleare.

Le caratteristiche che rendono tali strumenti interessanti risultano:

- stato solido: il diamante sintetico, opportunamente drogato, diviene un semiconduttore, pertanto lo strumento risulta essere a stato solido e non necessita della ionizzazione di un gas per produrre segnale utile.
- resistenza alle radiazioni: sono in grado di funzionare efficacemente anche in ambienti sottoposti ad un forte campo di radiazione;
- leakage-current: non hanno necessità di essere raffreddati per poter funzionare; va verificato –tuttavia– il valore della corrente di fondo nel range di temperatura cui lo strumento si ritroverebbe ad operare nel reattore. Si prevede, comunque, un funzionamento in *current-mode* e pertanto tale problematica si tradurrebbe in un limite inferiore nel flusso neutronico misurabile.

Una delle perplessità principali connesse con questo tipo di sonde è la loro composizione: il diamante è comunque ^{12}C , il che significa che utilizzare un rivelatore che opera con esso comporta l'introduzione volontaria di materiale moderante in un reattore veloce. Questa opzione va attentamente verificata, in relazione al posizionamento ipotizzato per la sonda e per il suo contenuto di carbonio.

È indubbio, comunque, che un tale rivelatore andrebbe studiato, sviluppato ed ottimizzato per le applicazioni reattoristiche in questione, visto la giovane età di questa tecnologia. A tal proposito:

- ENEA ha già acquisito notevoli competenze nel campo dello sviluppo e della realizzazione di rivelatori al diamante;
- la possibilità di effettuare una prova all'interno del flusso neutronico del reattore TAPIRO consentirebbe di testare lo strumento in un flusso neutronico veloce direttamente "in casa", andando a verificarne le prestazioni ed eventuali problematiche.

Si propone pertanto di valutare la possibilità di sviluppare un rivelatore al diamante specializzato per applicazioni di reattore veloce, e in particolare per LFR.

6. Concettualizzazione di prove sperimentali presso il reattore TAPIRO

La disponibilità del reattore veloce TAPIRO(14) presso ENEA Casaccia rende possibile concettualizzare e programmare la prova sperimentale per le sonde descritte nel paragrafo precedente.

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.

6.1 Irraggiamenti effettuabili nel reattore TAPIRO

TAPIRO è la sorgente neutronica veloce di ENEA Casaccia, operante dal 1971. Le sue principali specifiche tecniche sperimentali sono riassunte in Tabella 32; in Figura 18 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 diametrale, 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 diametrale che ha un diametro occupabile di appena ~ 1 cm.

Sebbene le sonde precedentemente discusse siano sperimentabili anche solo nel canale diametrale 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.

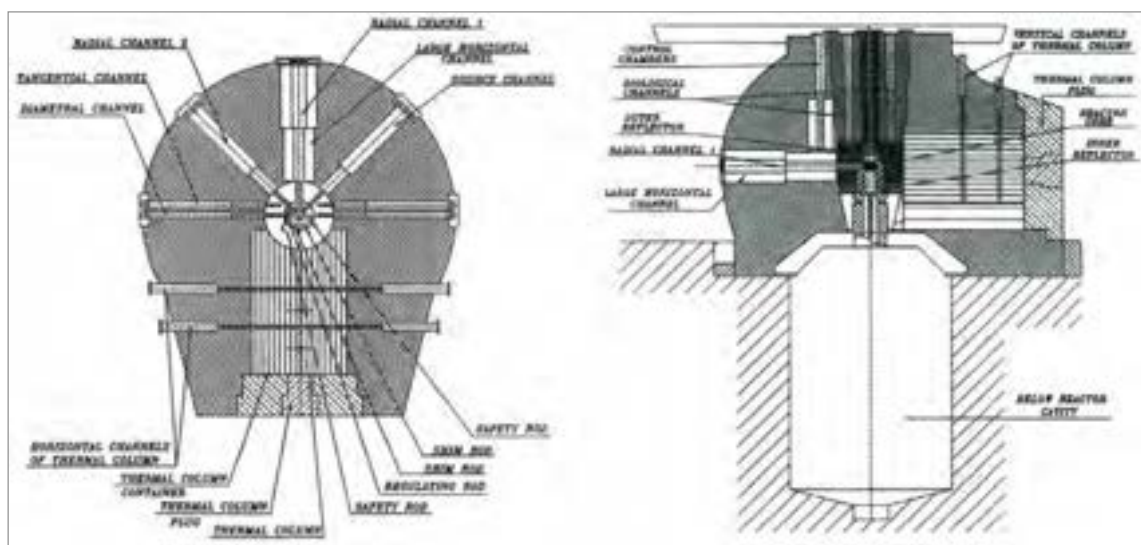


Figura 18 - A sinistra: vista in pianta del reattore TAPIRO in corrispondenza del piano mediano di nocciolo. A destra: sezione verticale del reattore sull'asse della canale radiale 1/colonna termica.

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 $\sim 2 \text{ m}^3$)

Tabella 32 - Principali caratteristiche tecniche e sperimentali del reattore TAPIRO.

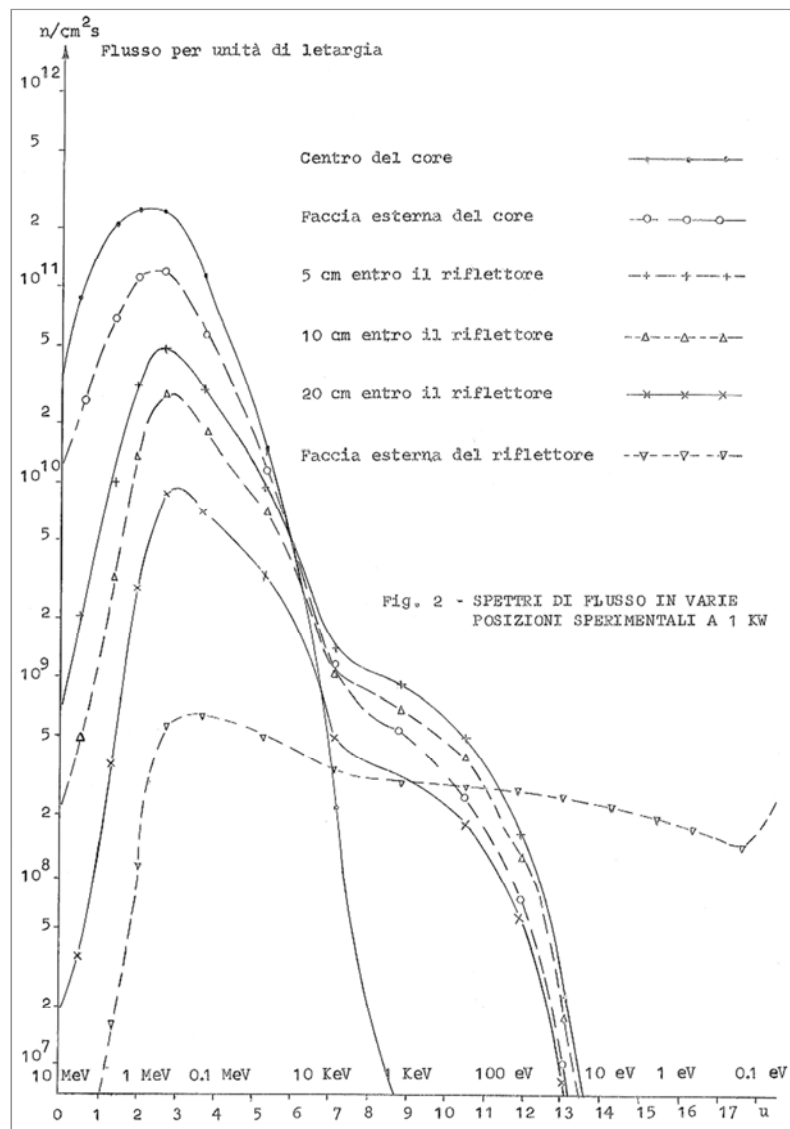


Figura 19 - Caratteristiche del flusso neutronico di TAPIRO nelle diverse posizioni sperimentali.

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.

Essendo il flusso neutronico massimo del reattore TAPIRO nell’ordine di $10^{11} \div 10^{12}$ n/cm² s, da Tabella 13 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 diametrico, e poi nel più grande canale radiale 1.

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.

Chiaramente, la CAMPAGNA A costituirebbe un ausilio di enorme valore per la progettazione della strumentazione innovativa che potrà essere poi prodotta in prototipo e testata nella CAMPAGNA B. Ne segue, che si propone per la successiva annualità l'acquisizione e la prova di alcuni strumenti commercialmente disponibili tra SPND e camere a fissione. 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. Inoltre, i ~ 6 cm del canale radiale 1 consentirebbero anche di provare la strumentazione di più piccola dimensione annegata in un blocco di piombo, andando così a simulare sperimentalmente uno spettro neutronico in piombo, verificando anche le capacità di schermo dello stesso per il campo gamma di reattore, investigando i limiti inferiori di rivelazione per gli strumenti in prova.

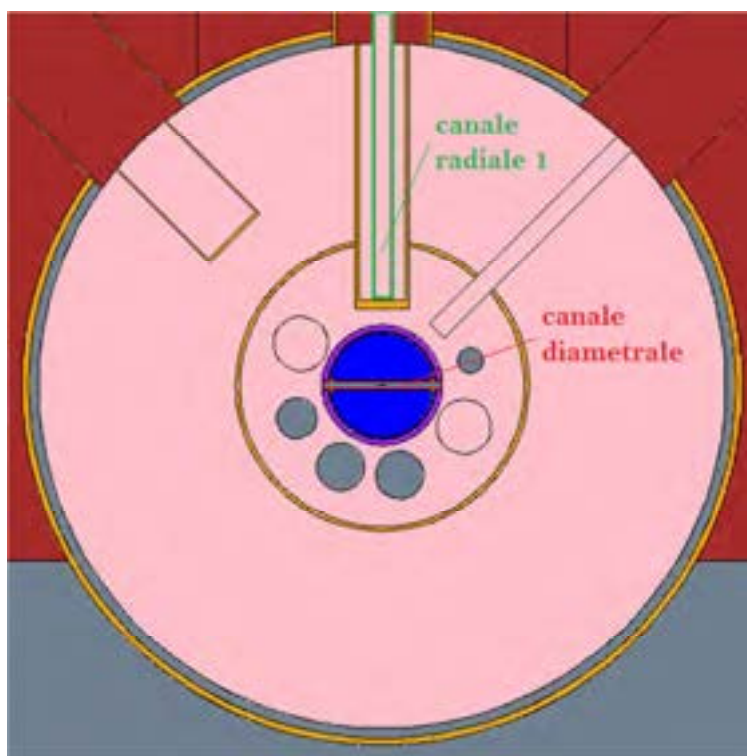


Figura 20 - Vista in pianta del piano mediano del reattore TAPIRO. In evidenza i canali sperimentali individuati per le prove proposte.

6.2.1 CAMPAGNA A: prove effettuabili nel canale diametrale

Il canale diametrale risulta essere un cilindro di diametro di ~ 1 cm, con lunghezza passante nel nocciolo di 12,58 cm. Le dimensioni ridotte consentono solo l'irraggiamento di piccola strumentazione. Fra gli strumenti analizzati in precedenza sono testabili due modelli di camere a fissione della Photonis e, potenzialmente, gli SPND pronti al cobalto delle KWD Instruments (5503-Co-210) e ARi Industries (Co-type). Con i flussi neutronici in gioco, tuttavia, non è consigliabile utilizzare questi strumenti perché essendo eccessivamente miniaturizzati fornirebbero segnali elettrici scarsamente misurabili, al di sotto dei valori minimi accettabili. È consigliabile utilizzare SPND di

diametro più elevato $\sim 7 \div 8$ mm, ospitabili nel canale diametrale, per i quali si attendono risultati molto più significativi rispetto ai SPND studiati visti i maggiori contenuti di materiale sensibile. Questa accortezza è necessaria a superare il limite del reattore TAPIRO, il cui flusso neutronico è intrinsecamente basso in valore assoluto.

Commercialmente non sono risultati disponibili SPND al cobalto delle dette dimensioni, ma il problema è facilmente superabile visto che tali strumenti sono generalmente prodotti dalle aziende su specifico ordine del cliente, visto che si tratta di lavorazioni semplici e non coinvolgenti materiali nucleari. Alternativamente, si può pensare di ricorrere anche alla sperimentazione di un assembly di SPND commercialmente disponibili, configurati come riportato in Figura 13.

A causa del “basso flusso” in magnitudo del reattore TAPIRO, non è possibile effettuare delle prove di burn-up delle camere a fissione, perché richiederebbero tempi eccessivamente lunghi: pertanto non può seguirsi con questo reattore l'evoluzione temporale dello strumento, il deterioramento dei materiali e la perdita di prestazioni/sensibilità al crescere della fluenza neutronica.

Tabella 33 riporta le prove sperimentali effettuabili nel canale diametrale di TAPIRO e i risultati attesi.

Strumento in prova		Risultati attesi
SPND	KWD Instruments	Misura della sensibilità ai neutroni. Misura del minimo valore di corrente rivelabile. Misura della sensibilità gamma.
	ARi Industries	
	Assembly #1 (Figura 13)	
Camera a fissione	Photonis CFUE 32	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).
	Photonis CFUE 43	

Tabella 33 - Prove sperimentali effettuabili nel canale diametrale del reattore TAPIRO. Le caratteristiche degli strumenti sono riportate in Tabella 4 e Tabella 9.

6.2.2 CAMPAGNA A: prove effettuabili nel canale radiale 1

Il canale radiale 1 è un cilindro di 5,6 cm di diametro, il cui bordo più vicino alla massa critica dista 9,3 cm dall'asse verticale di nocciolo. La disponibilità di spazio non pone vincoli sulla strumentazione testabile in esso, pertanto potranno essere provate anche sonde di diametro superiore, come alcune di quelle discusse in precedenza. Una ulteriore opportunità sperimentale è data dalla possibilità di testare nel canale radiale 1 anche strumentazione di piccola dimensione in prova nel canale diametrale, ma annegata in piombo (Figura 21), così da verificare gli effetti di questo materiale sul flusso neutronico e sulle prestazioni degli strumenti.

Anche in questo caso si pongono i limiti riscontrati nella campagna di misura effettuabile nel canale diametrale.

Tabella 34 riporta le prove sperimentali effettuabili nel canale radiale 1 di TAPIRO e i risultati attesi.

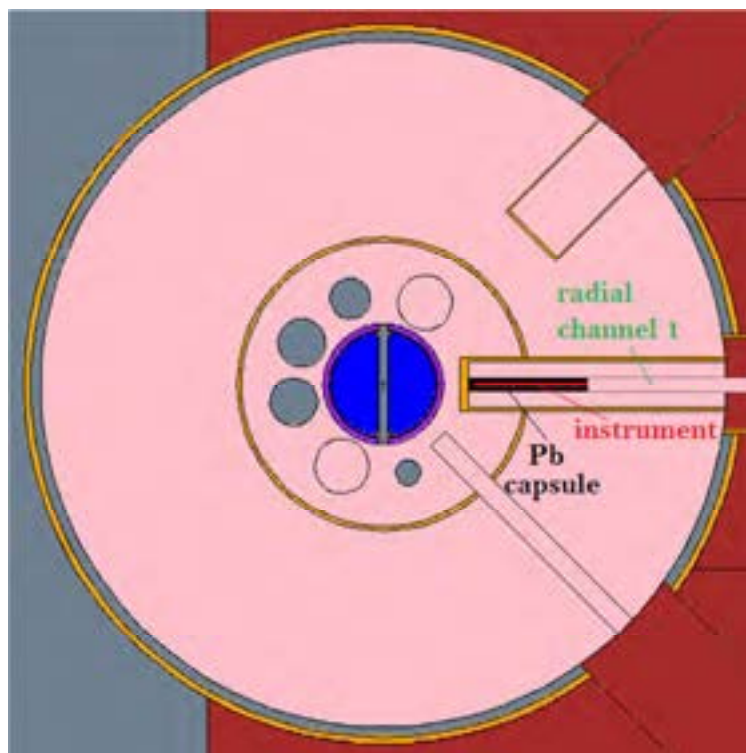


Figura 21 - Allocazione di strumentazione di piccola dimensione annegata in piombo per la prova sperimentale nel canale radiale 1 di TAPIRO.

Strumento in prova			Risultati attesi
Strumentazione annegata in piombo solido	SPND	KWD Instruments	Valutazione dell'effetto del piombo sulla sensitività gamma dello strumento.
		ARi Industries	Aggiornamento del minimo valore di corrente statisticamente rappresentativo del flusso neutronico in ambiente LFR.
		Assembly #1 (Figura 13)	
	Camera a fissione	Photonis CFUE 32	Valutazione dell'effetto del piombo sulla sensitività gamma dello strumento.
		Photonis CFUE 43	Aggiornamento dei minimi valori dei segnali elettrici (nelle diverse modalità di funzionamento) statisticamente rappresentativi del flusso neutronico in ambiente LFR.

Strumento in prova		Risultati attesi
SPND	KWD Instruments	Misura della sensitività ai neutroni.
	ARi Industries	Misura del minimo valore di corrente rivelabile.
	Assembly #2 (Figura 14)	Misura della sensitività gamma.
Camera a fissione	Photonis CFUC 06	Misura della sensitività ai neutroni.
	Photonis CFUE 07	Misura della sensitività gamma.
		Valutazione dei limiti inferiori per i segnali elettrici statisticamente significativi (minimo flusso neutronico rivelabile in maniera affidabile).

Tabella 34 - Prove sperimentali effettuabili nel canale radiale 1 del reattore TAPIRO. Le caratteristiche degli strumenti sono riportate in Tabella 4 e Tabella 9.

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 di elevate potenze (ordine delle decine di MW) 'consumerebbe' troppo in fretta lo strumento mettendolo ben presto fuori uso; 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 e la loro resistenza in ambienti sostanzialmente ostili in senso radiologico. Ulteriori studi sono necessari al fine di determinare quanto e come tali strumenti siano adattabili anche alle caratteristiche del flusso neutronico di reattore LFR.
- la strumentazione di monitoraggio della salita in potenza 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.

Al fine di colmare la mancanza di dati sperimentali, si propone una iniziale campagna di misura in TAPIRO utilizzando sonde commercialmente disponibili, così da confrontare le prestazioni ottenute dalla simulazione con quelle realmente sperimentate. 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.

Bibliografia

1. **Bubelis, E., et al.** *PLANT DATA FOR THE SAFETY ANALYSIS OF THE ETDR (ALFRED)*. 2012. Leader Project WP5 - TEC058-2012.
2. **Manni, F., Mansani, L. e Alemberti, A.** *DESCRIPTION, FUNCIONAL SIZING AND DRAWING OF THE MAIN COMPONENTS OF THE ETDR CONTROL AND SHUTDOWN RODS*. 2013. Leader Project WP3 - TEC073-2014.
3. **Odriozola, L., Rivero, F. e Alemberti, A.** *STATE OF THE ART OF INSTRUMENTATION AND CONTROL SURVEY*. 2012. Leader Project WP4 - DEL006-2012.
4. —. *INSTRUMENTATION SPECIFICATIONS*. 2012. Leader Project WP4 - DEL020-2012.
5. **Centronic**. Centronic fission chamber. [Online] <http://www.centronic.co.uk/fission.htm>.
6. **Photonis**. Photonis fission chamber for in-core use. [Online] <http://www.photonis.com/nuclear/products/fission-chambers-for-in-core-use/>.
7. —. Photonis fission chamber for out-of-core use. [Online] <http://www.photonis.com/nuclear/products/fission-chambers-for-out-of-core-use/>.
8. **KWD Nuclear Instruments**. Self Powered Neutron Detectors. [Online] <http://www.kwdnuclearinstruments.se/self-powered-neutron-detectors>.
9. **ARi Industries**. Self Powered Neutron Detectors. [Online] http://www.ariindustries.com/catalog/self_powered_neutron_detectors.pdf.
10. **Handbook, CRC material Science and Engineering**. [Online] <https://www.memsnet.org/material/aluminumoxideal2o3bulk/>.
11. **Elert, Glenn**. Resistivity of Carbon, Diamond. *The Physics Factbook*.
12. *Using high-temperature electrical resistivity measurements to determine the quality of diamond films*. **Vandersande, J.W. e Zoltan, L.D.** 1995, Diamond and related Material.
13. **Galbiati, Arnaldo**. CVD Diamond Neutron Detectors. [Online] 2009. http://www.npl.co.uk/upload/pdf/091104_nuc_galbiati.pdf.
14. **Bove, Rocco**. Nuclear Research Reactor: TAPIRO. [Online] http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/nucleare/TAPIROBove.pdf.

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, tuttora in corso. 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 Strumentazione e Controllo degli Impianti 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.

Mauro Cappelli(ENEA)

Ricercatore ENEA, è responsabile del Laboratorio di Metodi di Progettazione e Ingegneria Sperimentale (MEPING) presso ENEA\UTFISST, Centro Ricerche Casaccia. Laureato in Ingegneria Elettronica, ha un PhD in Ingegneria Elettronica e un MSc in Nuclear Safety and Security.