



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione neutronica e termo/idraulica del nocciolo di AFRODITE

Giacomo Grasso

CARATTERIZZAZIONE NEUTRONICA E TERMO/IDRAULICA DEL NOCCIOLO DI AFRODITE

Giacomo Grasso (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

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

Titolo

Caratterizzazione neutronica e termo/idraulica del nocciolo di AFRODITE

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; Fisica dei reattori nucleari (Neutronica, Metodi deterministici)

Sommario

Il presente lavoro, partendo dai risultati della nuova concettualizzazione del nocciolo di DEMO-LFR (AFRODITE) eseguita nella precedente annualità dell'Accordo di Programma, completa la progettazione neutronica di dettaglio, caratterizzando il nocciolo ed effettuando delle analisi termoidrauliche preliminari atte a stabilire la rispondenza della configurazione proposta ai criteri generali di progetto.


Note
Copia n.
In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	02/08/13	NOME	G. Grasso	M. Tarantino	M. Tarantino
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 002	0	L	2	20

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	3
2. DEFINIZIONE DELLA CONFIGURAZIONE DI RIFERIMENTO	3
2.1. Modello di calcolo.....	5
2.2. Ricerca della criticità e dell'appiattimento di potenza	6
2.3. Configurazione finale.....	8
3. CARATTERIZZAZIONE NEUTRONICA DEL NOCCIOLO	14
4. CARATTERIZZAZIONE TERMOIDRAULICA DELLA BARRETTA CALDA.....	16
5. CONCLUSIONI	18
BIBLIOGRAFIA.....	20

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 002	0	L	3	20

1. INTRODUZIONE

Il presente documento, nel descrivere i metodi ed i risultati della progettazione neutronica e della preliminare verifica termoidraulica del nocciolo di AFRODITE, integra e completa il documento “Nuova concettualizzazione del nocciolo di DEMO-LFR: progetto preliminare neutronico, termoidraulico e termomeccanico” [1] emesso nella precedente annualità dell’Accordo di Programma tra ENEA e Ministero dello Sviluppo Economico.

2. DEFINIZIONE DELLA CONFIGURAZIONE DI RIFERIMENTO

Il primo passo per finalizzare la progettazione base del nocciolo di AFRODITE consiste nella definizione di una configurazione di riferimento. Alle informazioni di progetto già poste innanzi nella precedente annualità dell’Accordo di Programma [1], resta solo da aggiungere l’identificazione degli arricchimenti e delle zone di arricchimento necessari a garantire la criticità del nocciolo e l’appiattimento della distribuzione di potenza nello stesso, avendo come criteri guida:

- $k_{\text{eff}} = 1$ durante l’intero ciclo (ovvero, tra due successive operazioni di ricarica del combustibile);
- fattore totale di distribuzione della potenza nel combustibile ≤ 1.3225 ($= 1.15 \cdot 1.15$) [1] durante l’intero ciclo.

A causa delle ridotte dimensioni del nocciolo, il valore atteso per l’arricchimento – come anticipato nel già citato documento [1] – lascia supporre un breeding insufficiente a compensare il bruciamento del combustibile, cui farà seguito pertanto un andamento monotono decrescente della reattività nel tempo.

Conseguenza di ciò, è che per poter soddisfare il primo criterio è necessario disporre di un eccesso di reattività durante l’intero ciclo. Eccesso che scemerà col procedere dell’irraggiamento e che sarà istante per istante compensato dal corretto posizionamento delle barre di controllo e regolazione, di cui si parlerà più avanti. Puntando ad una ottimizzazione dell’uso di queste ultime, è consigliabile ricercare una configurazione che porti il nocciolo a naturale criticità a fine ciclo, senza cioè alcun bisogno di intervento correttivo da parte delle barre di controllo e regolazione, che saranno invece inserite parzialmente durante il resto del ciclo.

La scelta di questa strategia di gestione delle barre di controllo e regolazione comporta anche che il secondo criterio guida debba essere soddisfatto a fine ciclo contando solo sulla configurazione di nocciolo oggetto di indagine. Durante il resto del ciclo, invece, l’eventuale posizionamento differenziale delle barre di controllo e regolazione nel nocciolo – il valore integrale del loro inserimento essendo dettato dall’antireattività necessaria a rendere critico il sistema – contribuirà al corretto aggiustamento della distribuzione di flusso – dunque di potenza – tra gli elementi.

Sottintesa a tutto questo ragionamento, è la definizione di ciclo di irraggiamento degli elementi nel nocciolo, che deve essere pertanto ricavata preliminarmente. Come anticipato nella dichiarazione di intenti [1], uno degli obiettivi di progetto è il burn-up di picco del combustibile di AFRODITE, pari a 100 MWd/kg_{HM}. Assumendo costante

il fattore di distribuzione della potenza nel nocciolo, e pari al valore massimo assunto a progetto, 1.3225, il valore medio del bruciamento del combustibile risulta circa 75.6 MWd/kg_{HM}. Per un reattore come AFRODITE, che sviluppa 300 MW di potenza termica da un nocciolo con un inventario di circa 7.3 t_{HM}, il burn-up medio viene raggiunto in poco più di 5 anni, che pertanto saranno identificati con il tempo di permanenza in pila. La segmentazione di questo periodo complessivo di irraggiamento in cicli è prassi comune, i criteri per l'identificazione del numero di cicli essendo a) il desiderio di prolungare il più possibile i periodi di irraggiamento continuativo, aumentando il fattore di disponibilità in rete dell'impianto; b) il bisogno di limitare le escursioni di reattività durante un ciclo, riducendo la riserva di antireattività richiesta al sistema di controllo e regolazione (semplificandone dunque il progetto).

Essendo AFRODITE un reattore dimostrativo, per il quale pertanto un alto valore del fattore di disponibilità non è un obiettivo prioritario, si preferisce orientarsi verso un numero elevato di cicli. Per l'analogia tra l'arricchimento atteso per AFRODITE [1] e quello di ALFRED [2], dunque per la simile escursione di reattività attesa, si considereranno, come per ALFRED, 5 cicli di irraggiamento della lunghezza di 1 anno, al termine di ciascuno dei quali un quinto degli elementi di combustibile in nocciolo – a rotazione, quelli giunti ad un irraggiamento complessivo di 5 anni – saranno rimpiazzati da altrettanti elementi freschi. Uno schema di gestione del combustibile secondo questo approccio è mostrato in Tabella 1, a partire da una configurazione di nocciolo tutto caricato ad elementi freschi. I numeri indicano il numero di cicli di irraggiamento già subiti da un elemento, per cui a "0" corrisponde il combustibile fresco e a "5" quello esausto. Le celle con due numeri indicano l'invecchiamento del combustibile subito prima/immediatamente dopo un'operazione di ricarica. La tabella si interrompe una volta raggiunta la condizione di equilibrio del ciclo (non del combustibile!), tutti i cicli successivi ripetendosi identicamente, a rotazione, all'ultimo riportato in tabella.

Tabella 1. Schema di gestione degli elementi di combustibile in nocciolo secondo un approccio a 5 cicli.

Tempo [y]	Primo quinto	Secondo quinto	Terzo quinto	Quarto quinto	Quinto quinto
0	0	0	0	0	0
1	1/0	1	1	1	1
2	1	2/0	2	2	2
3	2	1	3/0	3	3
4	3	2	1	4/0	4
5	4	3	2	1	5/0

Raggiunta pertanto la condizione di equilibrio del ciclo, si nota come, all'inizio di ogni ciclo, il nocciolo sia composto da cinque sottoinsiemi di elementi, uno dei quali composto di elementi freschi, gli altri di elementi irraggiati da 1 a 4 anni. Analogamente, al termine di ogni ciclo, i cinque sottoinsiemi saranno tutti di un anno più irraggiati di quanto non fossero ad inizio ciclo, ovvero composti di elementi

irraggiati da 1 a 5 anni. Ad inizio ciclo (Beginning of Cycle, BoC) l'età media degli elementi di combustibile sarà pertanto di 2 anni, mentre a fine ciclo (End of Cycle, EoC), l'età media degli elementi sarà di 3 anni.

Alla luce di tale definizione, e delle considerazioni riportate in precedenza, i criteri guida per la progettazione neutronica del nocciolo di AFRODITE divengono

- $k_{\text{eff}} = 1$ a fine ciclo (EoC) con barre di controllo e regolazione estratte;
- fattore totale di distribuzione della potenza nel combustibile ≤ 1.3225 a fine ciclo (EoC) con barre di controllo e regolazione estratte.

2.1. *Modello di calcolo*

Per la progettazione neutronica del nocciolo di AFRODITE, si è preferito utilizzare il codice deterministico ERANOS [3], corredato da sezioni d'urto ricavate dalle librerie di dati nucleari JEFF-3.1 [4].

Sfruttando il modulo di calcolo variazionale nodale avanzato AVNM [5] disponibile in ERANOS, è stato possibile realizzare un modello tridimensionale cartesiano XYZ rappresentativo del nocciolo di AFRODITE, semplificato – rispetto alla configurazione reale del sistema – solo per quanto riguarda la rappresentazione dell'Inner Vessel, riprodotto da una scalettatura cartesiana della struttura reale, cilindrica.

Il modello implementato in ERANOS è mostrato di seguito: in Figura 1 è riportata la vista in pianta del modello, dalla quale si può apprezzare la fedeltà dello stesso alla geometria reale del nocciolo, mentre in Figura 2 è riportata una vista semplificata r - z (non realmente implementata) del modello per illustrarne efficacemente la rappresentazione nella terza direzione (assiale).

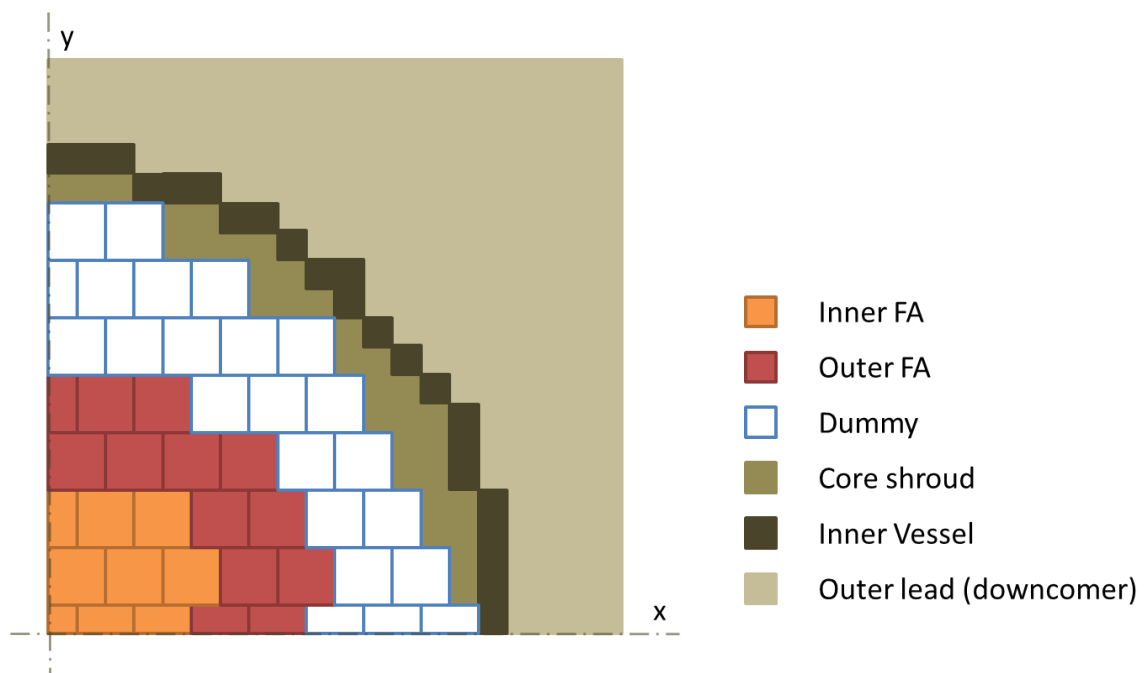


Figura 1. Veduta in pianta del modello ERANOS del nocciolo di AFRODITE.

Ciascuna delle regioni rappresentate in Figura 1 e 2 è stata preliminarmente modellizzata singolarmente, riproducendo – almeno per le regioni più vicine alla parte attiva del reattore – l'esatta geometria (reticolo di barrette, ciascuna descritta eterogeneamente) e la composizione materiale di ogni elemento presente nella regione (combustibile, guaina, isolante termico, colonna di sostegno del combustibile, plenum, ecc.).

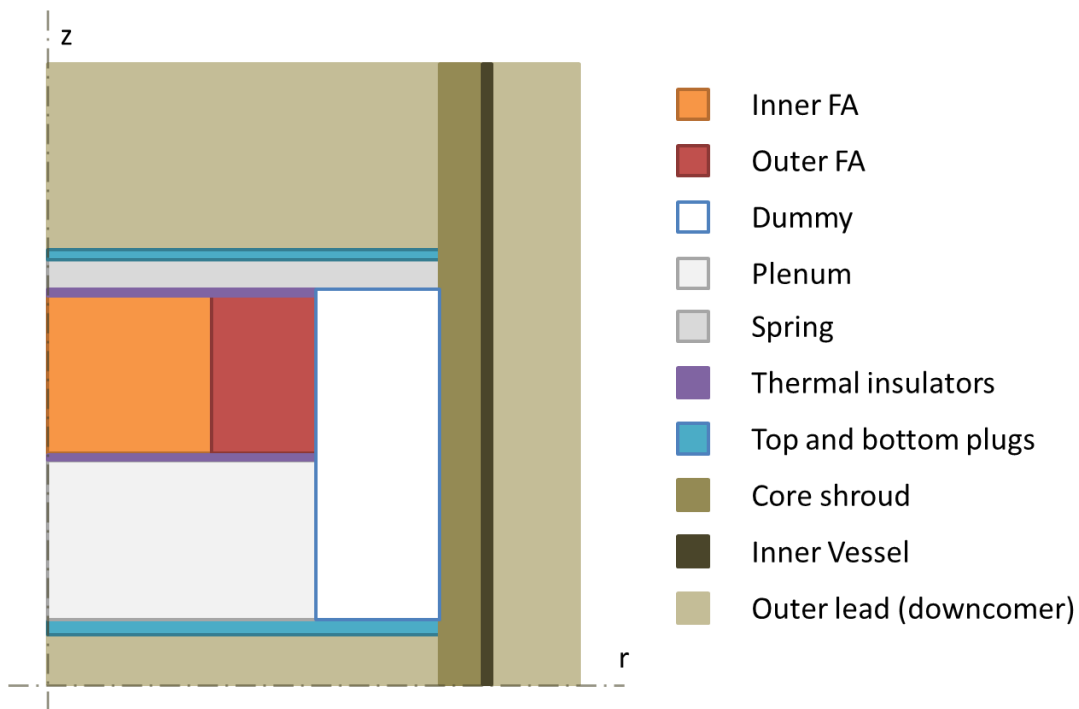


Figura 2. Schema semplificato r - z rappresentativo del modello ERANOS del nocciolo di AFRODITE.

Per ognuna delle regioni identificate, è stato eseguito un calcolo di cella finalizzato alla determinazione delle sezioni d'urto efficaci necessarie per il successivo calcolo di reattore. I calcoli di cella sono stati effettuati sfruttando al massimo le capacità del codice di analizzare i fenomeni di autoschermo energetico e spaziale così che le sezioni d'urto efficaci, da applicarsi in regioni omogeneizzate nel calcolo di reattore, mantenessero memoria, dunque rappresentatività, delle reali celle eterogenee da cui sono state ricavate.

2.2. Ricerca della criticità e dell'appiattimento di potenza

Ultimata la costruzione del modello di simulazione del nocciolo di AFRODITE, si è proceduto ad effettuare la ricerca degli arricchimenti e delle zone di arricchimento che consentissero di soddisfare simultaneamente entrambi i criteri elencati al termine della Sezione 2.

Al termine di una prima fase di ricerca, si è pervenuti ad una configurazione caratterizzata da 27 elementi in zona centrale, con un arricchimento (frazione di Pu e ^{241}Am nel combustibile) pari a 18.2 vol.%, e 46 in zona esterna, con un arricchimento pari a 22.9 vol.%.

Tale configurazione consente di pervenire a fine ciclo (BoC) con $k_{eff} = 1.00046$ e un appiattimento della distribuzione di potenza per elemento praticamente perfetta, come mostrato in Figura 3. L'escursione di reattività durante il ciclo risulta pari a 1932 pcm, come si evince dal grafico di Figura 4.

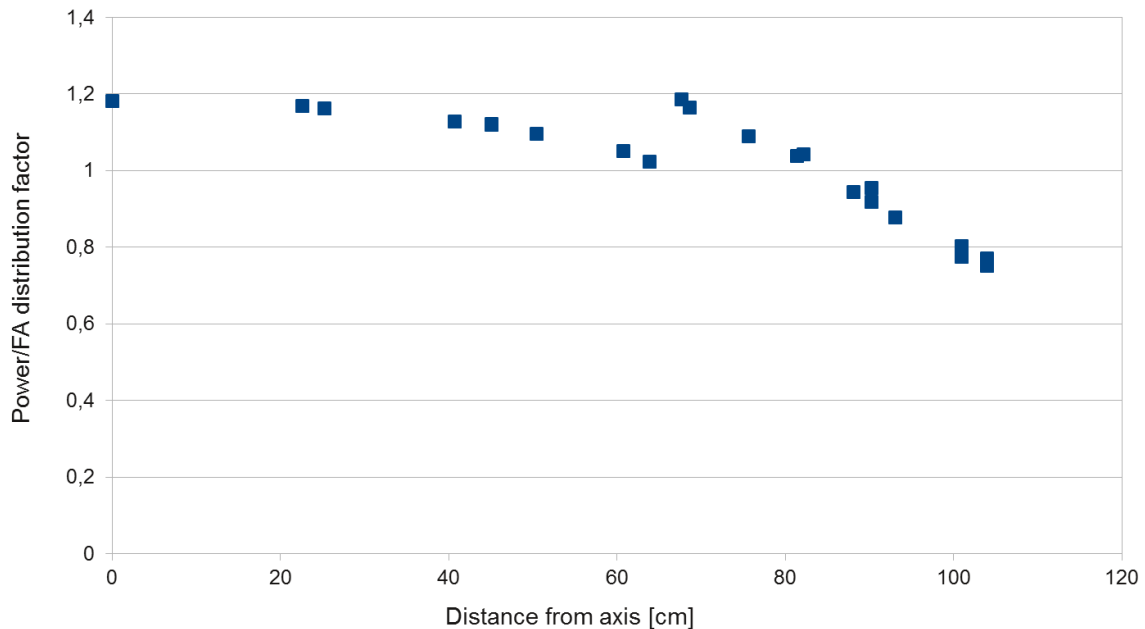


Figura 3. Rappresentazione dei fattori di distribuzione della potenza per elemento in funzione della distanza dell'elemento stesso dal centro del reattore (primo tentativo).

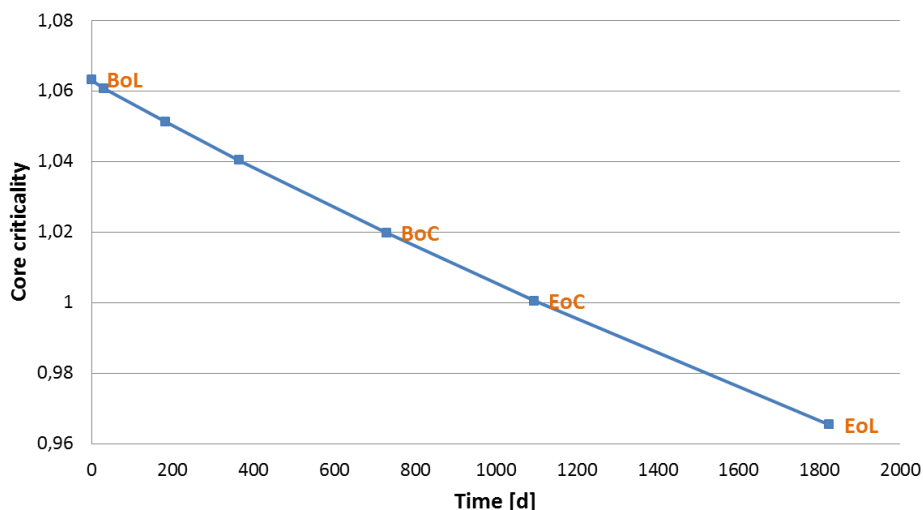


Figura 4. Evoluzione della criticità del nocciolo di AFRODITE nel tempo (primo tentativo).

Dall'analisi della distribuzione di potenza nel nocciolo, emergono però le prime criticità. In primo luogo, già il fattore di distribuzione della potenza per elemento (1.187 nell'elemento più caldo, Figura 5-a) supera, da solo, il valore assunto a riferimento nella progettazione concettuale del sistema per il fattore di distribuzione complessivo della potenza, 1.15. Passando poi alla distribuzione di potenza interna

all'elemento stesso, risulta particolarmente elevato il fattore di distribuzione della potenza proprio nell'elemento più caldo (1.226), come mostrato in Figura 5-b. Questo fattore, che integra tanto il fattore assiale quanto quello di distribuzione della potenza barretta per barretta nell'elemento, una volta combinato con il fattore di distribuzione della potenza tra elementi, porta ad un fattore complessivo di distribuzione della potenza (che chiameremo d'ora innanzi fattore di punto caldo, per semplicità) pari a 1.4553, del 10% più elevato di quanto stabilito come obiettivo in fase di pre-progetto.

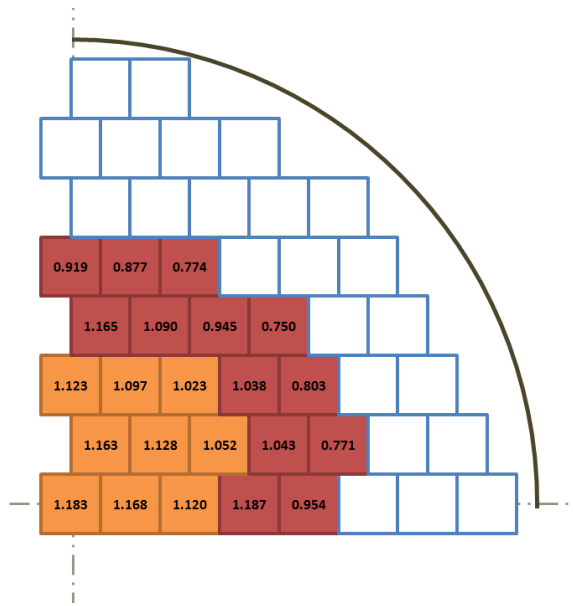


Figura 5-a. Fattori di distribuzione della potenza per elemento a fine ciclo (EoC) (primo tentativo).

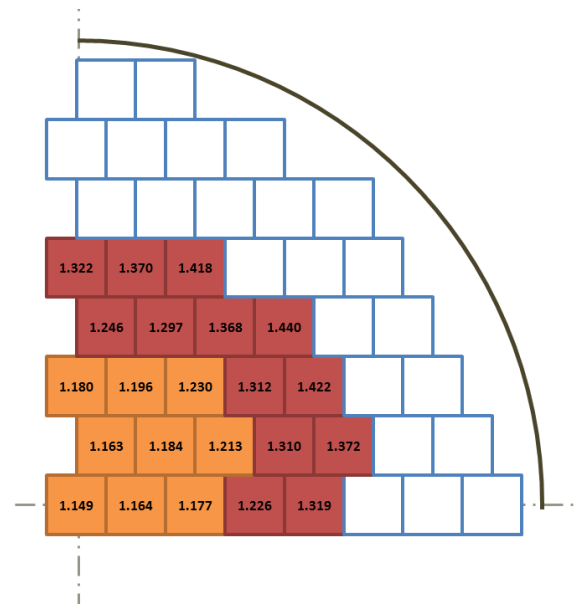


Figura 5-b. Fattori di distribuzione della potenza nell'elemento a fine ciclo (EoC) (primo tentativo).

Traducendo il picco di potenza in potenza lineare di picco – tenendo dunque in considerazione la frazione volumetrica di combustibile nell'elemento più caldo ed assegnando tutta la potenza prodotta nell'elemento al solo combustibile, risulta un valore di 371.7 W/cm. Valore che eccede il dato di progetto, richiedendo pertanto un ulteriore passo di ottimizzazione del progetto.

2.3. Configurazione finale

Ragionando in termini di fattore di punto caldo, si nota la possibilità di sbilanciare leggermente la distribuzione di flusso verso il centro del nocciolo, per sfruttare la migliore distribuzione di potenza tra le barrette dell'elemento centrale (che determina, per tale elemento, un fattore di punto caldo di 1.3593 contro 1.4553 per l'elemento più caldo, nonostante i fattori di distribuzione della potenza nei due elementi fossero assolutamente comparabili).

Per fare ciò, sono state eseguite ulteriori prove, partendo inizialmente dalla configurazione geometrica definita nella prima fase d'indagine e modificando gli arricchimenti per giungere ad un appiattimento non della distribuzione di potenza fra elementi, bensì del picco di potenza in questi. In Tabella 2 sono riportati i risultati principali delle configurazioni investigate (il caso "G6" è quello ottenuto al termine della prima fase di indagine).

Tabella 2. Risultati principali dei calcoli effettuati nella seconda fase d'indagine.

Case	enr_INN [vol.%]	enr_OUT [vol.%]	k_{eff} @ BoC	k_{eff} @ EoC	$f_{hot-spot}$ INN	$f_{hot-spot}$ OUT
G6	18.2	22.9	1.01978	1.00046	1.3599	1.4551
G7	18.4	22.8	1.02106	1.00157	1.3837	1.4541
G8	18.5	22.7	1.02110	1.00156	1.3996	1.4535
G9	18.6	22.6	1.01994	1.00043	1.4236	1.4524
G10	18.7	22.5	1.02122	1.00156	1.4313	1.4522
G11	18.7	22.4	1.02001	1.0044	1.4395	1.4518
G12	18.7	22.3	1.01881	0.99932	1.4479	1.4514
G13	18.8	22.2	1.01890	0.99934	1.4639	1.4507

Dallo studio effettuato, si perviene ad un buon appiattimento con gli arricchimenti 18.7 e 22.3 vol.% (caso "G12") in zona interna ed esterna, rispettivamente. Analizzando però in dettaglio i risultati, una considerazione può essere tratta. Ai fini della riduzione della potenza lineare di picco nel nocciolo, si osserva che uno sbilanciamento degli arricchimenti a favore della regione interna porta sì ad un aumento del fattore di punto caldo negli elementi centrali¹, ma non ad una riduzione utile del fattore di punto caldo negli elementi della zona esterna, così che il valore di picco della potenza lineare, anche nel caso di miglior appiattimento della distribuzione di potenza, rimane comunque elevato (370.8 W/cm). In pratica, il risultato ottenuto con questa strategia è – come desiderato – creare due punti caldi comparabili, ma entrambi parecchio superiori al valore di progetto anziché al di sotto (o in prossimità) di quest'ultimo.

La ragione principale della (praticamente) mancata riduzione del fattore di punto caldo in zona esterna è sostanzialmente dovuta all'aumento del fattore di distribuzione della potenza all'interno dell'elemento più caldo, che compensa la riduzione del fattore di distribuzione della potenza per elemento, ottenuta con questa strategia: nel caso "G12", i fattori di distribuzione della potenza degli elementi più caldi in zona interna ed esterna sono, rispettivamente, 1.257 e 1.170 (contro i corrispondenti 1.183 e 1.187 del caso "G6"), mentre i valori del fattore di distribuzione della potenza all'interno degli stessi risultano 1.152 e 1.241.

Questa evidenza suggerisce la necessità di modificare la strategia di appiattimento della distribuzione di potenza nel nocciolo intervenendo, oltre che sugli arricchimenti, anche sulla ripartizione degli elementi in zone di arricchimento. Analizzando in dettaglio i fattori di punto caldo in tutti gli elementi del nocciolo, 6 elementi (1.5 nel quarto di nocciolo modellato) sono stati selezionati per migrare dalla zona esterna di arricchimento a quella interna. Con questa nuova configurazione (mostrata in Figura 6) una nuova campagna di simulazioni è stata intrapresa, conducendo infine ai risultati riportati di seguito.

¹ Fino al caso "G10", il punto caldo di zona interna si localizza nell'elemento adiacente a quello centrale lungo l'asse x di Figura 1, mentre dal caso "G11" in poi il punto caldo migra nell'elemento centrale.

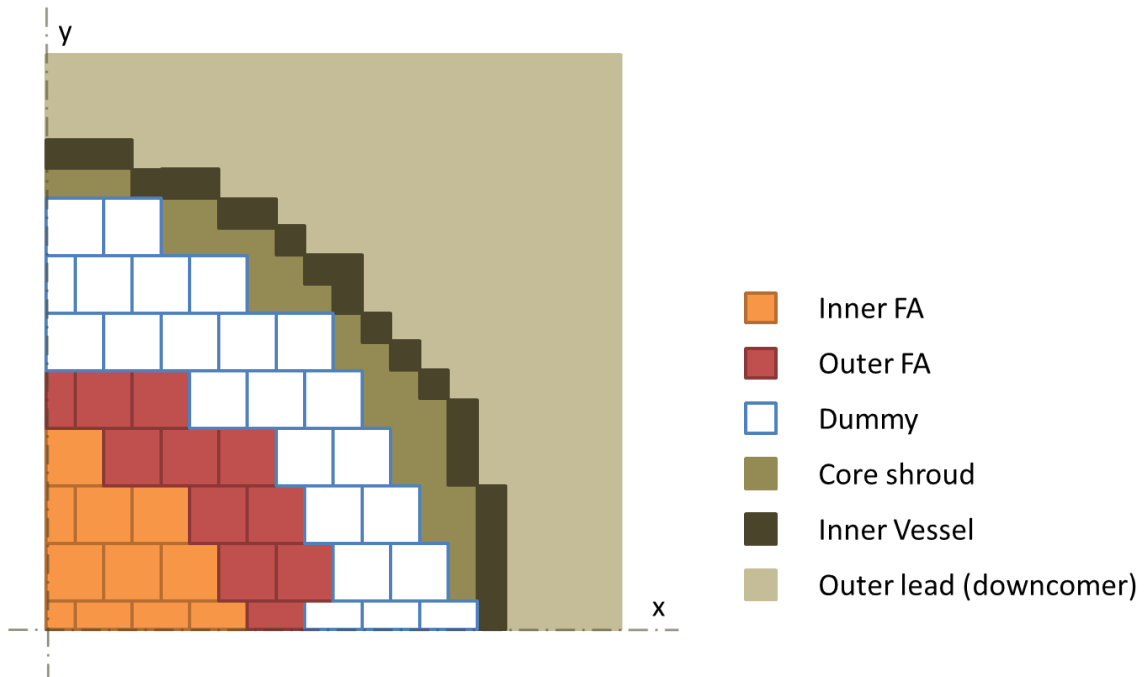


Figura 6. Veduta in pianta del nuovo modello ERANOS del nocciolo di AFRODITE.

Al termine di questa terza fase di ricerca, si è pervenuti ad una configurazione caratterizzata da 33 elementi in zona centrale, con un arricchimento (frazione di Pu e ²⁴¹Am nel combustibile) pari a 18.6 vol.%, e 40 in zona esterna, con un arricchimento pari a 23.3 vol.%.

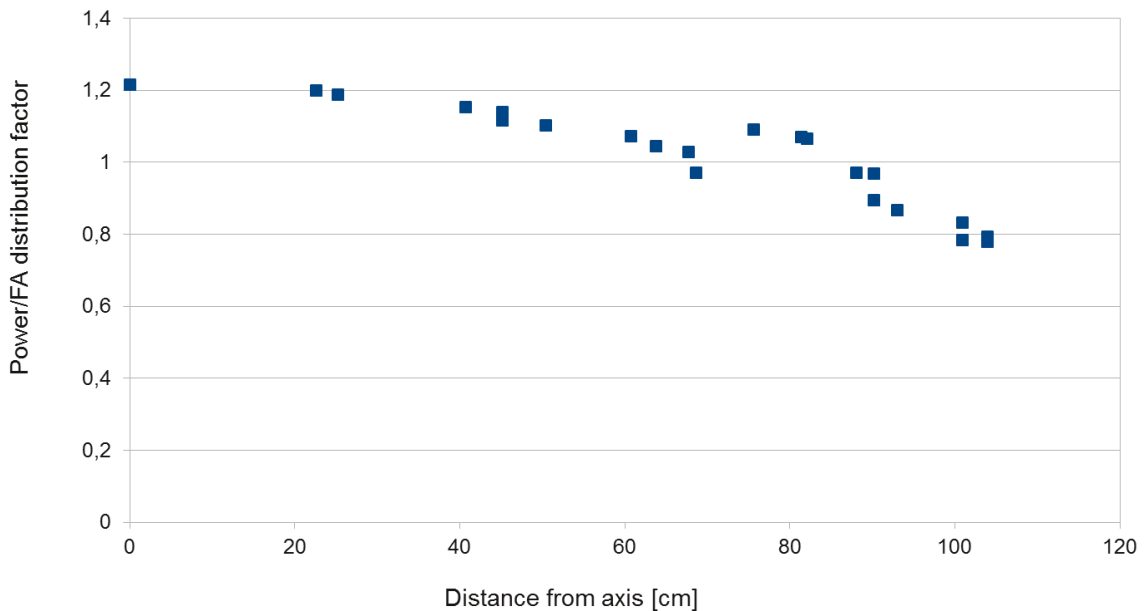


Figura 7. Rappresentazione dei fattori di distribuzione della potenza per elemento in funzione della distanza dell'elemento stesso dal centro del reattore (configurazione finale).

Tale configurazione consente di pervenire a fine ciclo (BoC) con $k_{eff} = 1.00035$ ed uno sbilanciamento della distribuzione di potenza per elemento verso il centro, come

mostrato in Figura 7. L'escursione di reattività durante il ciclo, leggermente inferiore al caso precedente per lo spostamento del combustibile in una zona a minor importanza, risulta pari a 1918 pcm, come si evince dal grafico di Figura 8.

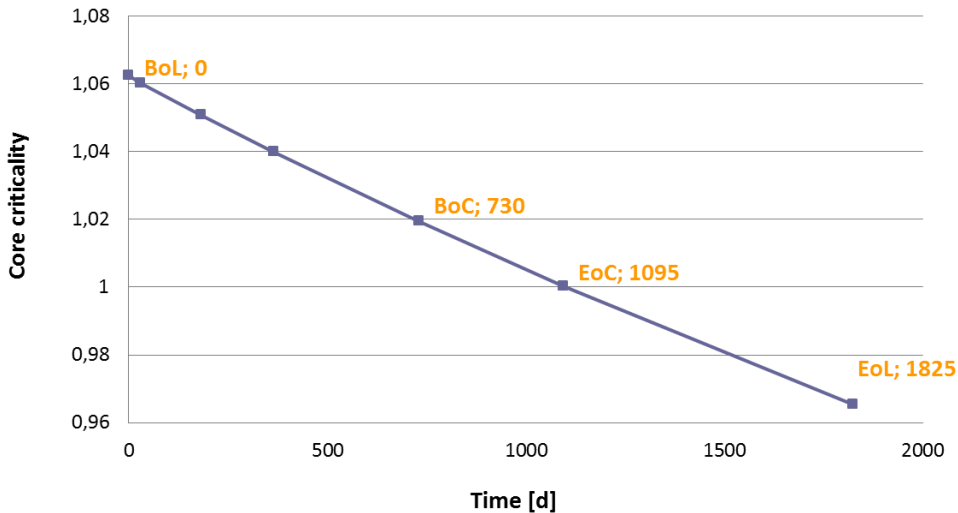


Figura 8. Evoluzione della criticità del nocciolo di AFRODITE nel tempo (configurazione finale).

Per poter stabilire se l'appiattimento di potenza sia ora soddisfacente, è nuovamente necessario analizzare i fattori di distribuzione della medesima per elemento e all'interno degli stessi, come mostrato nelle Figure 9-a e b rispettivamente.

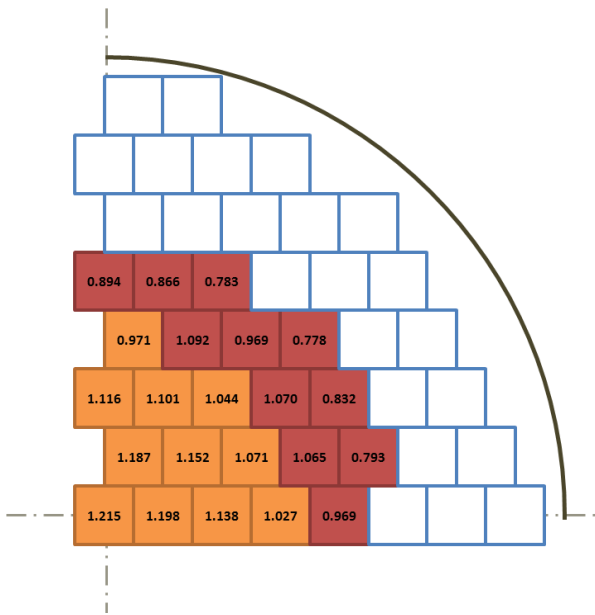


Figura 9-a. Fattori di distribuzione della potenza per elemento a fine ciclo (EoC) (configurazione finale).

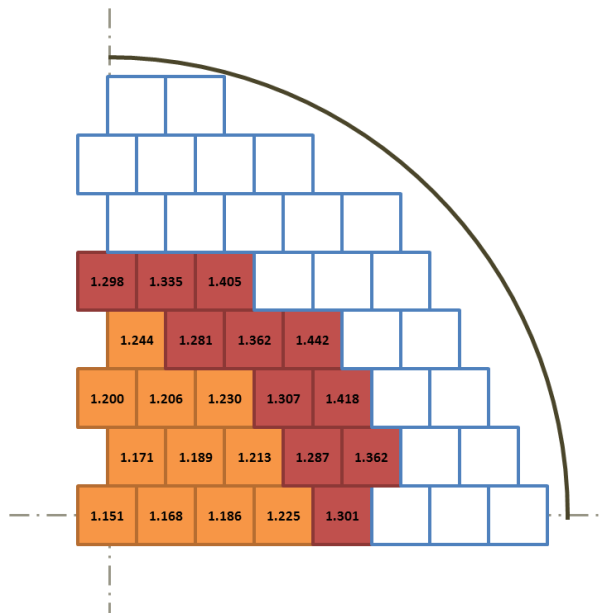



Figura 9-b. Fattori di distribuzione della potenza nell'elemento a fine ciclo (EoC) (configurazione finale).

Da tali grafici si nota che, grazie alla riduzione dei fattori di distribuzione per elemento ed interno agli elementi ottenuta con la migrazione degli elementi più caldi dalla zona esterna a quella interna, è possibile pervenire ad un fattore di punto caldo minore che nel caso discusso in precedenza e pari a 1.3996 nell'elemento immediatamente

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 002	0	L	12	20

adiacente a quello centrale lungo l'asse x di Figura 1. A tale valore corrisponde una potenza lineare di picco di 357.5 W/cm. Anche l'appiattimento risulta praticamente ottimale, essendo il concorrente fattore di punto caldo in zona esterna pari a 1.3983.

Il valore trovato per la potenza lineare di picco risulta ancora superiore a quello limite assunto a progetto (del 6% circa). Pur tuttavia, non sarà possibile abbassare ulteriormente tale valore, se non pensando di passare ad una configurazione a tre zone di arricchimento. Dato però l'esiguo numero di elementi di combustibile, si ritiene una simile strategia inutilmente complessa. È allora utile a questo punto una considerazione generale.

La potenza complessiva del sistema – 300 MW termici – non è interamente generata negli elementi di combustibile, ma anche nel resto del sistema (già dai calcoli ERANOS, solo il 97.8% della potenza è generata negli elementi di combustibile). Come visto già nel caso di ALFRED [2], il trasporto dei gamma di fissione ed una dettagliata analisi anche della deposizione di potenza dei neutroni nei diversi componenti dell'elemento di combustibile porta a ridurre ulteriormente il valore della potenza effettivamente generata nel solo combustibile. Mutuando con cautela i risultati ottenuti per ALFRED, si può stimare la potenza sviluppata direttamente nel combustibile intorno al 94 ÷ 95% di quella totale, cui corrisponderebbe una potenza lineare massima intorno a 343 ÷ 348 W/cm, valori che finalmente traggurano l'obiettivo di progetto. È evidente che, stanti le considerazioni e le stime alla base di questo risultato, sia assolutamente necessario ricorrere ad analisi termoidrauliche e di sicurezza del sistema per poter sciogliere la riserva circa l'accettabilità o meno della configurazione a cui si è pervenuti.

L'ultimo aspetto relativo alla definizione della configurazione di riferimento del nocciolo di AFRODITE riguarda la progettazione dei sistemi di regolazione e controllo e di sicurezza, che si esplica nel dimensionamento e nell'opportuno posizionamento delle barre assorbenti (di tipo *Finger Absorber Rods* [6]) sulla pianta di nocciolo. Posizionamento, questo, che impatta direttamente sulla distribuzione di potenza (anche a fine ciclo, quando le barre sono completamente estratte), richiedendo pertanto un approccio integrato di progettazione: è infatti necessario agire simultaneamente tanto sulla ripartizione del nocciolo in zone di arricchimenti quanto sul posizionamento delle barre assorbenti, verificando che tale posizionamento consenta il desiderato appiattimento di potenza anche ad inizio ciclo, a fronte di un parziale inserimento nella zona attiva delle barre dedicate al controllo ed alla regolazione. In tale ottica, la flessibilità data dalla possibilità di dotare potenzialmente ogni elemento di combustibile di una barra assorbente semplifica il lavoro di progettazione dei due sistemi sopra menzionati.

Il dimensionamento ed il posizionamento dei sistemi di controllo e regolazione e di sicurezza devono inoltre garantire una riserva di antireattività sufficiente ad espletare tutte le funzioni cui sono preposti, nominalmente:

- il sistema di controllo e regolazione deve poter compensare le variazioni di reattività legate:
 - al passaggio del sistema da freddo a potenza zero (*Cold Zero Power, CZP*) a caldo a piena potenza (*Hot Full Power, HFP*),

- all’escursione di reattività dovuta al bruciamento del combustibile tra inizio e fine ciclo,
- allo spegnimento controllato del reattore con una sottocriticità obiettivo di 1000 pcm;
- il sistema di sicurezza deve poter garantire lo spegnimento di emergenza del reattore con una sottocriticità obiettivo di 1000 pcm.

Inoltre, i sistemi di regolazione e controllo e di sicurezza – coadiuvandosi eventualmente in un intervento congiunto – devono poter garantire l’inserzione dell’ulteriore antireattività cautelativamente richiesta durante le fasi di ricarica (con una sottocriticità obiettivo, in tal caso, di 5000 pcm).

Le riserve di antireattività richieste ai due sistemi sono riassunte, per il caso in esame, in Tabella 3.

Tabella 3. Riserve di antireattività richieste ai sistemi di controllo/regolazione (CRs) e di sicurezza (SRs).

Function	CRs	SRs
CZP to HFP	≈ -1000 pcm	--
Reactivity swing	-1918 pcm	--
Shutdown/SCRAM	-1000 pcm	-1000 pcm
Refuelling	-4000 pcm	

Anche se non menzionato fino a questo punto, la configurazione presentata in precedenza, e candidata ad essere quella di riferimento, integra implicitamente una distribuzione di barre assorbenti appartenenti ad entrambi i sistemi, mostrata in Figura 10.

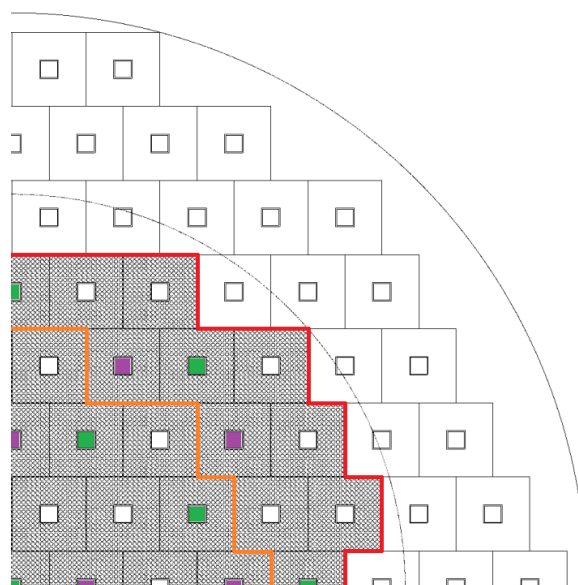


Figura 10. Posizionamento delle barre di controllo/regolazione (verde) e di sicurezza (viola) nel nocciolo.

Così come sono stati progettati, i due sistemi hanno riserve di antireattività stimate, attraverso calcoli di reattore con il codice ERANOS, in 7070 pcm il sistema di regolazione e controllo, e 8350 pcm il sistema di sicurezza. Tali valori sono notoriamente sovrastimati dal codice a causa dell'omogenizzazione dell'assorbitore nell'intero elemento di combustibile. Tale effetto è stimabile (conservativamente) in circa 50% in più del valore reale [6], per cui le reali riserve di antireattività dei due sistemi devono essere considerate pari a 4700 e 5550 pcm circa. Si deduce pertanto che il sistema di regolazione e controllo è capace di gestire il normale esercizio del reattore ed il suo spegnimento controllato, con un ulteriore margine di antireattività di circa 800 pcm per compensare potenziali incertezze legate ai dati nucleari; parimenti, il sistema di sicurezza è capace di spegnere il reattore in caso di emergenza e fornire interamente l'antireattività richiesta durante le fasi di ricarica, con un ulteriore margine di antireattività di circa 560 pcm, di nuovo per compensare potenziali incertezze legate ai dati nucleari.

I risultati ERANOS relativi all'inserimento parziale delle sole barre di regolazione e controllo a inizio ciclo (BoC) suggeriscono l'efficace posizionamento di queste nel garantire un efficiente appiattimento della distribuzione di potenza. Ciò nonostante, si preferisce lasciare a più dettagliati calcoli Monte Carlo l'individuazione dell'esatta profondità di inserzione, eventualmente differenziale, di tali barre.

3. CARATTERIZZAZIONE NEUTRONICA DEL NOCCIOLO

Una volta individuata la configurazione di riferimento per il nocciolo di AFRODITE, resta da ultimare la caratterizzazione neutronica.

Le Figure 11 e 12 mostrano i profili di flusso neutronico lungo gli assi z e x come indicati nelle Figure 2 e 1. Lungo l'asse z (Figura 11), si è preferito riportare non già il valore del flusso, bensì il fattore di forma assiale dello stesso, per praticità.

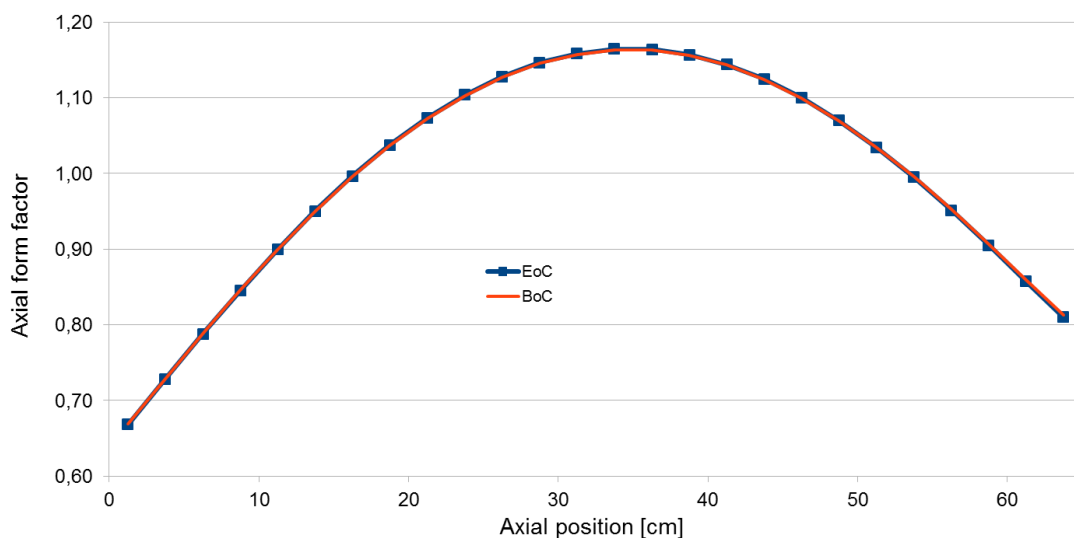


Figura 11. Fattore di forma assiale al centro dell'elemento centrale.

In Figura 12 è anche mostrato il profilo, lungo l'asse x, di alcune porzioni dell'intero flusso neutronico, integrate solo su parte dei gruppi energetici su cui si è espletato il

calcolo di reattore (33 in totale), per rendere un'idea della variazione dello spettro in pianta.

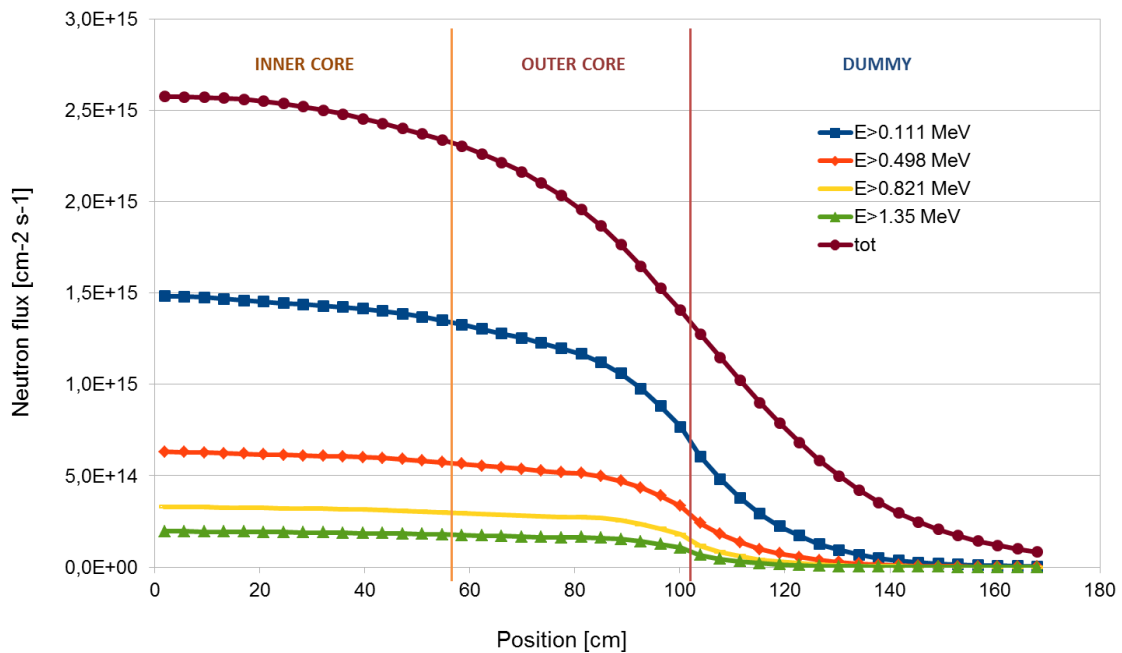



Figura 12. Profilo di flusso (totale e per porzioni di spettro) lungo l'asse x di Figura 1.

In Tabella 3 sono infine riportati gli inventari di attinidi nel combustibile dell'intero nocciolo, facendo riferimento all'inizio ed alla fine della vita dello stesso. Pur essendo tali configurazioni non rappresentative di stati di interesse pratico per il reattore (da quanto spiegato nel Capitolo 2 circa l'ipotesi di ciclo di gestione del combustibile, inizio vita, BoL, è una condizione singolare del reattore, mentre fine vita, EoL, è del tutto fittizia), esse sono perfettamente rappresentative del combustibile fresco ed esausto caricato e scaricato ogni anno dal nocciolo, i valori riportati – se ridotti ad un quinto – corrispondendo esattamente agli inventari di attinidi negli elementi in movimentazione.

Tabella 3. Inventari di massa del combustibile ad inizio (BoL) e fine (EoL) vita sull'intero nocciolo, e bilanci in massa e numero d'atomi.

Element	BoL [kg]	EoL [kg]	Balance [wt.%]	Balance [at.%]
U	5701.31	5260.85	-7.726	-7.727
Np	0.00	2.37	--	--
Pu	1584.49	1451.57	-8.389	-8.392
Am	20.87	39.53	+89.415	+88.964
Cm	0.00	3.28	--	--
TOT	7306.67	6757.60	-7.515	-7.521

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 002	0	L	16	20

Come si evince dai dati in tabella, in cinque anni di funzionamento a pieno carico (5 *Equivalent Full Power Years*, EFPY) nel reattore vengono effettivamente bruciati circa 550 kg di attinidi. I bilanci dei singoli elementi rendono invece conto anche delle trasmutazioni avvenute tra i diversi isotopi. A meno di alcune fissioni dirette, ad esempio, l'intera massa di uranio scomparsa (440 kg, quasi interamente di ^{238}U) è in realtà trasmutata in ^{239}Pu , sotto la cui forma ha liberato energia per fissione. Nonostante l'ingente fertilizzazione dall'uranio, il bilancio di massa del plutonio risulta negativo (-133 kg), come atteso per un reattore con un simile arricchimento iniziale. Facendo riferimento alla definizione stretta di breeding (limitandosi cioè alla massa del solo plutonio), al termine dei 5 anni di continuo irraggiamento il valore mediato sul nocciolo è circa 0.916. Considerando invece le masse equivalenti di ogni singolo isotopo, calcolate mediante opportuni coefficienti di equivalenza² ricavati per il sistema in esame, il breeding efficace del sistema risulta essere circa 0.871, corrispondente ad una riduzione della massa di ^{239}Pu equivalente da circa 1160 a 1010 kg.

Il bilancio in numero di atomi di nuclidi pesanti (-7.521%) corrisponde anche al burn-up mediato sul nocciolo nei cinque anni di funzionamento. Una stima del burn-up mediato sul nocciolo nello stesso intervallo di tempo può essere altresì ricavata semplicemente dalla definizione stessa di burn-up, da cui risulta 74.93 GWd/t_{HM}. Il confronto tra i due valori porta a dedurre il rilascio medio di energia utile per ogni evento di fissione (il *Q-valore* efficace medio delle fissioni), pari a 212.7 MeV. Applicando infine a tale valore mediato il fattore di punto caldo, e supponendo (ipotesi estremamente cautelativa) che quest'ultimo non vari in posizione ed entità lungo il ciclo, si deduce che il burn-up di picco nel nocciolo è pari a circa 105 GWd/t_{HM}, valore leggermente superiore a quello trapiantato in fase di progetto.

4. CARATTERIZZAZIONE TERMIDRAULICA DELLA BARRETTA CALDA

Dai dati raccolti durante la caratterizzazione neutronica del nocciolo di AFRODITE è possibile ricavare tutte le informazioni necessarie per un calcolo di barretta calda, che permetta di stabilire se le temperature che si instaurano nel nocciolo – stante la presente configurazione – siano accettabili dal punto di vista dei vincoli tecnologici assunti a progetto (che, ricordiamo, sono principalmente legati alla resistenza dei materiali in ambiente di piombo).

Per l'analisi, si farà riferimento alla barretta che sviluppa la massima potenza lineare, così come stimata mediante i calcoli di neutronica con ERANOS. A partire dal valore massimo della potenza lineare, ed applicando il fattore di forma mostrato in Figura 11, è stato ricostruito l'intero profilo assiale della distribuzione di potenza, utilizzato quindi per il calcolo termoidraulico. La portata di refrigerante per sottocanale che garantisce una temperatura media di uscita nocciolo pari a 480 °C è di circa 1.43 kg/s, cui corrisponde una velocità di ingresso del refrigerante di 1.45 m/s.

² Si ricorda come i coefficienti di equivalenza esprimano il contributo di ogni singolo isotopo alla reattività del sistema, rapportando tale contributo a quello di un isotopo fissile di riferimento (^{239}Pu) e ad uno fertile di riferimento (^{238}U).

I profili di temperatura media di sottocanale e sulle superfici esterna ed interna della guaina e della pastiglia di combustibile sono mostrati in Figura 13. La massima temperatura di parete risulta 536.4 °C alla fine della zona attiva, in corrispondenza di una temperatura media di sottocanale di 496.3 °C (con un salto termico tra parete e refrigerante di 40.1 °C). Come atteso, tale valore supera quello di progetto (525 °C) per via della maggior potenza lineare. Ciononostante rimangono ancora 13.6 °C di margine al limite assunto per proteggere la guaina dall'azione corrosiva del piombo (34% dell'intero salto termico): solo una più dettagliata analisi di incertezza permetterà di stabilire se tale valore sia accettabile o meno.

Parimenti, la maggior potenza lineare (rispetto al valore assunto a progetto) implica una temperatura massima di combustibile, in condizioni nominali, di circa 2080 °C (a circa 36 cm dal fondo della zona attiva), di circa 80 °C superiore al valore obiettivo. Pur essendo tale valore ben al di sotto della temperatura di fusione del combustibile, è necessaria una verifica di sicurezza del sistema in transitorio di potenza a fronte della massima inserzione di reattività attendibile per poter stabilire se il combustibile risulti protetto dal rischio di fusione anche locale, o in alternativa stimare l'estensione della regione soggetta a fusione, per poter dedurre i margini di sicurezza dell'impianto ed eventualmente ricavare feedback di progetto.

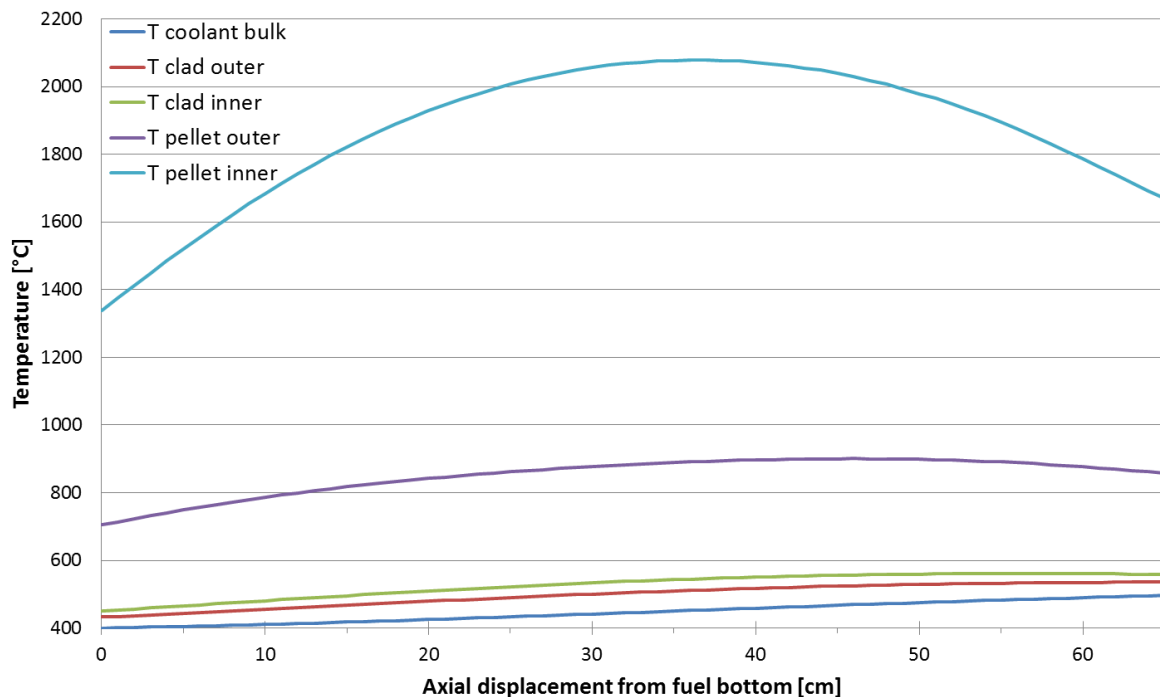



Figura 13. Profili di temperatura lungo la colonna attiva della barretta più calda.

Si noti che tutti i risultati presentati e discussi in questo capitolo sono stati ricavati assumendo come valore massimo della potenza lineare 357.5 W/cm, ovvero considerando l'intera potenza depositata nell'elemento come generata esclusivamente nel combustibile. Questa assunzione non cambia la stima della temperatura del refrigerante, che comunque si fa carico del raffreddamento dell'intero elemento, ma porta a sovrastimare le temperature di guaina e combustibile, che hanno in carico una potenza da smaltire maggiore di quella effettiva. La

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 002	0	L	18	20

conservatività della presente ipotesi potrà a fortiori confermare la robustezza del sistema, qualora suggerita dalle analisi di sicurezza.


5. CONCLUSIONI

I risultati della progettazione neutronica e termoidraulica di dettaglio del nocciolo di AFRODITE sono stati presentati nei capitoli precedenti, insieme ai modelli di calcolo utilizzati per ricavarli.

Il nocciolo, composto da 73 elementi di combustibile, raggiunge la desiderata configurazione critica e con un eccellente appiattimento della distribuzione di potenza – sotto l'ipotesi di un periodo di irraggiamento in pila di 5 anni ed una strategia di ricarica di un quinto di nocciolo ogni anno – qualora i 33 elementi della regione centrale siano caricati con un combustibile arricchito (in termini di contenuto di plutonio e Americio 241) al 18.9 vol.% ed i rimanenti 40 siano invece caricati con un combustibile più arricchito (23.6 vol.%). Tale configurazione esibisce, nell'anno che intercorre tra due ricariche successive, un'escursione di reattività di -1918 pcm. Per la compensazione di questa reattività ed il controllo e la gestione in sicurezza del sistema, sono stati dimensionati e posizionati due sistemi di barre assorbenti le cui efficacia, in termini di riserva di antireattività, sono state stimate pari a 4700 pcm per il sistema di regolazione e controllo (costituito da 17 assorbitori a dito posizionati in prossimità degli elementi più caldi) e 5550 per quello di sicurezza (costituito da 14 assorbitori a dito posizionati uniformemente in parte delle rimanenti posizioni). È utile sottolineare che l'uso simultaneo di tutti e 17 gli assorbitori nelle operazioni di regolazione e controllo del nocciolo consente di aggiustare in modo estremamente puntuale la distribuzione di potenza durante il ciclo, evitando così macchie calde incontrollabili, e limita notevolmente la massima reattività inseribile nel nocciolo per estrazione accidentale di una barra (foss'anche la più importante).


Al termine dei 5 anni di irraggiamento in nocciolo, nell'elemento medio – il cui inventario iniziale di attinidi è di circa 100 kg ripartiti tra uranio (78.1 kg), plutonio (21.7 kg) ed americio 241 (0.29 kg) – circa 7.52 kg di nuclei pesanti vengono fissionati generando altrettanti nuclei leggeri. Il bilancio puntuale per elemento permette di apprezzare come circa 6 kg di uranio siano (principalmente) trasmutati in plutonio, il quale, ciononostante, diminuisce di circa 1.82 kg. Simultaneamente vengono formati (al netto delle concorrenti trasmutazioni e fissioni) 32 g di nettunio, 256 g di americio (che si sommano ai circa 290 g preesistenti) e 45 g di curio. Il bilancio netto di attinidi fissionati nei 5 anni di irraggiamento corrisponde ad un bruciamento medio del combustibile pari a circa 75 MWd/kg_{HM}, mentre il valore di picco sfiora i 105 MWd/kg_{HM}.

Nonostante gli eccellenti risultati ottenuti sull'appiattimento di potenza, a causa di un errore di sottostima in fase di progetto (eccesso di confidenza nella possibilità di ottenere un appiattimento della distribuzione della potenza estremamente spinto), il valore massimo della potenza lineare è risultato superiore rispetto a quanto atteso (circa 357 W/cm contro 348 W/cm), così che, di conseguenza, anche i valori relativi alla massima temperatura di guaina e di combustibile eccedono i limiti assunti (536.4 °C per la guaina e circa 2080 °C per il combustibile contro 525 °C e 2000 °C, rispettivamente) anche se, per l'ampiezza dei margini presi in considerazione, nessuno di tali valori, di per sé, desta preoccupazione, tutti restando al di sotto dei

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 002	0	L	19	20

limiti fisici di sicurezza (550 °C e circa 2800 °C, nel solito ordine). L'effetto netto di riduzione dei margini richiede un'accurata analisi di sicurezza (sia con codici *best estimate* per analisi di sicurezza, sia con codici che consentano la propagazione delle incertezze) per sondare l'effettiva robustezza del sistema.

A conclusione di quanto detto, è interessante notare come – qualora i risultati delle sopracitate analisi di sicurezza dovessero suggerire la necessità di modificare il progetto per garantire il rispetto dei vincoli con margini più ampi di quelli assicurati dalla presente configurazione – potrebbe risultare sufficiente allungare la colonna attiva di pochi centimetri per diluire la potenza lineare media, dunque abbassando anche il valore di picco (l'esatta entità dell'incremento di altezza attiva potrà essere stabilita solo alla luce dei risultati delle analisi puntuali di sicurezza, dunque dell'effettivo superamento dei vincoli di progetto).

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 002	0	L	20	20

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Artioli *et al.* Nuova concettualizzazione del nocciolo di DEMO-LFR: progetto preliminare neutronico, termoidraulico e termomeccanico. Rapporto Tecnico ENEA-CIRTEEN RdS/2012/041, Settembre 2012.
- [2] C. Petrovich *et al.* Definition of the ALFRED core and neutronic characterization. Rapporto Tecnico LEADER DEL007-2012_rev.1, Marzo 2013.
- [3] G. Rimpault *et al.* The ERANOS code and data system for Fast Reactor neutronic analyses. Atti del *International Conference on the PHYSics Of Reactors (PHYSOR 2002)*, Seoul, Korea (2002).
- [4] J.C. Sublet *et al.* ECCOLIB-JEFF-3.1 libraries. Rapporto Tecnico CEA R-6100, Febbraio 2006.
- [5] G. Palmiotti *et al.* Variational Nodal Method for the solution of the diffusion and transport equation in two and three dimensional geometries. Rapporto Tecnico CEA NT-SPRC-LEPh-91-208 rev.1, Luglio 2000.
- [6] C. Artioli *et al.* ELSY neutronic analysis by deterministic and Monte Carlo methods: an innovative concept for the control rod systems. Atti del *International Congress on the Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'09)*, Tokyo, Japan (2009).