ENEA Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP2- 024	L	1	86

Titolo

Analisi di configurazioni critiche di noccioli PWR di piccola taglia ad alto burnup

Ente emittente CIRTEN

PAGINA DI GUARDIA

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto tecnico/ Technical Report

Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"

Argomenti trattati: Reattori ad acqua leggera/Light Water Reactors

Sommario

Questo rapporto è stato emesso nell'ambito del secondo PAR dell'accordo di programma ENEA-MSE e costituisce uno dei deliverable dell'obiettivo M "Progettazione core innovativo" della linea progettuale LP2 "Reattori Evolutivi INTD - International Near Term Deployment" del tema di ricerca "Nuovo Nucleare da Fissione".

Il documento riporta i risultati di uno studio preliminare sulla fattibilità di alcuni modelli di nocciolo per un reattore ad acqua leggera in pressione senza controllo chimico della reattività e di taglia non superiore ai 150 MW. Per i calcoli di cella e di evoluzione sono stati utilizzati i codici NEWT e TRITON del sistema SCALE 6 e le sezioni d'urto ottenute dalla libreria ENDF/B-V.

Note

Copia n. **In carico a:**

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	28-09-2010	NOME	E. Bianchi		S. Monti
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		CONVALIDA	VISTO	APPROVAZIONE

CIRTEN

CONSORZIO INTERUNIVERSITARIO

PER LA RICERCA TECNOLOGICA NUCLEARE

UNIVERSITA' DI ROMA 1

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ELETTRICA

ANALISI DI CONFIGURAZIONI CRITICHE DI NOCCIOLI PWR DI PICCOLA TAGLIA AD ALTO BURNUP

PROGETTO DI RICERCA: Studio di configurazioni critiche di noccioli PWR ad alto burnup e caratterizzati da una bassa produzione di rifiuti radioattivi a bassa attività

AUTORI

Prof. A. Gandini
Prof. A. Naviglio
Ing. S. Zanot

CIRTEN - UNIROMA1 RL 1154/2010

Roma, Marzo 2010

Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP2 punto M, AdP ENEA MSE del 21/06/07
Tema 5.2.5.8 – "Nuovo Nucleare da Fissione".

INDICE

		pag
	Sommario	6
1	Introduzione	7
2	Modello PWR “classico” con cluster di barre di controllo dall’alto	10
	2.1 Introduzione	10
	2.2 Modello “A-1”	13
	2.3 Modello “A-2”	17
	2.4 Conclusioni modelli “A”	19
3	Modello PWR con barre di controllo cruciformi tipo BWR	20
	3.1 Introduzione	20
	3.2 Modello “B-1”	25
	3.3 Conclusioni modelli “B”	28
4	Modello PWR con barre di controllo rotanti esterne al nocciolo	29
	4.1 Introduzione	29
	4.2 Modello “C-1”	30
	4.3 Modello “C-2”	33
	4.4 Modello “C-3”	34
	4.5 Conclusioni Modelli “C”	37
5	Modello PWR “leaky” con assorbitore esterno	38
	5.1 Introduzione	38
	5.2 Modelli “leaky slab reactor”	40
	5.2.1 - Introduzione	40
	5.2.2 - Modello “D-1”	40
	5.2.3 - Modello “D-2”	44
	5.2.4 - Modello “D-3”	46
	5.3 Modelli “leaky donut reactor”	48
	5.3.1 - Introduzione	48
	5.3.2 - Modello “E-1”	48
	5.3.3 - Modello “E-2”	51
	5.3.4 - Modello “E-3”	53
	5.4 Conclusione sui modelli “leaky”	55
6	Conclusioni	56
7	Sviluppi futuri	57
8	Bibliografia e pagine web consultate	58

9 Appendici 59
APPENDICE A – Il codice di calcolo NEWT 59
Introduzione 59
Validazione del codice NEWT 61
Conclusioni sulla validazione del codice NEWT 69
APPENDICE B – Il codice di calcolo TRITON 70
Introduzione 70
Validazione del codice TRITON 72
Conclusioni sulla validazione dei codici NEWT e TRITON 74
APPENDICE C – Tabelle 75

Lista delle Figure

		pag
Figura 2.1	Schematizzazione in NEWT del fuel assembly “17x17” con 20 e 32 Gd_2O_3 rods	11
Figura 2.2	Evoluzione k_∞ in un fuel assembly “17x17” con e senza boro disciolto	12
Figura 2.3	Bruciamento del ^{155}Gd nelle barrette con veleni bruciabili del fuel assembly “17x17”	13
Figura 2.4	Modello core “A-1” con fuel assembly “17x17” (barre estratte)	14
Figura 2.5	Core “A-1”, numerazione cluster di barre di controllo (gruppo 1 estratto)	16
Figura 3.1	Rappresentazione in NEWT degli elementi di combustibile “10x10”	23
Figura 3.2	Evoluzione k_∞ negli elementi di combustibile “10x10”	24
Figura 3.3	Core “B-1”, numerazione barre di controllo (barra 3 estratta)	26
Figura 3.4	Core “B-1”, evoluzione k_{eff} barre estratte	27
Figura 4.1	Core “C-1” in funzionamento “normale” (sx) e “controllo” (dx)	31
Figura 4.2	Core “C-3-A” e “C-3-B” nel funzionamento “normale”	36
Figura 5.1	Schematizzazione in NEWT del LINER – A (sx) e LINER – B (dx) con 3 cm di ossido di cadmio	41
Figura 5.2	Modello “D-1” in condizioni di “controllo”	43
Figura 5.3	Modello “D-3” nel funzionamento “normale”	47
Figura 5.4	Modello “E-1” nel funzionamento “normale”	50
Figura 5.5	Modello “E-2” nel funzionamento “normale”	52
Figura A.1	Diagramma di flusso delle principali subroutine di NEWT	61
Figura A.2	Schematizzazione in NEWT della pin di combustibile MOX	64
Figura A.3	Confronto k_∞ pin di combustibile 3/0	67
Figura A.4	Confronto k_∞ pin di combustibile 4/0	68
Figura A.5	Confronto k_∞ pin di combustibile 2/2.7 (MOX)	68
Figura B.1	Diagramma di flusso della sequenza *t-depl* per i calcoli di bruciamento	71
Figura B.2	Rappresentazione del fuel assembly di riferimento in NEWT	73
Figura B.3	Andamento del k_∞ nel burn-up del fuel assembly di riferimento	73

Indice delle Tabelle

		pag
Tabella 1.1	Caratteristiche comuni dei modelli di reattore proposti	7
Tabella 2.1	Caratteristiche dei fuel assembly “17x17” analizzati	11
Tabella 2.2	Risultati dei fuel assembly “17x17” analizzati	11
Tabella 2.3	Caratteristiche generali del nocciolo “A-1”	15
Tabella 2.4	Core “A-1”, inserimento barre B_4C (^{10}B 60% e ^{10}B 90%) e Ag-In-Cd	15
Tabella 2.5	“A-1” Verifica a freddo a inizio vita con la barra più efficace estratta	17
Tabella 2.6	Caratteristiche generali del nocciolo “A-2”	18
Tabella 2.7	Core “A-2”, inserimento barre Ag-In-Cd e B_4C (90% ^{10}B)	18
Tabella 3.1	Caratteristiche geometriche e generali del nocciolo con barre di controllo cruciformi	21
Tabella 3.2	Analisi elementi di combustibile “10x10”	24
Tabella 3.3	Caratteristiche nocciolo “B-1”	25
Tabella 3.4	Core “B-1”, inserimento barre di controllo cruciformi	27
Tabella 4.1	Caratteristiche modello “C-1”	32
Tabella 4.2	Confronto modello “C-1”	32
Tabella 4.3	Caratteristiche modello “C-2-A” e “C-2-B”	33
Tabella 4.4	Confronto modelli “C-2” con riflettore BeO/FeO	33
Tabella 4.5	Caratteristiche modello “C-3”	35
Tabella 4.6	Confronto modelli “C-3” con/senza corona di uranio naturale	37
Tabella 5.1	Ottimizzazione liner di ossido di cadmio nel cilindro infinito	41
Tabella 5.2	Caratteristiche modello “D-1”	42
Tabella 5.3	Risultati modello “D-1”	44
Tabella 5.4	Confronto acqua leggera/acqua pesante nel cilindro infinito privo di ossido di cadmio	44
Tabella 5.5	Caratteristiche modello “D-2”	45
Tabella 5.6	Risultati modello “D-2”	45
Tabella 5.7	Caratteristiche modello “D-3”	46
Tabella 5.8	Risultati del modello “D-3”	48
Tabella 5.9	Caratteristiche modello “E-1”	49
Tabella 5.10	Risultati del modello “E-1”	50
Tabella 5.11	Caratteristiche modello “E-2”	51
Tabella 5.12	Risultati del modello “E-2”	52
Tabella 5.13	Caratteristiche modello “E-3”	53
Tabella 5.14	Risultati del modello “E-3”	53

Tabella A.1	Caratteristiche pin di combustibile del benchmark di VENUS-2	65
Tabella A.2	Risultati k_∞ benchmark e La Sapienza	66
Tabella B.1	Caratteristiche del fuel assembly di riferimento	72
Tabella B.2	Evoluzione k_∞ nel fuel assembly “17x17” per il confronto APOLLO2/TRITON	74
Tabella C-1	Evoluzione k_∞ nel fuel assembly “17x17” con boro disciolto e 4.9%+20Gd rods	75
Tabella C-2	Evoluzione k_∞ nel fuel assembly “17x17” senza boro disciolto e 4.9%+20Gd rods	75
Tabella C-3	Evoluzione k_∞ nel fuel assembly “17x17” senza boro disciolto e 4.9%+32Gd rods	76
Tabella C-4	Evoluzione k_∞ nel fuel assembly “10x10” 3.0%+4Gd rods	76
Tabella C-5	Evoluzione k_∞ nel fuel assembly “10x10” 4.0%+4Gd rods	77
Tabella C-6	Evoluzione k_∞ nel fuel assembly “10x10” 4.5%+8Gd rods	78
Tabella C-7	Evoluzione k_∞ nel fuel assembly “10x10” 4.9%+8Gd rods	79
Tabella C-8	Evoluzione k_∞ nel fuel assembly “10x10” 4.9%+12Gd rods	80
Tabella C-9	Evoluzione k_∞ nel fuel assembly “10x10” 5.5%+12Gd rods	81
Tabella C-10	Evoluzione k_∞ nel fuel assembly “10x10” 5.5%+16Gd rods	82
Tabella C-11	Evoluzione k_∞ nel fuel assembly “10x10” 6.0%+16Gd rods	83
Tabella C-12	Evoluzione k_{eff} core “B-1”	84

Sommario

L’approvvigionamento sicuro ed economico di energia è tra le principali sfide che la società del Terzo Millennio dovrà affrontare nel prossimo futuro. La tecnologia nucleare da fissione, dopo un periodo di “letargo”, ha oggi ritrovato un forte interesse a livello mondiale, sia per impianti di grande taglia, sia per impianti di piccola taglia. Scopo di questo lavoro è proporre diverse opzioni per studi preliminari di fattibilità di noccioli di reattori nucleari tipo PWR di taglia non superiore ai 150 MW_t.

Il lavoro è stato sviluppato sulla base di precedenti esperienze di ricerca condotte nell’ambito del progetto del reattore MARS. Il presente studio ha condotto a individuare nuovi modelli e a investigare soluzioni che contengono spunti innovativi rispetto ai reattori pressurizzati ad acqua leggera attualmente in esercizio.

1 Introduzione

Negli ultimi anni si è osservato un crescente interesse per reattori nucleari di piccola taglia a potenza limitata destinati ad uso distrettuale, o idonei a rispondere alle esigenze energetiche di paesi in via di sviluppo. In questo lavoro viene svolta una ricerca su concetti di reattore che abbiano il minimo possibile di complicazioni impiantistiche. Ciò al fine di far rientrare in margini di economicità il sistema, non potendo contare su fattori di scala.

L'eliminazione del circuito del boro dell'acqua primaria appare come una prima grande semplificazione impiantistica, in quanto consente di eliminare la gestione della concentrazione del boro durante il funzionamento dell'impianto. Ciò pone però il problema di dover gestire l'eccesso di reattività iniziale e durante la vita del nocciolo con altri accorgimenti, oltre l'inserimento di veleni bruciabili.

Un altro criterio di semplicità è l'utilizzo di una logica di bruciamento once-through. Una volta caricato, il combustibile viene sigillato e rimane operativo lungo tutta la sua vita utile senza dover richiedere interventi dall'esterno. Ciò consente un significativo miglioramento dell'efficienza complessiva di funzionamento, oltre ad eliminare possibili cause di incidenti per errato caricamento durante le fasi di reshuffling.

Infine l'economicità del sistema impone di concepire una configurazione di nocciolo che sia composta da elementi di combustibile il più possibile di tipo standard per dimensioni delle barrette e del reticolo.

In questo lavoro vengono studiati alcuni modelli di nocciolo per un reattore di tipo PWR, le cui caratteristiche comuni sono riportati nella Tabella 1.1. I codici utilizzati per i calcoli di cella e di evoluzione in geometria xy sono NEWT e TRITON del sistema SCALE 6. Le sezioni d'urto utilizzate sono ottenute dalla libreria ENDF/B-V.[1]

Tabella 1.1 – Caratteristiche comuni dei modelli di reattore proposti

Potenza Termica (orientativa)	150 MW_t
Moderatore/Refrigerante	Acqua leggera in pressione priva di acido borico disciolto
Ciclo	Once-Through

[1] I codici NEWT e TRITON e le librerie adottati sono stati valicati attraverso un confronto di valori calcolati di quantità integrali con quelli di corrispondenti quantità sperimentali benchmark, od ottenute da calcoli indipendenti di riferimento. I risultati di questa validazione sono riportati in Appendice A e Appendice B.

I modelli studiati sono classificati secondo quattro categorie (A, B, C e D) e differiscono in rapporto alle diverse soluzioni considerate per il controllo della reattività. Essi sono descritti brevemente nel seguito.

a. Sistema di barre a cluster e barre cruciformi (modelli A e B)

Sicuramente i sistemi di controllo "convenzionali" dei LWR, cioè i cluster di barre dei PWR e le barre cruciformi dei BWR, sono entrambi "proven technologies", i cui costi non sono eccessivi e la cui casistica di guasto è nota da diversi anni. Le barre di controllo dei BWR che si inseriscono dal basso hanno il vantaggio di lasciare sgombera la parte superiore al nocciolo, ma hanno lo svantaggio di non rendere possibile uno SCRAM dall'alto per gravità (realizzabile invece con i cluster di barre dei PWR), che potrebbe essere necessario nel caso di incidente di mancanza di energia elettrica nell'impianto. Essendo i PWR i reattori che hanno avuto maggiore diffusione nel mercato mondiale, ancora oggi si stanno effettuando numerose ricerche per proporre delle soluzioni progettuali innovative e vantaggiose dal punto di vista della sicurezza e dell'economicità; gran parte di questi studi si basa su nuovi sistemi di barre di controllo e differenti meccanismi di movimentazione delle barre stesse: quello che si vuole cercare, infatti, è di non avere penetrazioni nella parte alta del vessel e di avere la parte superiore al nocciolo sgombera per agevolare le operazioni di caricamento e di refueling. Pertanto ha senso proporre uno studio di fattibilità di un sistema di controllo movimentato dal basso con barre cruciformi, come quello utilizzato nei reattori bollenti, applicato ai reattori pressurizzati

b. Sistema di barre di controllo rotanti esterne (modello C)

In un reattore PWR di piccola taglia, quindi a relativamente elevato tasso di leakage, può essere d'interesse uno studio d'applicabilità di un sistema di controllo che preveda barre di controllo rotanti alla periferia del nocciolo. Ciò consentirebbe peraltro di avere un sistema di controllo che non occupa la parte superiore al nocciolo. Esso potrebbe inoltre essere precaricato con un sistema a molle per azionare un intervento di SCRAM. Sistemi di controllo di questo tipo sono stati proposti in passato in relazioni a piccoli reattori veloci destinati alla propulsione spaziale come il TOPAZ II., reattori con caratteristiche di spettro neutronico ben diverse da quelle di un reattore termico tipo PWR. In questo caso, si dovranno cercare soluzioni innovative, ottimizzando per esempio la geometria del nocciolo o i materiali presenti al suo interno, tali da portare comunque ad una configurazione impiantistica accettabile anche dal punto di vista economico

c. Sistema di controllo del leakage (modello D)

E’ stato preso in considerazione un concetto di reattore in cui venga realizzata una massimizzazione delle fughe attraverso la scelta di geometrie del nocciolo innovative, tali da poter consentire il controllo attraverso la movimentazione di materiali liquidi inseriti in appositi canali. Adottando lo stesso numero di elementi di combustibile “17x17” dei modelli con cluster di barre di controllo, nel sistema risultante si osserva una diminuzione di potenza rispetto ai 150 MW_t di riferimento, ma questo aspetto è stato considerato di secondaria importanza per i fini di questa prima ricerca.

2 Modello PWR “classico” con cluster di barre di controllo dall’alto

2.1 Introduzione

Nello studio di questi sistemi si è partiti da studi precedenti relativi al reattore MARS. Il progetto originale del nocciolo del reattore MARS (600MW_t) prevede 89 elementi di combustibile del tipo “17x17” con una struttura reticolare identica a quella prodotta da Westinghouse per le dimensioni delle barrette di combustibile, tubi guida, passo tra le barrette, altezza delle barrette. Un lavoro di ottimizzazione degli elementi di combustibile per un nocciolo simile a quello del MARS è stato già effettuato e pubblicato nel documento [13]: il modello di elemento di combustibile ottimale per la soluzione a ciclo unico, che è quella che interessa questo lavoro, prevede un arricchimento dell’uranio pari al 4.9%, la presenza di 20 barre di ossido di gadolinio (8% in peso) mescolato con uranio arricchito al 2.5%, 25 tubi guida e acido borico disciolto nel refrigerante primario in concentrazione di 650 ppm. In un’ottica di realizzare un reattore di taglia inferiore al MARS, quello che appare più immediato da pensare è realizzarne un modello con un numero inferiore di elementi di combustibile la cui composizione sia, però, quella che si è rivelata essere quella ottimale nel documento citato in precedenza. Volendo, però, realizzare un modello di reattore caratterizzato dall’assenza di boro disciolto nel refrigerante primario, è necessario innanzitutto analizzare cosa comporti questa scelta, e come eventualmente modificare la struttura dell’elemento di combustibile da destinare a questo primo modello di reattore proposto. È quindi necessario, innanzitutto, effettuare un confronto tra l’elemento di combustibile “ottimale” descritto in precedenza, e uno analogo che non preveda la presenza di boro disciolto: in Figura 2.1 è riportato il confronto in evoluzione del k_∞, assumendo la densità di potenza del MARS (56.61 kW/l), mentre le caratteristiche e i risultati più significativi sono riportati, rispettivamente, nella Tabella 2.1 e nella Tabella 2.2.

Tabella 2.1 – Caratteristiche dei fuel assembly "17x17" analizzati

Tipo fuel assembly	"17x17"
Tipo combustibile	UO_2
N. di barrette di combustibile UO_2	244/232
Arricchimento UO_2	4.9%
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%)	20/32
Arricchimento UO_2 negli assembly con Gd_2O_3	2.5%
Diametro esterno barretta di combustibile	0.95 cm
Spessore della guaina	0.063 cm
Spessore interfaccia guaina-combustibile	0.002 cm
Lunghezza attiva del combustibile	260 cm
Passo tra barrette di combustibile	1.26 cm
Arricchimento UO2 negli assembly con Gd2O3	2.5%
N. di tubi guida in zircaloy	25
Diametro esterno tubo guida	1.224 cm
Spessore tubo guida	0.04 cm
Concentrazione acido borico disciolto	650 ppm/0 ppm

Tabella 2.2 – Risultati dei fuel assembly "17x17" analizzati

F.A.	**k_∞ BOL**	**Burn-up [MWd/tU]**	**Lunghezza ciclo [days]**
CON BORO – 20 Gd_2O_3 rods	1.1970	33 407	1 900
SENZA BORO – 20 Gd_2O_3rods	1.2496	40 440	2 300
SENZA BORO – 32 Gd_2O_3rods	1.1293	38 628	2 200

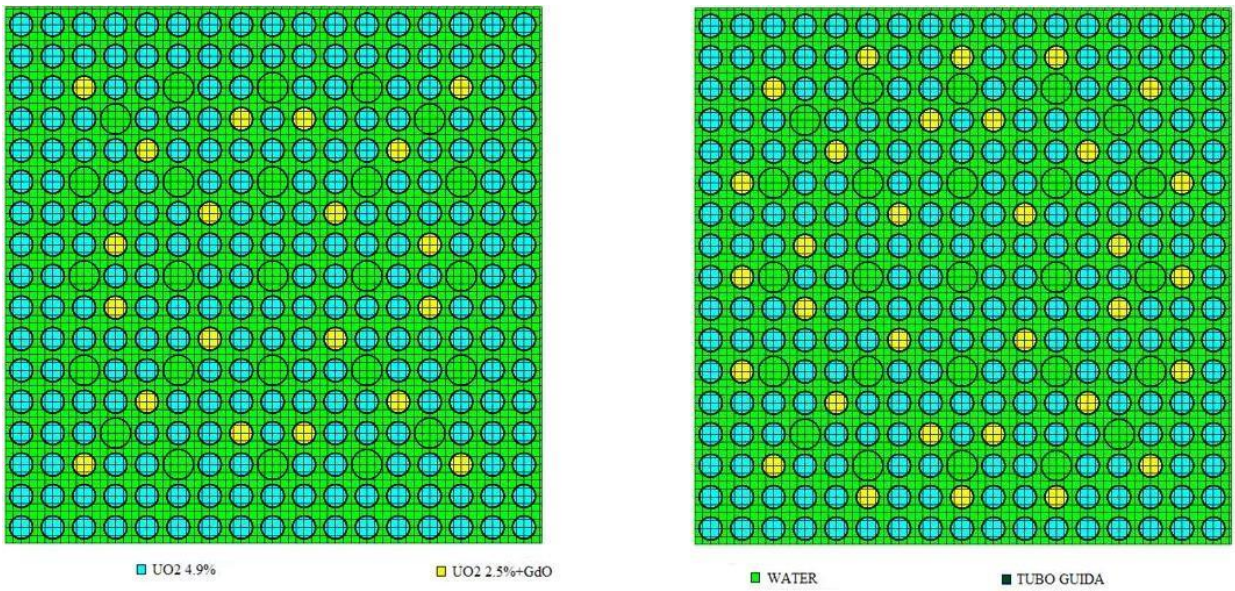

Figura 2.1 – Schematizzazione in NEWT del fuel assembly "17x17" con 20 e 32 Gd_2O_3 rods

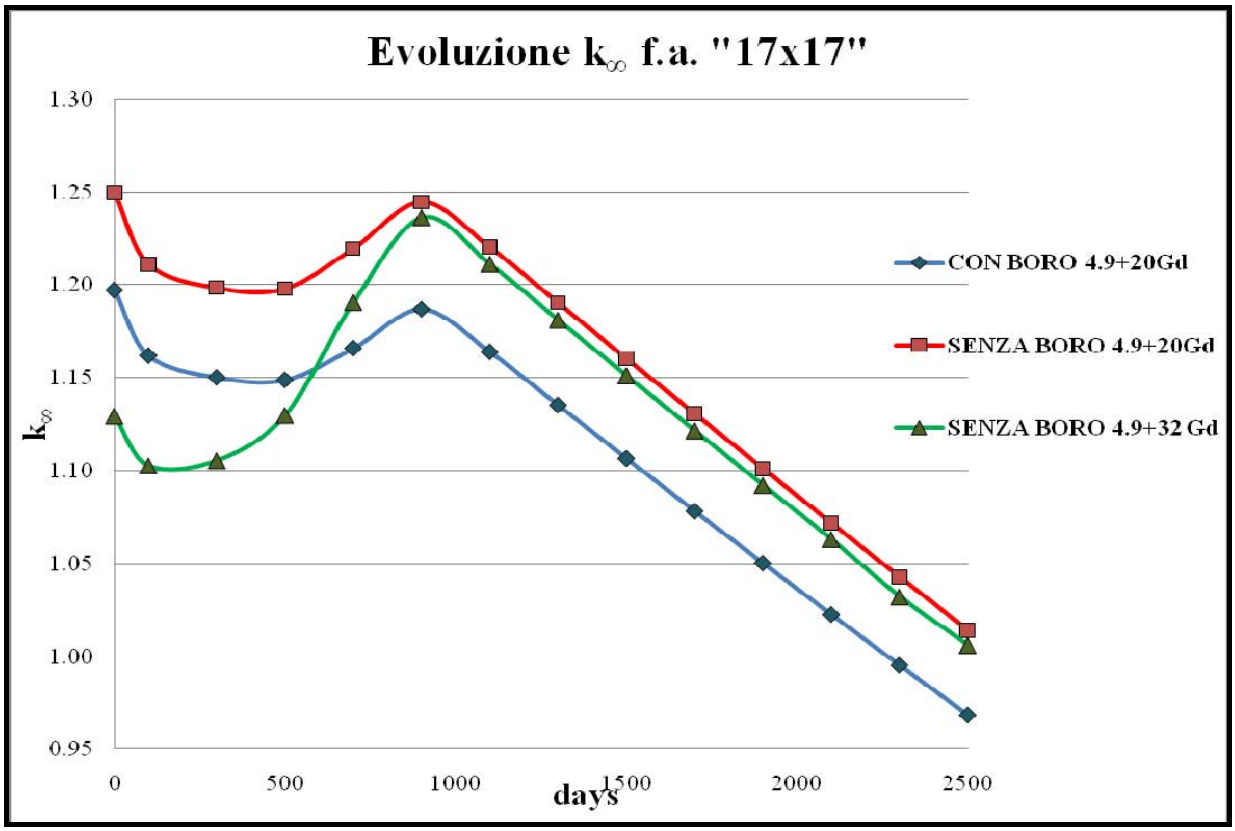

Figura 2.2 – Evoluzione k_∞ in un fuel assembly "17x17" con e senza boro disciolto

L'elemento di combustibile in cui si ha l'eliminazione del boro disciolto nel refrigerante primario presenta, dal punto di vista del controllo della reattività, essenzialmente due aspetti: il primo è che, ovviamente, eliminando un veleno bruciabile come l'acido borico, esso ha un valore del k_∞ maggiore, con una differenza di circa 4 300 pcm a inizio vita rispetto all'elemento di combustibile con boro (e quindi un corrispondente significativo eccesso di reattività a inizio vita); il secondo è che si ha un andamento del k_∞ il quale mostra una decisa risalita nel momento in cui si esaurisce il gadolinio (che avviene all'incirca dopo 1000 giorni di funzionamento a potenza, come si vede in Figura 2.2), con un k_∞ che si avvicina al valore di inizio vita. Questo secondo aspetto si esalta maggiormente all'aumentare del numero delle barrette con veleni presenti: infatti, nell'elemento di combustibile senza boro disciolto e con 32 barrette di veleno bruciabile, si ha un picco di reattività di maggiore entità rispetto ai casi con minor numero di barrette. All'aumentare del numero di barrette con ossido di gadolinio mescolato al combustibile si nota, come aspettato, un migliore controllo dell'eccesso di reattività iniziale. La conseguenza di questa prima analisi di elemento di combustibile è che nel momento in cui si andrà ad analizzare il nocciolo, una delle situazioni più critiche potrebbe essere quella di arresto a freddo (323.15 K) nel momento in cui si è esaurito il gadolinio.

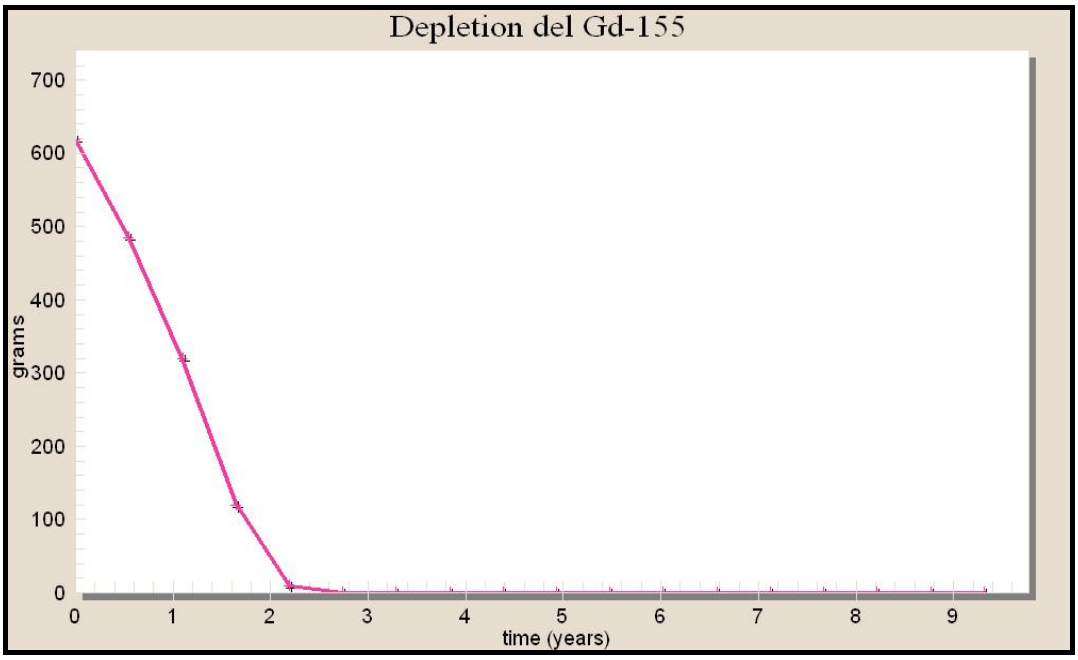

Figura 2.3 – Bruciamento del ^{155}Gd nelle barrette con veleni bruciabili del fuel assembly "17x17"

2.2 Modello "A-1"

Come già anticipato, volendo realizzare un reattore da 150 MW_t, con potenza quindi inferiore a quella del nocciolo di riferimento per il progetto MARS, si può procedere alla riduzione del numero degli elementi di combustibile, arrivando a un totale di 24 elementi, per avere a disposizione una configurazione simmetrica e, ragionando in 2-D, il più vicino possibile a una circonferenza, come mostrato in Figura 2.4; le caratteristiche del modello "A-1" sono riportate nella Tabella 2.3. Essendo cruciale il controllo della reattività, in tale modello le barre di controllo sono inserite in tutti gli assembly: questa strategia, come si vedrà, è dettata da una parte dall'assenza di acido borico disciolto nel refrigerante primario e dall'altra dalle limitate dimensioni del nocciolo (diametro 129 cm), per cui gli assembly periferici risultano essere "vicini" al centro del core, e pertanto è necessario inserire le barre di controllo in tutte le posizioni possibili per verificare la sottocriticità in tutte le condizioni in cui si può trovare il reattore. In questa prima fase è stato effettuato uno studio in cui si analizzano tre tipi di assorbitori:

- B_4C, arricchito al 60% in ^{10}B;
- B_4C, arricchito al 90% in ^{10}B;
- Ag-In-Cd, in percentuale 80% - 15% - 5%.

Da sottolineare che nel modello simulato dell'assembly il tubo centrale che solitamente accoglie la strumentazione è sostituito da una barretta di combustibile, e che le barrette con i veleni bruciabili dal punto di vista geometrico sono identiche alle barrette di combustibile: all'interno è presente ossido di gadolinio mescolato omogeneamente con il biossido di uranio.
Il materiale di rivestimento è stato omogeneizzato con il combustibile, mentre i tubi guida sono stati omogeneizzati anche con il materiale al loro interno (acqua o materiale assorbitore). [2]

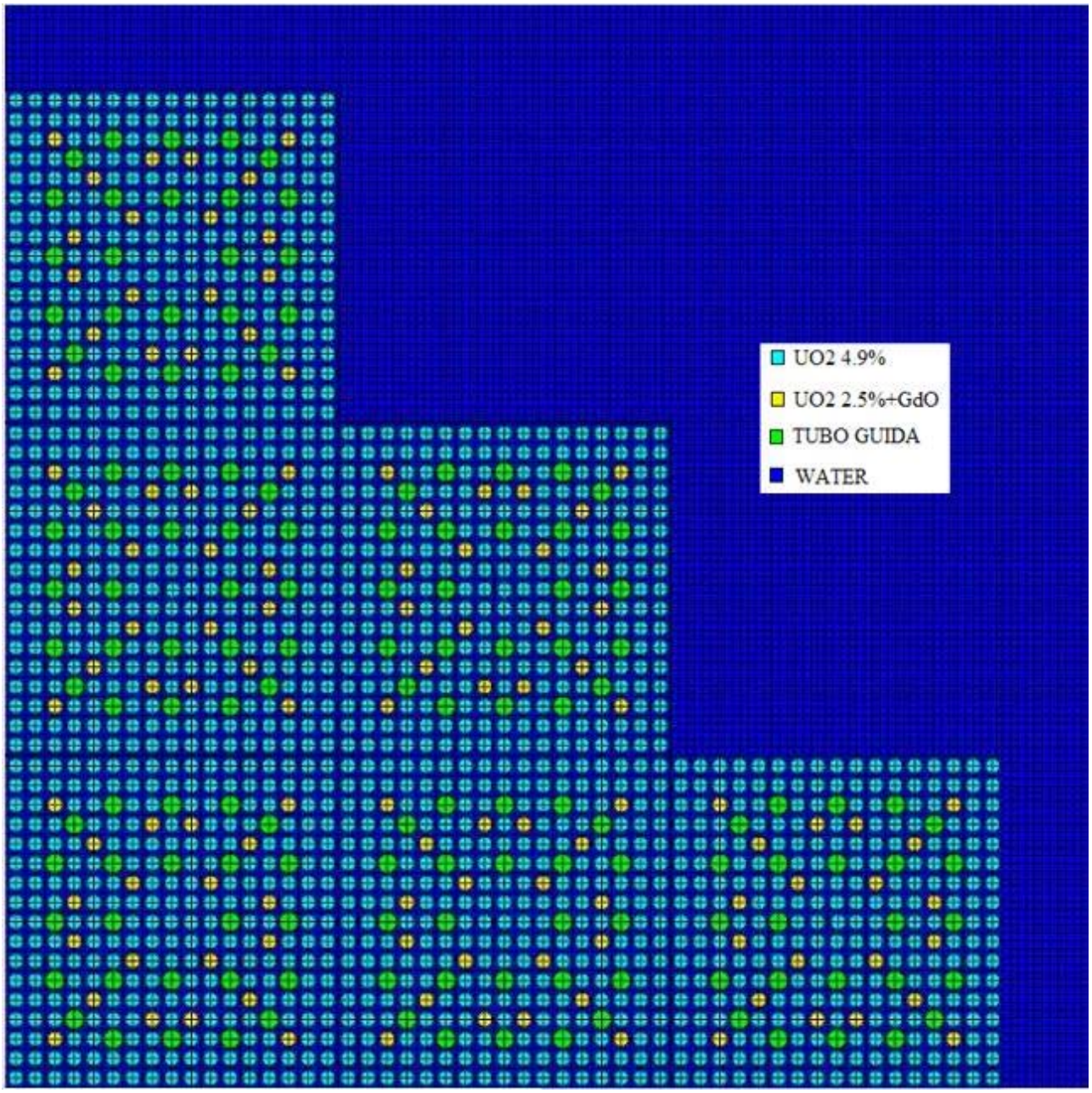

Figura 2.4 – Modello core "A-1" con fuel assembly "17x17" (barre estratte)

[2] Queste omogeneizzazioni saranno applicate anche agli altri modelli di noccioli analizzati

Tabella 2.3 – Caratteristiche generali del nocciolo "A-1"

Potenza termica	$\cong$ 150 MW_t
Tipo di combustibile	UO_2
N. di elementi di combustibile	24
N. di barrette per fuel assembly	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile UO_2 per fuel assembly	245
Arricchimento UO_2	4.9%
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly	20
Arricchimento UO_2 negli assembly con Gd_2O_3	2.5%
N. di tubi guida in zircaloy	24
Materiale assorbitore	B_4C (^{10}B 60%), B_4C (^{10}B 90%), Ag-In-Cd (80% -15% - 5%)
Diametro nocciolo	136 cm
Altezza nocciolo	260 cm

Garantire la sicurezza del reattore significa che il reattore deve essere sottocritico in ogni situazione in cui si può venire a trovare durante la sua vita: in particolare, con riferimento al sistema di controllo della reattività, bisogna dimostrare che il nocciolo può essere riportato a un adeguato margine di sottocriticità anche nel caso in cui la barra di controllo a maggior efficacia resti bloccata fuori dal nocciolo. Pertanto, prima di fare considerazioni su burn-up e prima di analizzare le condizioni al momento dell'esaurimento del gadolinio, è necessario innanzitutto verificare quale sia il gruppo di barre più efficace, e ciò è possibile inserendone uno alla volta in un fuel assembly (il cui numero è riportato nella Figura 2.5), e vedendo quello che da il Δk maggiore: i risultati di questo primo passo sono riportati nella Tabella 2.4.

Tabella 2.4 – Core "A-1", inserimento barre B_4C (^{10}B 60% e ^{10}B 90%) e Ag-In-Cd

	B_4C – ^{10}B 60%			**B_4C – ^{10}B 90%**			**Ag-In-Cd**	
	k_{eff}	**pcm**		**k_{eff}**	**pcm**		**k_{eff}**	**pcm**
BARRE ESTRATTE	1.1958	-		1.1958	-		1.1958	-
INSERIMENTO GRUPPO								
1	1.1185	-6 687		1.1171	-6 812		1.1238	-6 209
2	1.1502	-3 886		1.1492	-3 975		1.1546	-3 506
3	1.1875	-693		1.1873	-710		1.1885	-612
4	1.1538	-3 577		1.1528	-3 660		1.1577	-3 238
5	1.1733	-1 901		1.1729	-1 934		1.1763	-1 646
6	1.1889	-577		1.1888	-591		1.1897	-513
TUTTE LE BARRE INSERITE	0.6992	-53 633		0.6741	57 319		0.7877	-41 745
BARRE INSERITE TRANNE LA PIÙ EFFICACE	1.0666	-11 434		1.0638	-11 697		1.0795	-10 235

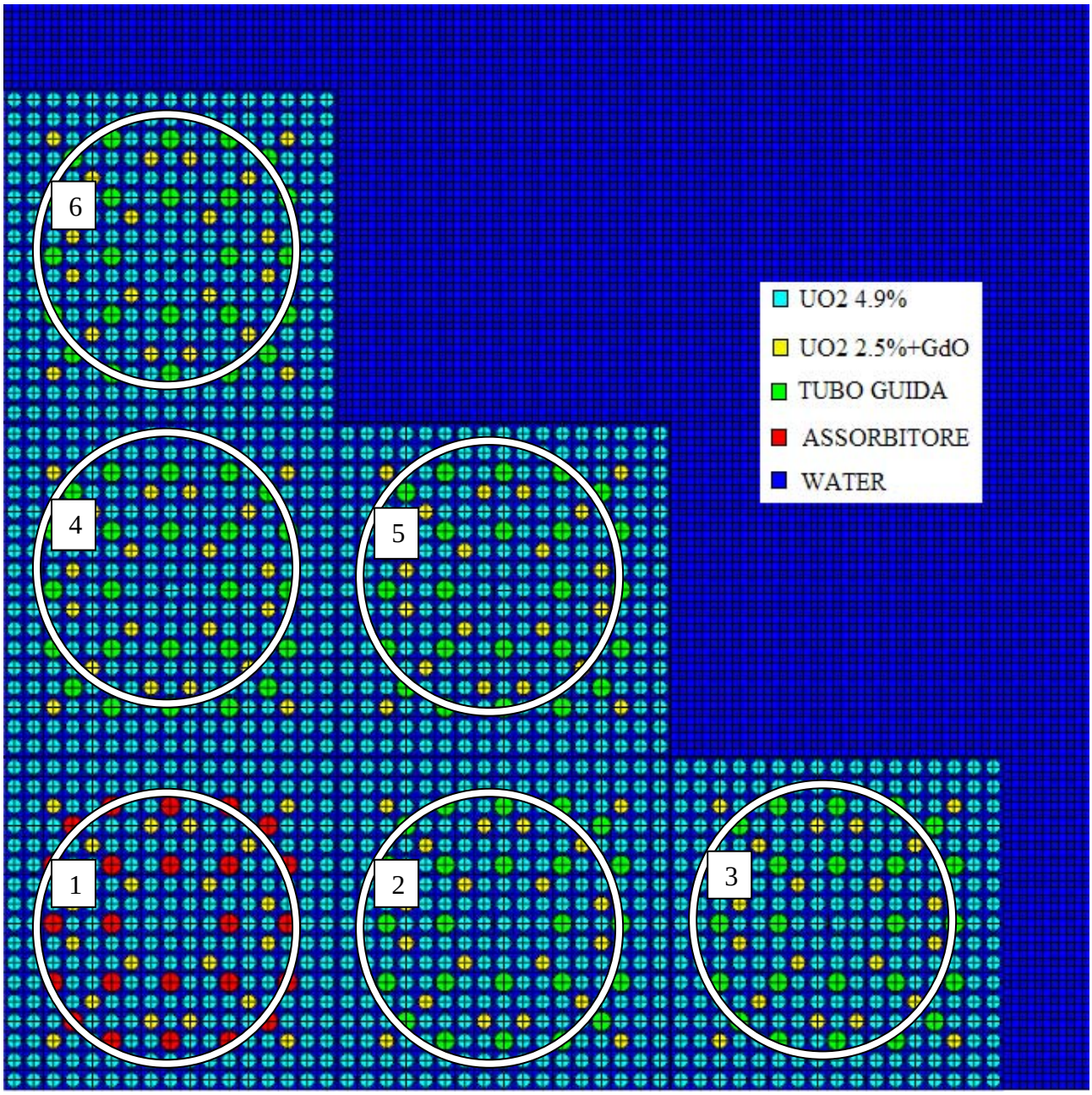

Figura 2.5 – Core "A-1", numerazione cluster di barre di controllo (gruppo 1 estratto)

Identificato il gruppo di barre più efficaci, come si vede dalla Tabella 2.4, non si raggiungono condizioni di sottocriticità con la barra più efficace estratta e le altre inserite: tale situazione, ovviamente, peggiora in una situazione simile ma a freddo (reattore omogeneo a 323.15 K), come riportato nella Tabella 2.5.

Tabella 2.5 – "A-1" Verifica a freddo a inizio vita con la barra più efficace estratta

Core "A-1" gruppo 1 estratto	**k_{eff}**
B_4C con ^{10}B 60%	1.0988
B_4C con ^{10}B 90%	1.0962
Ag-In-Cd	1.1126

Come si può osservare dalla Tabella 2.4 e dalla Tabella 2.5, il modello "A-1" non fornisce condizioni di sottocriticità con la barra più efficace estratta a inizio vita, e ciò si verifica per tutti e tre i materiali assorbitori testati; pertanto, una tale configurazione di reattore non è accettabile per la sicurezza. Tra i materiali analizzati, si vede come il carburo di boro arricchito in ^{10}B al 90% a fornire la maggiore efficacia nel controllo della reattività.

2.3 Modello "A-2"

Apparso chiaro che il valore del k_{eff} del modello "A-1" è troppo alto, la soluzione più immediata e logica è quella di abbassare l'arricchimento dell'uranio nelle barrette dove c'è solo UO_2, lasciando inalterato sia l'arricchimento nelle barrette dove è UO_2+Gd_2O_3, sia la percentuale in peso del gadolinio, sia il numero di barrette di UO_2+Gd_2O_3: come si è visto dall'analisi di assembly, aumentare il numero di barrette di gadolinio porta sì a un abbassamento del valore del k_{eff} a inizio vita, ma comporta anche un picco di reattività ancor maggiore rispetto a un caso con inferiore numero di barrette, e quindi si dovrebbe procedere a una ricerca di un valore di arricchimento minore che consenta, comunque, la sottocriticità quando si esaurisce il veleno bruciabile.
La soluzione che si propone ora è, quindi, un modello di nocciolo con l'arricchimento dell'uranio nelle barrette in cui è solo UO_2 pari al 3.0%, e in cui il controllo è realizzato con barre in Ag-In-Cd o con carburo di boro arricchito al 90% in ^{10}B.
È stata analizzata l'efficienza del sistema di controllo, con la barra più efficace estratta, sia nelle condizioni a freddo a BOL sia a EOGd; per effettuare la verifica in quest'ultima condizione, sono stati inseriti i valori di concentrazioni dei materiali contenuti nel file di output di TRITON quando si è esaurito il gadolinio: da sottolineare è il fatto che la libreria utilizzata non supporti tutti gli isotopi dei prodotti di fissione (per esempio Ba e La) e dei transuranici prodotti nel bruciamento (per esempio ^{238}Np e ^{245}Cm), e pertanto sono stati inclusi solo quelli supportati e presenti in maggior quantitativo.

Tabella 2.6 – Caratteristiche generali del nocciolo "A-2"

Potenza termica	≅ 150 MW_t
Tipo di combustibile	UO_2
N. di elementi di combustibile	24
N. di barrette per fuel assembly	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile UO_2 per fuel assembly	245
Arricchimento UO_2	3.0%
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly	20
Arricchimento UO_2 negli assembly con Gd_2O_3	2.5%
N. di tubi guida in zircaloy	24
Materiale assorbitore	B_4C (^{10}B 90%), Ag-In-Cd (80% -15% - 5%)
Diametro nocciolo	136 cm
Altezza nocciolo	260 cm
Burn-up	23 778 MWd/tU
Lunghezza del ciclo	1 500 days

Tabella 2.7 – Core "A-2", inserimento barre Ag-In-Cd e B_4C (90% ^{10}B)

	Ag-In-Cd			**B_4C – 90% ^{10}B**	
	k_{eff}	**pcm**		**k_{eff}**	**pcm**
BARRE ESTRATTE (BOL)	1.0596	-		1.0596	-
INSERIMENTO GRUPPO					
1	0.9895	-6 846		0.9841	-7 392
2	1.0188	-3 928		1.0144	-4 361
3	1.0507	-845		1.0498	-932
4	1.0218	-3 634		1.0177	-4 037
5	1.0393	-1 936		1.0361	-2 244
6	1.0520	-721		1.0511	-806
BARRE INSERITE TRANNE LA PIÙ EFFICACE – BOL	0.9470	-11 236		0.9359	-12 415
BARRE PIÙ EFFICACE ESTRATTA A FREDDO – BOL	0.9869	-7 110		0.9734	-8 485
BARRE PIÙ EFFICACE ESTRATTA A FREDDO – EOGd	0.9930	-6 083		0.9805	-7 758

2.4 Conclusioni modelli “A”

Realizzare un modello di reattore PWR “classico” (per via dell’utilizzo delle convenzionali barre di controllo a grappolo che si inseriscono dall’alto), di piccola taglia, senza boro disciolto nel refrigerante primario e a ciclo unico, necessita di un approfondito studio di ottimizzazione dell’elemento di combustibile. Una soluzione che rispondesse positivamente agli aspetti di sicurezza è stata proposta con il modello caratterizzato da un arricchimento dell’UO_2 pari al 3.0%, che però ha un burn-up basso di 23 778 MWd/tU per via del basso arricchimento; inoltre, vista la bassa “importanza” delle barre situate nella parte periferica del nocciolo, sarà utile effettuare uno studio che non preveda l’inserimento del gruppo di barre di controllo anche negli assembly periferici. Altra soluzione può essere quella della riduzione del reticolo dell’elemento di combustibile, passando da una struttura “17x17” a una “15x15”, poiché in questo modo le barre di materiali assorbitori avrebbero una maggiore efficacia sul controllo della reattività.
Da sottolineare è anche che dal punto di vista delle innovazioni questo modello “A-2” non presenta particolari innovazioni: per il controllo della reattività, necessita di penetrazioni nella parte alta del vessel, con conseguente impatto su operazioni di refueling e ispezioni.

3 Modello PWR con barre di controllo cruciformi tipo BWR

3.1 Introduzione

Pensare a un reattore PWR in cui venga applicato un sistema di controllo della reattività tipico di un reattore ad acqua bollente, vale a dire barre cruciformi che si inseriscono dal basso, rappresenta una novità impiantistica del tutto innovativa. Le scelte fatte per questo nuovo modello sono descritte nei punti seguenti:

- trattandosi di un reattore ad acqua in pressione, non è necessario l'inscatolamento degli elementi di combustibile, come invece lo è nei reattori ad acqua bollente per garantire l'asportazione del calore;
- si è scelta una configurazione con 4 strutture di sostegno "tiranti" in zircaloy4 per elemento di combustibile;
- per mantenersi su standard di riferimento commerciali, si mantiene il passo tra le barrette di 1.26 cm, tipo Westinghouse;
- viene scelto un reticolo "10x10" e una potenza termica di 150 MW_t: il numero e la disposizione degli elementi di combustibile devono essere determinati tenendo conto dell'inserimento delle barre cruciformi per il controllo del reattore;
- per avere dimensioni contenute del reattore, si è impostata l'altezza del nocciolo pari a 1.2 volte il suo diametro;
- come negli altri casi, si esclude la presenza di acido borico disciolto nel refrigerante primario e viene scelto un ciclo "once-through".

Le caratteristiche principali dei modelli di reattori aventi barre di controllo cruciformi sono riportate nella Tabella 3.1.

Tabella 3.1 – Caratteristiche geometriche e generali del nocciolo con barre di controllo cruciformi

Potenza termica	$\cong 150\ MW_t$
Tipo di combustibile	UO_2
N. di elementi di combustibile	24
Inscatolamento elemento di combustibile	Non previsto
N. di barrette per fuel assembly	100 (“10x10”)
N. di tubi guida in zircaloy	4
Diametro esterno barretta di combustibile	0.95 cm
Spessore della guaina	0.063 cm
Spessore interfaccia guaina-combustibile	0.002 cm
Lunghezza attiva del combustibile	260 cm
Passo tra barrette di combustibile	1.26 cm
Follower	Zircaloy4
Lunghezza “braccio” barra cruciforme	10.12 cm
Larghezza “braccio” barra cruciforme	0.482 cm
Raggio barretta assorbitore	0.18 cm
Numero barrette assorbitore per “braccio”	20
Materiale assorbitore	B_4C arricchito in ^{10}B al 60%
Diametro del nocciolo	167 cm
Altezza del nocciolo	200 cm

Come è stato per la famiglia di modelli “A”, prima di passare a un’analisi di possibile configurazione di nocciolo, occorre fare uno studio preliminare sull’elemento di combustibile, questa volta ex-novo, dovendo considerare diversi aspetti: essendo l’acqua primaria priva di acido borico, l’unico modo per controllare la reattività rimangono le barrette di veleno bruciabile Gd_2O_3 mescolato al combustibile UO_2; quindi, deve essere ottimizzato anche il numero di tali barrette con veleno bruciabile, poiché aumentando il loro numero si riesce ad avere un buon controllo dell’eccesso di reattività iniziale, ma quando si esaurisce il gadolinio si presenta un picco positivo di reattività, con un valore del k_∞ (riferendosi sempre inizialmente all’elemento di combustibile con condizioni di riflessione sui quattro lati) che sale fino a un certo numero di giorni, e poi riscende monotonamente (per via del progressivo esaurimento del materiale fissile) fino ad arrivare alla sottocriticità. Viceversa, se il numero di barrette di gadolinio è basso, si avrà un profilo del k_∞ con una risalita meno accentuata (o quasi nulla se il numero è troppo basso), ma non si compenserà l’eccesso di reattività iniziale, e quindi a BOL il valore del k_∞ sarà molto alto. L’altro problema da considerare è, ovviamente, il burn-up dell’elemento di combustibile, che è anche legato al numero di barrette di veleno bruciabile: rimanendo con arricchimenti tipici dei PWR, [3.0÷6.0]%, si deve cercare un compromesso tra arricchimento e presenza di veleni bruciabili che garantisca il burn-up più lungo possibile con un profilo del k_{eff} (passando quindi al core intero) il più piatto possibile. Infatti, quando si andranno ad applicare i modelli provati di elemento di combustibile al nocciolo

intero, si dovrà verificare se è garantita la sottocriticità del reattore anche nelle peggiori condizioni in cui si può trovare lungo la sua vita, in particolare a freddo inizio vita (BOL) e a freddo a fine bruciamento dell'ossido di gadolinio (EOGd). Non portando avanti una soluzione in cui è presente la soluzione di acqua borata la cui concentrazione si esaurisce verso la fine vita del reattore, come si vedrà l'aspetto della sottocriticità a fine vita del reattore non sarà il punto più critico (cosa che è invece fondamentale nei reattori pressurizzati con un controllo della reattività con boro nel refrigerante primario, e come non lo era nei modelli "A").

Come anticipato, a seconda del numero di barrette di gadolinio, la condizione più critica in cui può venirsi a trovare il reattore, è quella di arresto a freddo a inizio vita o a fine del bruciamento del Gd_2O_3, con la barra di controllo più efficace estratta. Pertanto, a seguito dell'analisi del burn-up dell'elemento di combustibile, sarà necessario vedere quale configurazione fornisca un risultato più adatto per la successiva implementazione nel nocciolo intero.

Per l'analisi di fuel assembly "10x10" in NEWT, impostato un calcolo in geometria infinita con le condizioni di riflessione sui quattro lati dell'elemento di combustibile, sono stati considerati i modelli riportati in Figura 3.1 e Tabella 3.2, il cui andamento del k_∞ in evoluzione (imponendo una potenza termica di 150MW_t) è riportato nella Figura 3.1.

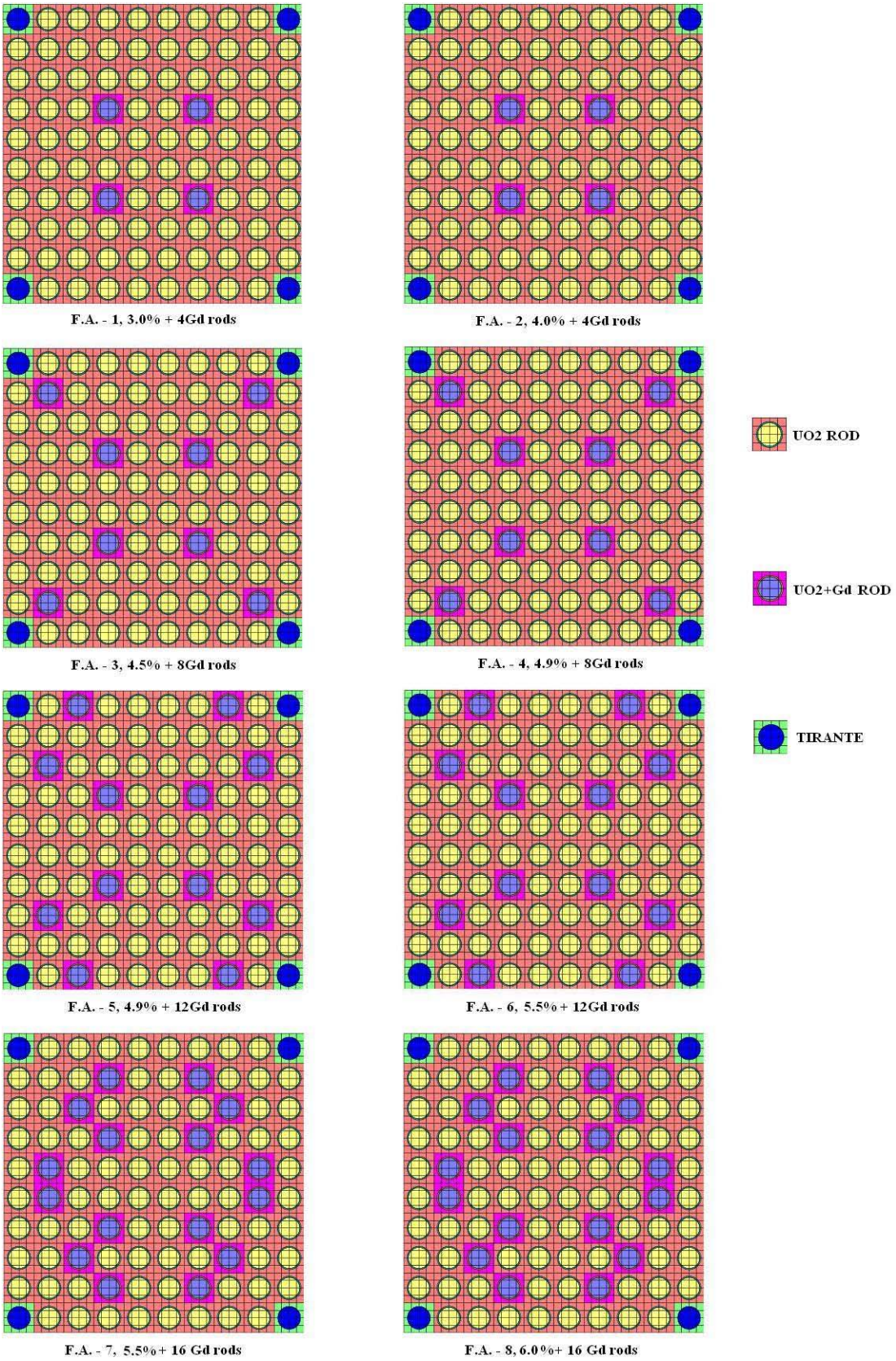

Figura 3.1 – Rappresentazione in NEWT degli elementi di combustibile "10x10"

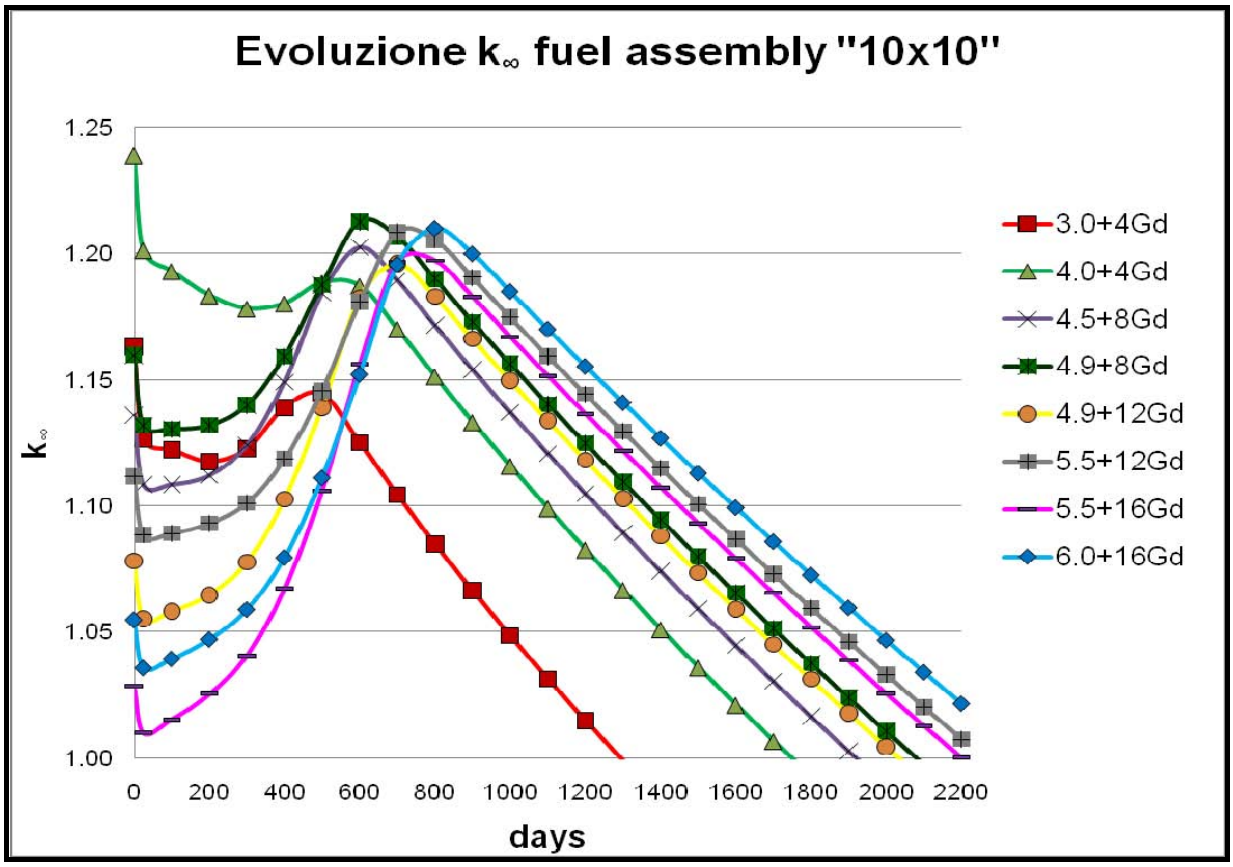

Figura 3.2 – Evoluzione k_∞ negli elementi di combustibile "10x10"

Tabella 3.2 – Analisi elementi di combustibile "10x10"

F.A. ANALIZZATO	CARATTERISTICHE	Burn-up [MWd/tU]	Lunghezza ciclo [days]
"F.A. – 1"	3.0% + 4Gd rods	21 734	1 049
"F.A. – 2"	4.0% + 4Gd rods	30 494	1 472
"F.A. – 3"	4.5% + 8Gd rods	33 809	1 632
"F.A. – 4"	4.9% + 8Gd rods	36 911	1 782
"F.A. – 5"	4.9% + 12Gd rods	35 962	1 736
"F.A. – 6"	5.5% + 12Gd rods	40 310	1 946
"F.A. – 7"	5.5% + 16Gd rods	39 135	1 889
"F.A. – 8"	6.0% + 16Gd rods	42 518	2 053

Per passare dall'analisi di assembly a quella di nocciolo, si deve considerare il fatto che l'elemento di combustibile è stato studiato in geometria infinita, con condizioni di riflessioni sui quattro lati, e che quindi ci sarà un termine di leakage da considerare (assunto pari a 4 000 pcm) per l' intero nocciolo. Dovendo tener conto di queste fughe nel modello reale di nocciolo, tra gli assembly studiati si prenderanno in considerazione solo quelli che hanno un valore iniziale del k_∞ sufficientemente "alto" da garantire un'adeguata riserva di reattività: tuttavia tale eccesso di reattività a inizio vita dovrà essere controllato da un appropriato sistema di veleni bruciabili, modulato in termini di:

- numero di barrette di veleno bruciabile (ossido di gadolinio),
- caratteristiche del veleno bruciabile,
- frazione di fissile nelle barrette di veleno bruciabile.

Sulla base di queste semplici considerazioni sono stati esclusi dall'analisi di core gli assembli classificati come "F.A. – 1", "F.A. – 2", "F.A. – 5", "F.A. – 7", "F.A. – 8".
Gli altri elementi di combustibile presentano un profilo di evoluzione di k_∞ molto simile, ma quello che presenta un profilo leggermente più piatto e che ha un buon valore di burn-up è il "F.A. – 4", e perciò si è deciso di procedere con l'analisi di un nocciolo composto da questo tipo di elementi di combustibile.

3.2 Modello "B-1"

Conclusa l'analisi parametrica sull'assembly, oggetto di questa seconda sezione dello studio è la definizione dell'architettura che va definita per il nocciolo. In particolare lo studio valuta la possibilità di costruire un modello di nocciolo innovativo in grado di utilizzare elementi di combustibile tipici dei PWR ma controllati con barre cruciformi di controllo tipiche dei reattori BWR. Scelto come fuel assembly di riferimento il "F.A. – 4", si è quindi realizzato un modello di nocciolo rappresentato in Figura 3.3 e le cui caratteristiche sono riportate il Tabella 3.3.

Tabella 3.3 – Caratteristiche nocciolo "B-1"

Potenza termica	$\cong 150\ MW_t$
Ciclo	Unico
Tipo di combustibile	UO_2
N. di elementi di combustibile	24
N. di barrette per fuel assembly	100 (10x10)
N. di barrette di combustibile UO_2 per fuel assembly	88
Arricchimento UO_2	4.9%
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly	8
Arricchimento UO_2 negli assembly con Gd_2O_3	2.5%
N. di tubi guida in zircaloy	4
Materiale assorbitore	B_4C (^{10}B 90%)
Diametro del nocciolo	167 cm
Altezza del nocciolo	200 cm
Burn-up	35 736 MWd/tU
Lunghezza del ciclo	1 820 giorni (≈5 anni)

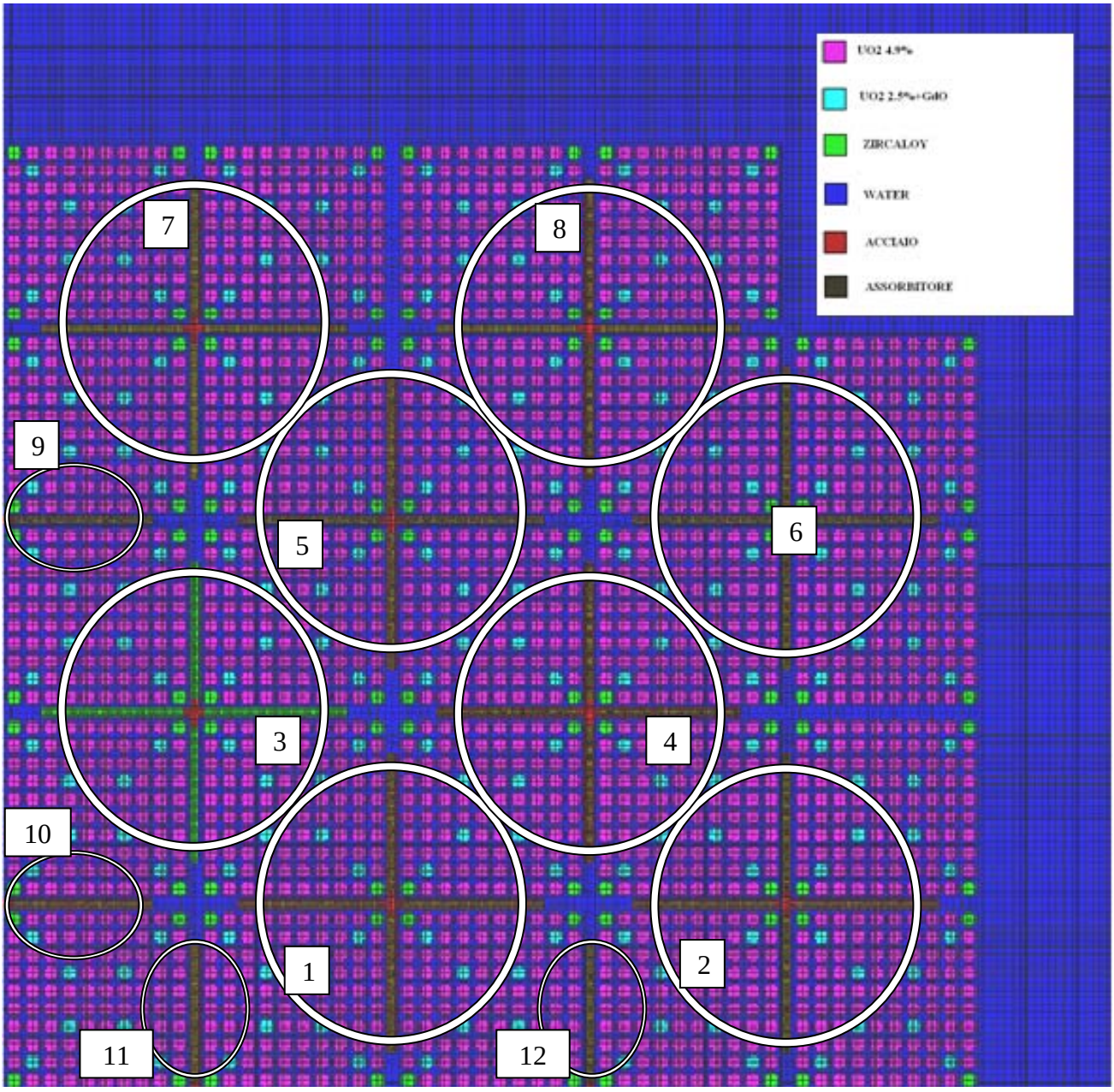

Figura 3.3 – Core “B-1”, numerazione barre di controllo (barra 3 estratta)

Il modello di nocciolo “B-1” è stato implementato nel codice TRITON, il quale ha dato come risultato un burn-up di 35 736 MWd/tU, con una durata del ciclo pari a 1 820 giorni, praticamente 5 anni. Il profilo di evoluzione del k_{eff} con barre estratte dal nocciolo è riportato nella Figura 3.4, la quale evidenzia che la situazione più critica si presenterà nel momento in cui si esaurisce il gadolinio.

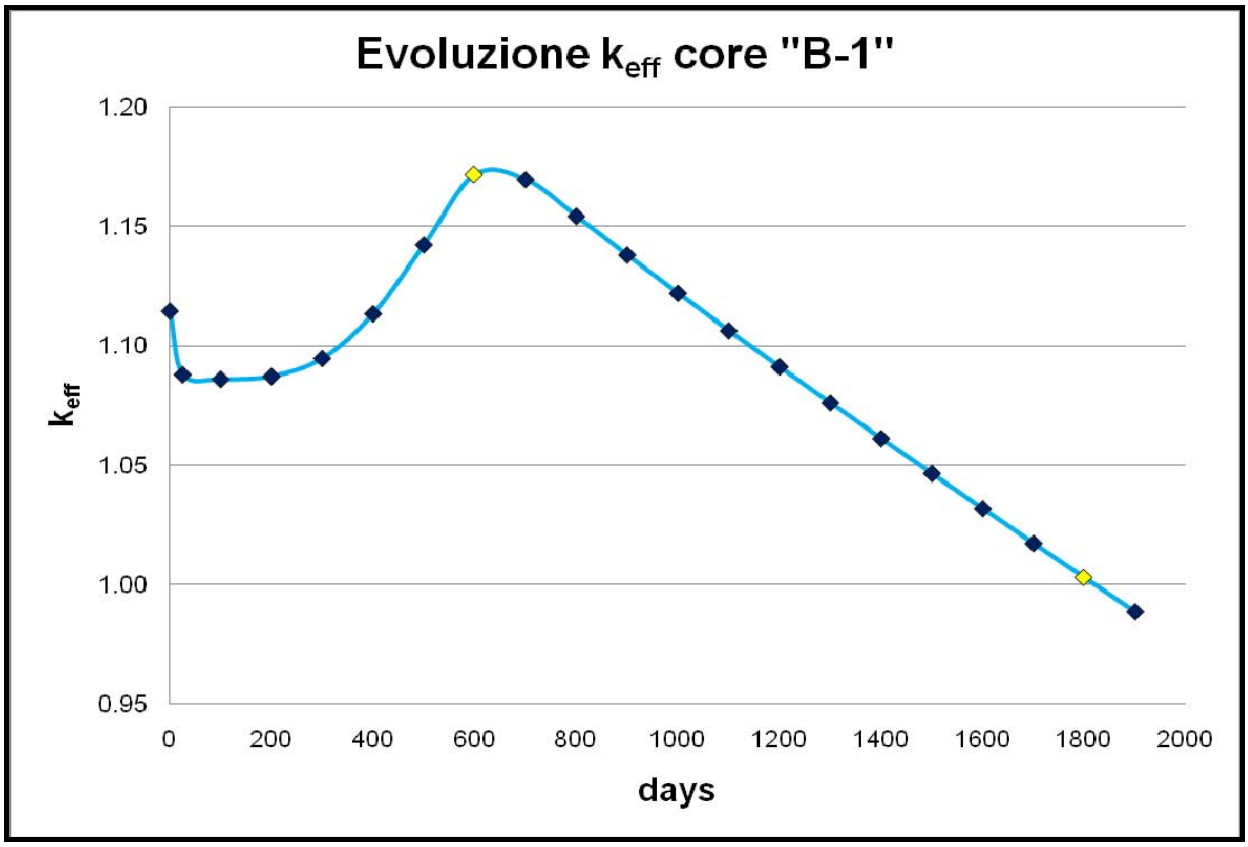

Figura 3.4 – Core "B-1", evoluzione k_{eff} barre estratte

Per la verifica del rispetto delle condizioni di sottocriticità del nocciolo occorre dapprima identificare la barra cruciforme più efficace tra quelle che si inseriscono nel nocciolo, e quindi proceduto a inserire una barra per volta nel nocciolo a inizio vita e a piena potenza, calcolando di volta in volta il Δk.

Tabella 3.4 – Core "B-1", inserimento barre di controllo cruciformi

	k_{eff}	pcm
BARRE ESTRATTE	**1.1124**	-
INSERIMENTO GRUPPO		
1	1.0683	-4 052
2	1.1028	-868
3	**1.0623**	**-4 613**
4	1.0907	-1 972
5	1.0899	-2 044
6	1.1067	-514
7	1.1007	-1059
8	1.1066	-527
9	1.1017	-973
10	1.0911	-1 938
11	1.0918	-1 873
12	1.1034	-811
BARRE TUTTE INSERITE A FREDDO – EOGd	0.8838	-31 680
BARRE PIÙ EFFICACE ESTRATTA A FREDDO – EOGd	0.9884	-20 490

Dopo aver identificato la barra più efficace, è stata analizzata la situazione più critica, cioè la verifica della sottocriticità a freddo a fine vita del gadolinio (EOGd): il valore del fattore di moltiplicazione inferiore all'unità mostra il soddisfacimento di questo requisito, ottenuto grazie all'alto arricchimento in B^{10} delle barrette assorbitrici.

3.3 Conclusioni modelli "B"

L'analisi svolta per il modello di reattore con barre di controllo cruciformi "B-1" mostra la possibilità di raggiungere condizioni di sottocriticità nelle condizioni più critiche in cui si può trovare il reattore durante la sua vita, ma con un valore del k_{eff} comunque vicino al valore unitario; d'altronde l'alto arricchimento in B^{10} già impiegato porta a dover fare ulteriori considerazioni non sulla scelta dei materiali assorbitori, ma su tutta la configurazione di questo tipo di nocciolo: le barre cruciformi, infatti, non agiscono internamente all'elemento di combustibile, lasciando così lontana la zona centrale a maggior flusso neutronico dalla zona dove si trova l'assorbitore. Pertanto, uno studio successivo per aumentare l'efficacia delle barre di controllo e avere maggiori margini di sicurezza, dovrà puntare su nuove configurazioni degli elementi di combustibile, con un reticolo più piccolo.

4 Modello PWR con barre di controllo rotanti esterne al nocciolo

4.1 Introduzione

Obiettivo di questo nuovo modello di nocciolo proposto è quello di escludere soluzioni impiantistiche per il controllo della reattività tali da presentare:

- penetrazioni con complessi sistemi attuatori di movimento nel pressure vessel,
- meccanismi di movimentazione e ingombro nella parte alta del nocciolo.

La scelta, per questi motivi, è caduta su una soluzione simile a quella presente nel reattore TOPAZ II, in cui cioè il sistema di controllo della reattività è costituito da barre rotanti esterne alla parte attiva del nocciolo, alloggiate tra nocciolo e pressure vessel. Tali barre sono caratterizzate da una sezione assorbitrice e da una riflettente che si affacciano, alternativamente a seconda dell'esigenza, verso il nocciolo: nel normale funzionamento del reattore, è la parte riflettente della barra che "vede" il nocciolo, consentendo il back-scattering dei neutroni che altrimenti fuggirebbero dal nocciolo e andrebbero persi. Da tenere presente che in un reattore di piccola taglia la componente 'leakage' del bilancio neutronico diventa più importante rispetto ad un reattore con un nocciolo di dimensioni maggiori, e quindi il 'reflectos savings' associato alla presenza di un riflettore corrispondentemente più efficace. La presenza di un buon riflettore (per esempio di ossido di berillio) consente inoltre una migliore distribuzione della potenza, contribuendo in tal modo a ridurre il fattore di picco, e conseguentemente ad aumentare la potenza massima consentita a parità di volume del [14]: tale effetto di aumento di potenza non è stato considerato rilevante ai fini dell'identificazione di un modello valido di reattore di piccola taglia controllato da un sistema di barre rotanti esterne al nocciolo, poiché in questa sezione del lavoro l'attenzione è puntata sul valore del Δk massimo disponibile per il controllo del reattore. Tale valore corrisponde alla differenza tra il k_{eff} associato alla configurazione con la parte riflettente delle barre rotanti affacciata verso il nocciolo e il k_{eff} associato a quella con le barre rotanti girate di 180°, cioè con la parte assorbitrice affacciata verso il nocciolo; occorre quindi massimizzare l'assorbimento dei neutroni che escono dal nocciolo per evitare effetti di back-scattering dei materiali strutturali. A questo scopo si utilizza un layer (ricavato sulla barra di controllo) di carburo di boro (B_4C) arricchito al 90% in ^{10}B.

Nello studio parametrico che seguirà, l'attenzione sarà rivolta alla ricerca di un sistema di controllo della reattività tale da fornire un'efficacia paragonabile a quella che si è ottenuta mediante i cluster di barre di controllo o mediante le barre cruciformi: ciò si traduce in uno studio di massimizzazione

del Δk (in valore assoluto), e non sulla verifica del raggiungimento della sottocriticità anche nelle condizioni più critiche del reattore.

4.2 Modello "C-1"

Il primo modello proposto di reattore con barre di controllo rotanti esterne presenta numerose analogie al modello "A-1" con cluster di barre di controllo dall'alto. Si comprende che in questo modello "C-1" non sono più necessari i tubi guida che sono ora sostituiti con ulteriori barrette di combustibile. In questo modello, quindi, si avranno un totale di 269 barrette di combustibile e 20 barrette di ossido di gadolinio per elemento di combustibile. L'arricchimento dell'uranio nelle barrette contenenti il solo UO_2 è pari al 4.9%, mentre nelle barrette contenenti UO_2 e ossido di gadolinio (fissato all'8% in peso) è pari al 2.5%. Come precedentemente anticipato, in questa parte del lavoro si punta l'attenzione sull'efficacia globale del sistema di controllo, cioè sul Δk che si ottiene nel momento in cui le barre rotanti sono affacciate verso l'interno del nocciolo, e non sul valore del k_{eff} e il raggiungimento di sottocriticità: pertanto è stata fissata la composizione dell'elemento di combustibile, sia per l'arricchimento (4.9%) sia per il numero di barrette di veleno bruciabile (20 barrette con uranio arricchito al 2.5% e veleno Gd_2O_3 all'8% del peso totale) e, una volta ottenuti i risultati, sono state fatte le considerazioni sull'efficacia delle barre rotanti.

La schematizzazione delle barre di controllo rotanti nel codice di calcolo NEWT è stata effettuata considerando uno spessore (6 cm) di assorbitore di carburo di boro (B_4C), arricchito al 90% in ^{10}B (per cercare di avere un consistente assorbimento), e la restante parte dalla barra composta da ossido di berillio (BeO). Le barre sono state inserite agli angoli nella periferia del nocciolo e in quella che, nel quarto di nocciolo, è la parte esterna alla fila centrale di elementi di combustibile[3]: la parte assorbitrice, nel caso di necessità del controllo del reattore, va direttamente ad affacciarsi verso l'interno del nocciolo, lasciando la parte riflettente all'esterno. A circondare il nocciolo in questo primo modello è acqua leggera.

Specificando che per "normale" si intende la situazione in cui la parte assorbitrice in B_4C delle barre di controllo è nella parte più esterna del nocciolo, mentre la parte con riflettore ossido di berillio è nella parte verso l'interno, e che per "controllo" ci si riferisce alla situazione in cui si invertono le posizioni, con la parte composta da carburo di boro che si affaccia direttamente sul nocciolo (vedi Figura 4.1), i risultati di tale modello sono riportati nella Tabella 4.1.

[3] Questa barra rotante ha un'area destinata all'assorbitore leggermente superiore rispetto alle altre due barre (222 cm^2 contro 129 cm^2 per avere un maggiore controllo della parte interna del nocciolo).

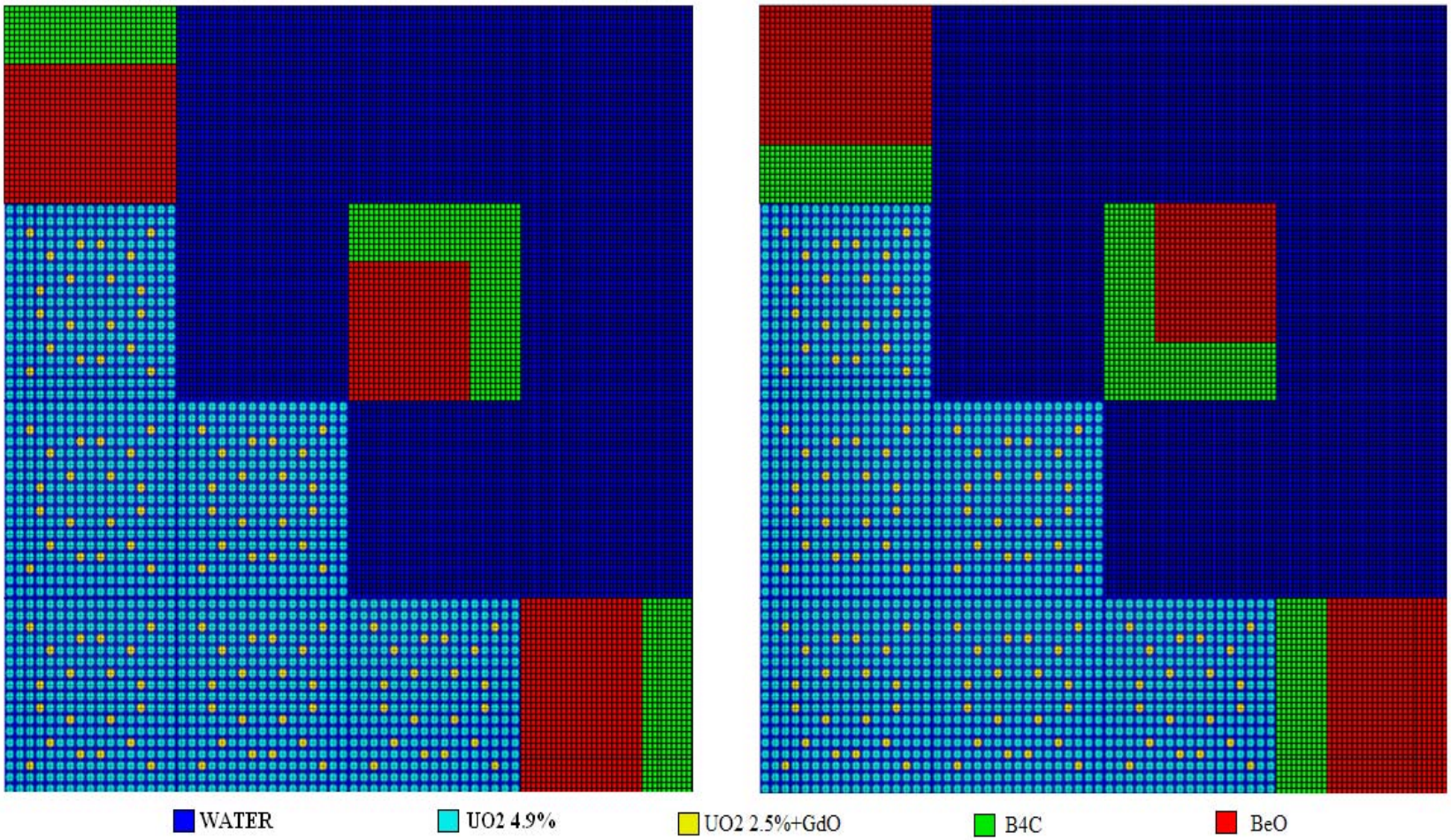

Figura 4.1 – Core “C-1” in funzionamento “normale” (sx) e “controllo” (dx)

Tabella 4.1 – Caratteristiche modello "C-1"

Tipo di combustibile	UO_2
N. di elementi di combustibile	24
N. di barrette per fuel assembly	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile UO_2 per fuel assembly	269
Arricchimento UO_2	4.9%
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly	20
Arricchimento UO_2 negli assembly con Gd_2O_3	2.5%
Diametro esterno barretta di combustibile	0.95 cm
Spessore della guaina	0.063 cm
Spessore interfaccia guaina-combustibile	0.002 cm
Lunghezza attiva del combustibile	260 cm
Passo tra barrette di combustibile	1.26 cm
Dimensioni barra di controllo	21.5x21.5 cm
Materiale riflettore barra di controllo	BeO
Materiale assorbitore barra di controllo	B_4C arricchito al 90% in ^{10}B
Materiale esterno alla parte attiva del nocciolo	H_2O

Tabella 4.2 – Confronto modello "C-1"

Core analizzato	**k_{eff}**	**Δk**
C-1 "normale"	1.1961	-
C-1 "controllo"	1.1923	-318 pcm

Da questi primi calcoli, appare evidente come la soluzione inizialmente proposta non comporti un controllo della reattività sufficiente per il nocciolo (che inoltre a rimane sovracritico): questo ha imposto una revisione dell'architettura del nocciolo per incrementare il margine di controllo delle barre rotanti.

4.3 Modello "C-2"

Con riferimento alla configurazione del nocciolo del reattore TOPAZ II, il quale era circondato da berillio, la prima modifica al modello iniziale ipotizzato si basa proprio sulla sostituzione del materiale esterno al nocciolo. Viene sostituita l'acqua con un materiale riflettore in forma di ossido: si avrà una configurazione in cui vi è una matrice di ossido di berillio che circonda il nocciolo (proporre berillio puro per un nocciolo che ha dimensioni consistenti rispetto a quelle ridotte del TOPAZ II comporterebbe costi elevatissimi). Inoltre, per realizzare un confronto con un altro materiale riflettore, è stato analizzato un modello analogo, sostituendo all'ossido di berillio l'ossido di ferro (FeO): i risultati di questi modelli, classificati "C-2-A" e "C-2-B", sono riportati nella Tabella 4.4.

Tabella 4.3 – Caratteristiche modello "C-2-A" e "C-2-B"

Tipo di combustibile	UO_2
N. di elementi di combustibile	24
N. di barrette per fuel assembly	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile UO_2 per fuel assembly	269
Arricchimento UO_2	4.9%
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly	20
Arricchimento UO_2 negli assembly con Gd_2O_3	2.5%
Diametro esterno barretta di combustibile	0.95 cm
Spessore della guaina	0.063 cm
Spessore interfaccia guaina-combustibile	0.002 cm
Lunghezza attiva del combustibile	260 cm
Passo tra barrette di combustibile	1.26 cm
Dimensioni barra di controllo	21.5x21.5 cm
Materiale riflettore barra di controllo	BeO
Materiale assorbitore barra di controllo	B_4C arricchito al 90% in ^{10}B
Materiale esterno alla parte attiva del nocciolo	BeO/FeO

Tabella 4.4 – Confronto modelli "C-2" con riflettore BeO/FeO

Core analizzato	**k_{eff}**	**Δk**
C-2-A "normale"	1.2158	-
C-2-A "controllo"	1.2011	-1 216 pcm
C-2-B "normale"	1.1931	-
C-2-B "controllo"	1.1874	-479 pcm

La Tabella 4.4 mostra come la situazione migliore dal punto di vista della Δk è rappresentata dal materiale riflettore ossido di berillio, che comporta, oltre ad un aumento del k_{eff} per le consistenti riflessioni dei neutroni, un Δk di -1 216 pcm, quasi quattro volte rispetto al caso con l'acqua e quasi tre volte rispetto al caso con l'ossido di ferro.

4.4 Modello "C-3"

I risultati riportati nel paragrafo precedente hanno dimostrato che un riflettore esterno con ottime caratteristiche, come l'ossido di berillio, migliora sensibilmente il controllo di reattività. La scelta progettuale a questo punto è ricaduta sull'ottimizzazione della geometria e della composizione degli assembly costituenti il nocciolo: è stata conservata la matrice "17x17" delle barrette nell'assembly e la presenza del riflettore esterno (ossido di berillio) ed è stata considerata una configurazione tale che, rispetto al caso precedente, prevedesse una zona "fissile" e una corona interna di materiale "fertile", cioè uranio naturale allo 0.7%. Con questa nuova configurazione, i neutroni prodotti nelle zone fissili producono "breeding" nella parte fertile, con produzione di fissile ^{239}Pu. Per vedere se tale configurazione (classificata "C-3-A") comporti un Δk più significativo rispetto a un modello (classificato "C-3-B") in cui non sia presente la corona interna di uranio naturale, che qui è sostituita da una zona di elementi di combustibile analoghi agli altri elementi presenti, si è proceduto con un confronto tra le due soluzioni in questione. La schematizzazione di questi due modelli è riportata nella Figura 4.2, mentre i loro risultati sono riportati nella Tabella 4.5.

Tabella 4.5 – Caratteristiche modello "C-3"

Tipo di combustibile zona "fissile"	UO_2
N. di elementi di combustibile zona "fissile"	20
N. di barrette per fuel assembly zona "fissile"	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile UO_2 per fuel assembly zona "fissile"	269
Arricchimento UO_2 zona "fissile"	4.9%
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly zona "fissile"	20
Tipo di combustibile zona "fertile"	UO_2
N. di elementi di combustibile zona "fertile"	20
N. di barrette per fuel assembly zona "fertile"	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile UO_2 per fuel assembly zona "fertile"	269
Arricchimento UO_2 zona "fertile"	0.7%
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly	20
Arricchimento UO_2 negli assembly con Gd_2O_3	2.5%
Diametro esterno barretta di combustibile	0.95 cm
Spessore della guaina	0.063 cm
Spessore interfaccia guaina-combustibile	0.002 cm
Lunghezza attiva del combustibile	260 cm
Passo tra barrette di combustibile	1.26 cm
Dimensioni barra di controllo	21.5x21.5 cm
Materiale riflettore barra di controllo	BeO
Materiale assorbitore barra di controllo	B_4C arricchito al 90% in ^{10}B
Materiale esterno alla parte attiva del nocciolo	H_2O

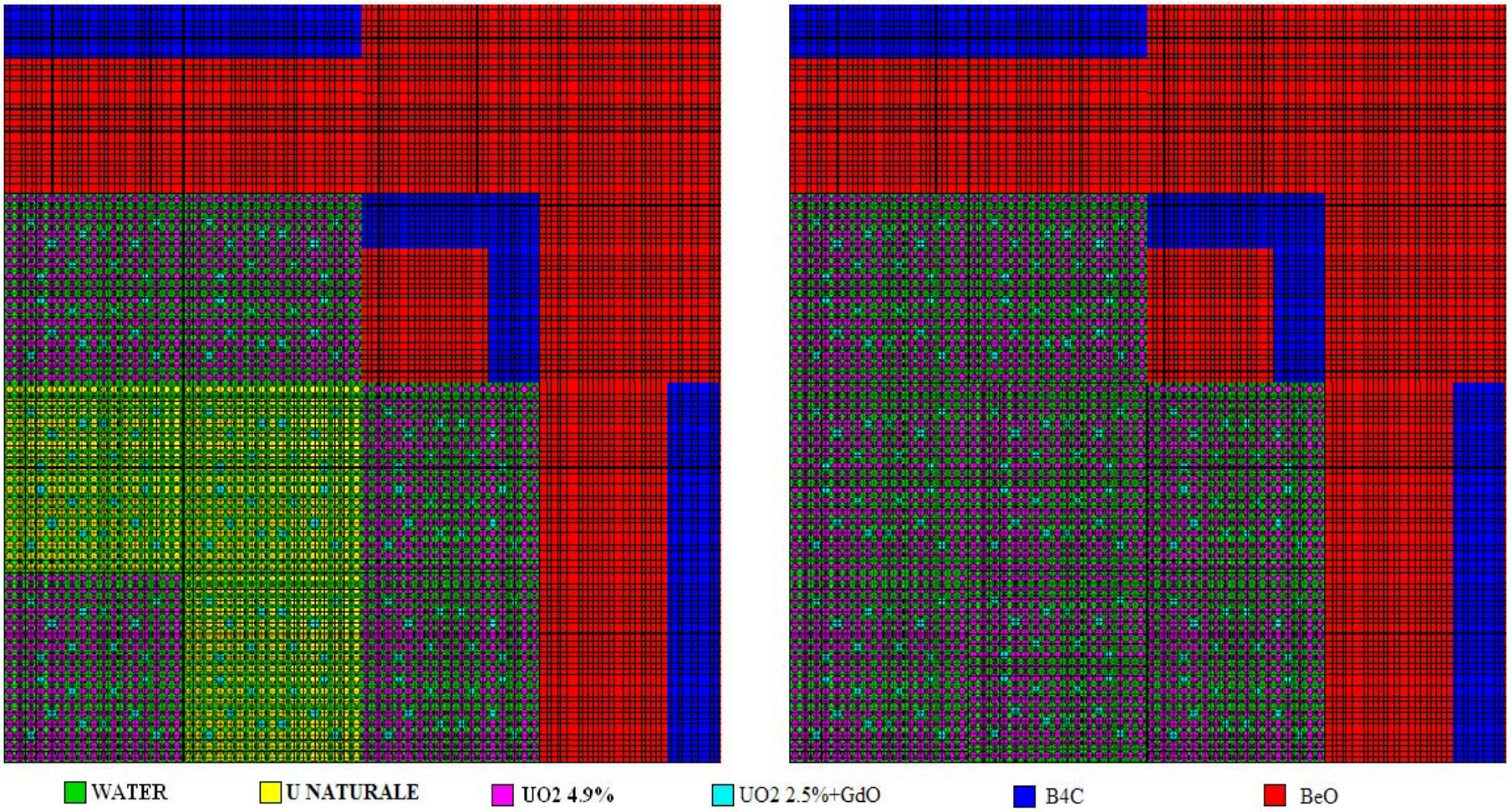

Figura 4.2 – Core “C-3-A” e “C-3-B” nel funzionamento “normale”

Tabella 4.6 – Confronto modelli "C-3" con/senza corona di uranio naturale

Core analizzato	**k_{eff}**	**Δk**
C-3-A "normale"	1.0765	-
C-3-A "controllo"	1.0684	-755 pcm
C-3-B "normale"	1.5578	-
C-3-B "controllo"	1.5469	-702 pcm

La Tabella 4.6 evidenzia come l'inserimento di una corona di uranio naturale interna al core non porti a un significativo miglioramento dal punto di vista del Δk; inoltre, tale Δk risulta essere inferiore rispetto al modello "C-2-A" (in realtà vi sono anche da aggiungere problemi di sbilanciamento di potenza del modello "C-3-A", non considerati ai fini dell'interesse di questo studio). La spiegazione di questi risultati è dovuta al fatto che l'inserimento della corona ha comportato l'aumento delle dimensioni del nocciolo, e le barre di controllo risultano, quindi, essere più lontane rispetto al centro di un nocciolo di un reattore termico, in cui il libero cammino medio dei neutroni è piccolo (dell'ordine dei cm nell'acqua): perciò, allontanando le barre di controllo dal centro del core, se ne diminuisce l'efficacia.

4.5 Conclusioni Modelli "C"

I risultati dei modelli "C-2-A" e "C-3-A" sono molto esplicativi poiché mostrano che per avere un buon assorbimento neutronico tramite un sistema di barre rotanti esterne in un reattore termico, le barre rotanti stesse devono essere collocate il più vicino possibile alla zona in cui si ha il massimo flusso neutronico, e quindi il nocciolo deve avere le dimensioni le più piccole possibili, congiuntamente alle esigenze di potenza richieste. Pertanto, controllare un reattore termico PWR di taglia 150 MW_t dall'esterno tramite un sistema di barre rotanti non è possibile per via del basso valore del libero cammino medio dei neutroni, e per avere dei risultati più consistenti dal punto di vista del Δk ottenuto, si potrebbe pensare di abbassare la taglia del reattore, riducendo il numero di elementi di combustibile o modificando la struttura reticolare, utilizzare un riflettore "ottimo" (magari berillio puro) e sistemi assorbitori rotanti ancor più efficaci.

5 Modello PWR “leaky” con assorbitore esterno

5.1 Introduzione

Rimanendo con l’obiettivo di controllare un reattore con un sistema assorbitore di neutroni esterno, la soluzione ideale potrebbe essere rappresentata da un insieme di blocchi assorbitori che vengono inseriti dall’alto o dal basso; ciò, però, comporterebbe la realizzazione di nuovi sistemi di movimentazione per gestire la movimentazione di carichi di notevoli pesi e che hanno la necessità talvolta, di essere spostati velocemente (come nel caso di SCRAM). Se, inoltre, si aggiunge la problematica della gestione del sistema di controllo in caso di terremoto, si arriva subito a una conclusione che porta a escludere una tale concezione di sistema assorbitore esterno.
Inoltre, non si è affatto considerata l’opzione di inserire delle barre di controllo “classiche” barre di controllo dei LWR all’esterno della parte attiva del nocciolo, in zone precedentemente vuote: non ha senso, infatti, proporre una soluzione che porti a problemi di ingombri e penetrazioni nel vessel analoghi a quelli dei sistemi dei PWR o BWR applicata all’esterno del nocciolo, poiché si avrebbero sicuramente gli stessi problemi, con l’aggravante di un’efficacia minore, in termini di reattività, per il posizionamento esterno di tali sistemi di controllo.
È, però, ancora possibile ragionare sulla fisica del reattore, puntando l’attenzione sul concetto di massimizzazione delle fughe (di qui il nome “leaky” dei modelli proposti nel seguito), analizzando alcune geometrie per il nocciolo che prevedano il controllo attraverso la movimentazione di materiali liquidi inseriti in appositi contenitori. Ragionando con lo stesso numero di elementi di combustibile “17x17” dei modelli con cluster di barre di controllo e barre di controllo rotanti (cioè 6 per quarto di nocciolo, 24 in totale), massimizzando le fughe si avrà una diminuzione di potenza rispetto ai 150 MW_t, ma questa è stata considerata di secondaria importanza per i fini di questa prima ricerca di un reattore controllabile dal punto di vista della reattività.
La scelta di reattori a forte leakage comporta un maggiore arricchimento del combustibile UO_2, che nei modelli che seguiranno è fissato al 19.0% (sono anche state fissate le 20 barrette con veleno bruciabile Gd_2O_3 mescolato al combustibile UO_2 arricchito al 2.5% per fuel assembly), cioè vicino al valore limite posto dalla IAEA al 20%. Sono state quindi studiate due soluzioni concettuali: la prima prevede una zona di acqua esterna in pressione che fa da riflettore nel normale esercizio, e che viene svuotata nel caso di controllo per far arrivare i neutroni direttamente nella zona assorbitrice con carburo di boro, fissa e posta esternamente al nocciolo; in questa soluzione, inoltre, è stata studiata l’ottimizzazione dello spessore del liner di ossido di cadmio fisso da inserire tra la

zona d’acqua e l’assorbitore esterno. La seconda soluzione, invece, prevede acqua pesante come riflettore cui, nel momento in cui deve si deve operare con il controllo del reattore, viene aggiunto il solfato di cadmio che fa da assorbitore dei neutroni.
Allo scopo di massimizzare le fughe, è stata presa in considerazione una configurazione geometrica del nocciolo tale da poter esaltare questo processo fisico: trascurando l’inevitabile diminuzione di potenza rispetto alla taglia originaria prospettata di 150 MW_t, sono state proposte le seguenti geometrie “schiacciate” e innovative:

- modello “leaky slab reactor”;
- modello “leaky donut reactor”.

5.2 Modelli “leaky slab reactor”

5.2.1 - Introduzione

La disposizione geometrica tipo “slab” prevede un nocciolo “12x2”, caratterizzato cioè da una disposizione di 12 elementi di combustibile su 2 file: sono stati considerati elementi di combustibile uguali tra di loro, del tipo “17x17” con alto arricchimento del fissile ^{235}U (19.0%) e 20 barrette di veleno bruciabile per assembly. Si ha, così, una configurazione che porta a una notevole frazione di neutroni di fuga dalla parte attiva: l’efficacia di un riflettore esterno in questo caso viene fortemente esaltata.

5.2.2 - Modello “D-1”

In questo primo modello “leaky” come riflettore si impiega acqua leggera in pressione, che circonda esternamente la parte attiva del nocciolo; nel caso di necessità di controllo, si opera con lo svuotamento della zona d’acqua e pertanto i neutroni andranno direttamente a incontrare la zona fissa di assorbitore in carburo di boro (arricchito al 90% in ^{10}B), posta nella periferia del nocciolo. Per tale modello è stata anche studiata la possibilità dell’inserimento di un liner di ossido di cadmio (fisso) in due opzioni: la prima (denominata “LINER – A”) presenta il liner tra la zona di acqua/vuoto (azoto a bassa concentrazione) e quella di carburo di boro, mentre la seconda (denominata “LINER – B” ed avente uno scopo di confronto) ha il liner tra la zona di combustibile e quella di acqua/vuoto. Al fine di ottenere risultati rapidi ma significativi, è stato costruito un modello in geometria cilindrica infinita, omogeneizzando le pin di combustibile con la frazione di acqua presente nella cella elementare e imponendo le condizioni di riflessione sul lato sinistro e destro del reticolo: ragionando a parità di dimensioni del reticolo, aumentando lo spessore di ossido di cadmio, si diminuisce lo spessore di carburo di boro esterno.

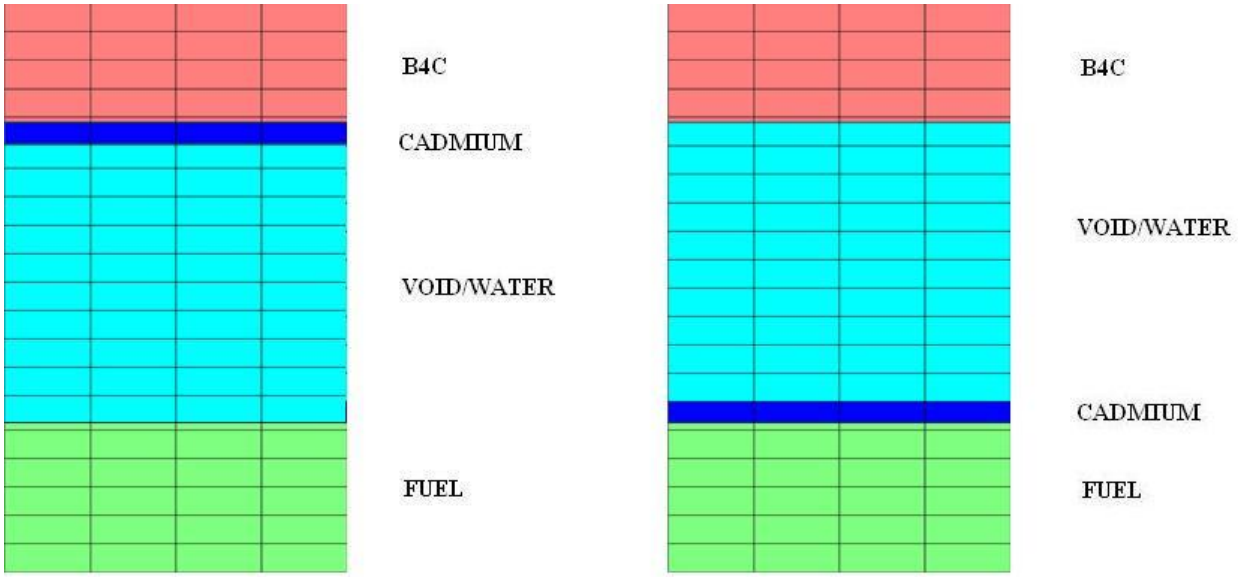

Figura 5.1 – Schematizzazione in NEWT del LINER – A (sx) e LINER – B (dx) con 3 cm di ossido di cadmio

Tabella 5.1 – Ottimizzazione liner di ossido di cadmio nel cilindro infinito

		LINER – A			**LINER – B**	
Caso analizzato	**Funzionamento**	**k_∞**	**Δk**		**k_∞**	**Δk**
NO liner Cd	Normale (acqua inserita)	1.2468			1.2468	
NO liner Cd	Controllo (zona svuotata)	1.1596	**-7 250**		1.1596	**-7 250**
0.1cm Cd	Normale (acqua inserita)	1.2468			1.1829	
	Controllo (zona svuotata)	1.1596	-7 249		1.1611	-1 855
0.3cm Cd	Normale (acqua inserita)	1.2468			1.1835	
	Controllo (zona svuotata)	1.1597	-7 246		1.1639	-1 671
0.5cm Cd	Normale (acqua inserita)	1.2468			1.1845	
	Controllo (zona svuotata)	1.1597	-7 245		1.1664	-1 545
1cm Cd	Normale (acqua inserita)	1.246824			1.1869	
	Controllo (zona svuotata)	1.159723	-7 242		1.1714	-1 314
2cm Cd	Normale (acqua inserita)	1.2468			1.1896	
	Controllo (zona svuotata)	1.1598	-7 233		1.1779	-995
3cm Cd	Normale (acqua inserita)	1.2468			1.1895	
	Controllo (zona svuotata)	1.1560	-7 219		1.1818	-648

I risultati mostrano che il maggiore Δk si ottiene nella soluzione priva dello spessore di ossido di cadmio in entrambi i casi: nel primo caso ciò è dovuto al grande spessore di acqua (nella zona di svuotamento) assunto per il modello (40 cm), il quale riflette o cattura"tutti" i neutroni che attraversano tale strato, e pertanto l'effetto del cadmio in periferia non si fa sentire. Ciò spiega anche lo stesso valore del k_∞ nel funzionamento "normale" del modello "LINER – A", con il grande spessore di acqua inserito (vedi Tabella 5.1). Nel secondo modello, l'inserimento del liner di ossido di cadmio abbassa il valore del k_∞ di circa 6 000 pcm rispetto al caso senza liner ma, ai fini del controllo, è la soluzione senza liner a fornire un maggiore Δk. Pertanto la soluzione con il liner di ossido di cadmio non sarà implementata quando si passerà all'analisi di nocciolo intero.

Tabella 5.2 – Caratteristiche modello "D-1"

Tipo di combustibile	UO_2
N. di elementi di combustibile	24
N. di barrette per fuel assembly	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile UO_2 per fuel assembly	269
Arricchimento UO_2	19.0%
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly	20
Arricchimento UO_2 negli assembly con Gd_2O_3	2.5%
Diametro esterno barretta di combustibile	0.95 cm
Spessore della guaina	0.063 cm
Spessore interfaccia guaina-combustibile	0.002 cm
Lunghezza attiva del combustibile	260 cm
Passo tra barrette di combustibile	1.26 cm
Materiale riflettore	H_2O
Spessore riflettore	40 cm
Materiale assorbitore esterno	B_4C arricchito al 90% in ^{10}B
Spessore assorbitore esterno	20 cm
Dimensioni "slab" del combustibile	257 x 43 cm

Figura 5.2 – Modello “D-1” in condizioni di “controllo”

Tabella 5.3 – Risultati modello "D-1"

Core analizzato	**k_{eff}**	**Δk**
D-1 "normale" (acqua inserita)	1.3907	-
D-1 "controllo"	1.2572	-10 089 pcm

La Tabella 5.3 mostra come, dal punto di vista della reattività, si abbia un valore del Δk alto ma che non assicura la sottocriticità per via dell'alto arricchimento considerato. In analogia allo studio effettuato nei paragrafi relativi ai modelli con barre di controllo rotanti esterne, nei paragrafi successivi saranno sviluppati modelli che hanno come scopo la massimizzazione del Δk, e non la verifica della sottocriticità in tutte le condizioni in cui si può trovare il reattore.

5.2.3 - Modello "D-2"

Come ottimizzazione del modello "D-1" la prima soluzione studiata è rappresentata dalla sostituzione del riflettore acqua leggera con acqua pesante: la D_2O ha, infatti, una minore sezione d'urto di cattura, un minore potere rallentante, e un maggiore potere riflettente rispetto all'acqua leggera. A dar prova di questo fatto, basta un semplice calcolo in geometria di slab infinito, identico a quello svolto precedentemente, senza l'ossido di cadmio a lato del riflettore: i risultati, riportati nella Tabella 5.4, mostrano come si abbia un Δk molto più grande (in valore assoluto) con l'utilizzo di acqua pesante.

Tabella 5.4 – Confronto acqua leggera/acqua pesante nel cilindro infinito privo di ossido di cadmio

		LINER – A	
Caso analizzato	**Funzionamento**	**k_∞**	**Δk**
H_2O	Normale (acqua inserita)	1.2468	
H_2O	Controllo (zona svuotata)	1.1596	**-7 250**
D_2O	Normale (acqua inserita)	1.3096	
D_2O	Controllo (zona svuotata)	1.1596	**-12 166**

Pertanto, ha senso proporre un modello di nocciolo con una zona intermedia di acqua pesante, le cui caratteristiche sono riportate nella Tabella 5.5 e i cui risultati sono nella Tabella 5.6.

Tabella 5.5 – Caratteristiche modello "D-2"

Tipo di combustibile	UO_2
N. di elementi di combustibile	24
N. di barrette per fuel assembly	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile UO_2 per fuel assembly	269
Arricchimento UO_2	19.0%
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly	20
Arricchimento UO_2 negli assembly con Gd_2O_3	2.5%
Diametro esterno barretta di combustibile	0.95 cm
Spessore della guaina	0.063 cm
Spessore interfaccia guaina-combustibile	0.002 cm
Lunghezza attiva del combustibile	260 cm
Passo tra barrette di combustibile	1.26 cm
Materiale riflettore	D_2O
Spessore riflettore	40 cm
Materiale assorbitore esterno	B_4C arricchito al 90% in ^{10}B
Spessore assorbitore esterno	20 cm
Dimensioni "slab" del combustibile	257 x 43 cm

Tabella 5.6 – Risultati modello "D-2"

Core analizzato	**k_{eff}**	**Δk**
D-2 "normale" (acqua pesante inserita)	1.4630	-
D-2 "controllo"	1.2572	- 15 160 pcm

L'aver considerato acqua pesante come riflettore nel funzionamento normale del reattore porta a un grande aumento del valore del k_{eff} rispetto all'analogo caso con acqua leggera, che di conseguenza conduce a un cospicuo incremento nel valore del Δk.

5.2.4 - Modello "D-3"

Partendo dai buoni risultati, in termini di Δk, ottenuti con il modello "D-2", nel modello "D-3" si propone un sistema in cui l'assorbimento è realizzato inserendo solfato di cadmio ($CdSO_4$) all'interno dell'acqua pesante: in questa soluzione, ripresa dal reattore "Niederaichbach" progettato dalla Siemens negli anni Sessanta [15], si elimina la zona esterna di carburo di boro, che era presente nei modelli "D-1" e "D-2", affidando il controllo della reattività a un assorbitore liquido, il solfato di cadmio, già usato ai tempi del "Chicago Pile 1" (si sarebbe iniettato "a mano" nel nocciolo in caso di emergenza).

Tabella 5.7 – Caratteristiche modello "D-3"

Tipo di combustibile	UO_2
N. di elementi di combustibile	24
N. di barrette per fuel assembly	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile UO_2 per fuel assembly	269
Arricchimento UO_2	19.0%
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly	20
Arricchimento UO_2 negli assembly con Gd_2O_3	2.5%
Diametro esterno barretta di combustibile	0.95 cm
Spessore della guaina	0.063 cm
Spessore interfaccia guaina-combustibile	0.002 cm
Lunghezza attiva del combustibile	260 cm
Passo tra barrette di combustibile	1.26 cm
Materiale riflettore	D_2O
Spessore riflettore	40 cm
Materiale assorbitore interno	Solfato di cadmio ($CdSO_4$)
Dimensioni "slab" del combustibile	257 x 43 cm

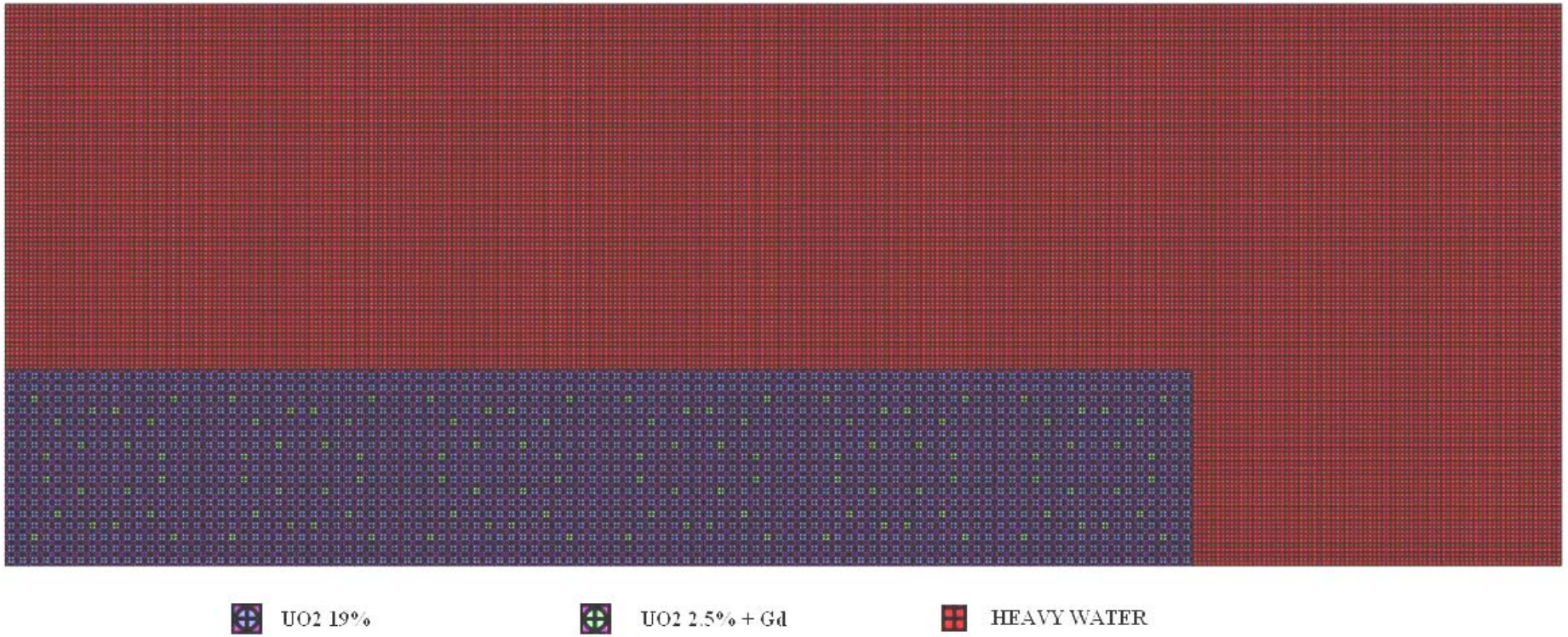

Figura 5.3 – Modello “D-3” nel funzionamento “normale”

Tabella 5.8– Risultati del modello "D-3"

Core analizzato	$\mathbf{k_{eff}}$	$\Delta\mathbf{k}$
D-3 "normale"	1.4495	-
D-3 "controllo" (inserimento solfato di cadmio)	1.3363	- 8 133 pcm

Confrontando il Δk ottenuto nel modello "D-2" con quello del modello "D-3", si vede come la prima configurazione fornisca un risultato migliore (in valore assoluto) rispetto alla seconda, con un'efficacia del sistema di controllo quasi doppia in termini di pcm. Da sottolineare, inoltre, che nel modello "D-3" non è stato effettuato il calcolo con lo svuotamento della zona dell'acqua pesante riflettore (come è stato fatto nel modello "D-2"), perché si è voluta verificare l'efficacia di un assorbitore liquido come il solfato di cadmio che "avvelenasse" il riflettore stesso.

5.3 Modelli "leaky donut reactor"

5.3.1 - Introduzione

Come evoluzione del modello "D-1" ne è stato studiato uno che si differenzia per la geometria "a ciambella": infatti, in ordine progressivo, al centro del nocciolo vi è una zona destinata all'acqua (che si svuota nel momento del "controllo") oppure con veleni, seguita da una corona di elementi di combustibile (sempre 6 per quarto di nocciolo), seguita a sua volta da una corona di acqua e, nella parte più esterna, l'assorbitore in carburo di boro.

5.3.2 - Modello "E-1"

Il modello "E-1" prevede un "hole" interno di acqua, circondato da una corona di elementi di combustibile, circondata a sua volta da un'altra zona di acqua: l'acqua è presente nel normale funzionamento del reattore in entrambe le zone, che si svuotano nel caso di dover intervenire con il controllo. Le caratteristiche di questo modello, rappresentato in Figura 5.4, sono riportate nella Tabella 5.9.

Tabella 5.9– Caratteristiche modello "E-1"

Tipo di combustibile	UO_2
N. totale di elementi di combustibile	30
ZONA A MAGGIORE ARRICCHIMENTO	
N. di elementi di combustibile	24
N. di barrette per fuel assembly	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile UO_2 per fuel assembly	269
Arricchimento UO_2	19.0%
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly	20
Arricchimento UO_2 negli assembly con Gd_2O_3	2.5%
ZONA A MINORE ARRICCHIMENTO	
N. di elementi di combustibile	6
N. di barrette per fuel assembly	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly	289
Arricchimento UO_2	2.5%
Diametro esterno barretta di combustibile	0.95 cm
Spessore della guaina	0.063 cm
Spessore interfaccia guaina-combustibile	0.002 cm
Lunghezza attiva del combustibile	260 cm
Passo tra barrette di combustibile	1.26 cm
Dimensioni "hole" interno	43 x 65.7 cm
Materiale "hole" interno	H_2O
Spessore riflettore	40 cm
Materiale riflettore	H_2O
Materiale assorbitore esterno	B_4C arricchito al 90% in ^{10}B
Spessore assorbitore esterno	20 cm
Dimensioni "slab" del combustibile	129 x 109 cm[4]

[4] Alle dimensioni di questo "slab" sono da sottrarre quelle della zona "hole" interna

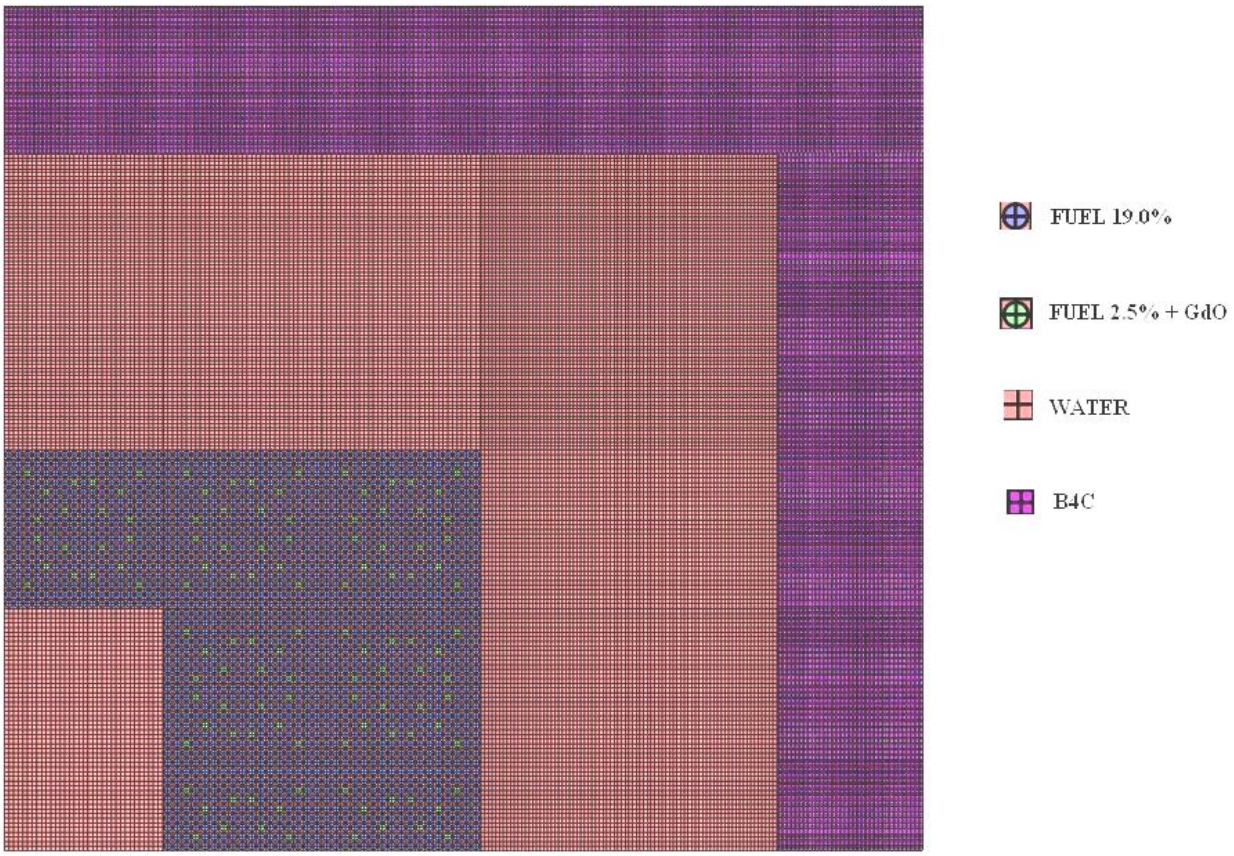

Figura 5.4– Modello "E-1" nel funzionamento "normale"

Tabella 5.10– Risultati del modello "E-1"

Core analizzato	**k_{eff}**	**Δk**
E-1 "normale"	1.1555	-
E-1 "controllo"	1.1409	-1 276 pcm

Come ci si poteva già aspettare, questo primo modello di reattore a ciambella non presenta un grande Δk per via dello strato più interno che viene percorso dai neutroni, i quali poi vanno a produrre fissioni nella zona di combustibile. Pertanto, occorre studiare una configurazione che presenti la zona più interna che assorba i neutroni, magari con veleni bruciabili.

5.3.3 - Modello "E-2"

L'evoluzione del modello "E-1" consiste nel sostituire la zona interna di acqua con una zona "fertile" riempita da barre di combustibile con arricchimento e veleni bruciabili con composizione identica alle 20 barrette di UO_2+Gd_2O_3 contenute nei fuel assembly con arricchimento al 19.0%. In questo modo si vuole cercare di avere un contenimento dell'eccesso di reattività iniziale (rispetto a un modello con tutti gli assembly con alti arricchimenti) e aumentare la durata del ciclo, cercando di conservare il Δk ottenuto nel modello "D-1".

Tabella 5.11– Caratteristiche modello "E-2"

Tipo di combustibile	UO_2
N. totale di elementi di combustibile	30
ZONA A MAGGIORE ARRICCHIMENTO	
N. di elementi di combustibile	24
N. di barrette per fuel assembly	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile UO_2 per fuel assembly	269
Arricchimento UO_2	19.0%
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly	20
Arricchimento UO_2 negli assembly con Gd_2O_3	2.5%
ZONA A MINORE ARRICCHIMENTO	
N. di elementi di combustibile	6
N. di barrette per fuel assembly	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly	289
Arricchimento UO_2	2.5%
Diametro esterno barretta di combustibile	0.95 cm
Spessore della guaina	0.063 cm
Spessore interfaccia guaina-combustibile	0.002 cm
Lunghezza attiva del combustibile	260 cm
Passo tra barrette di combustibile	1.26 cm
Spessore riflettore	40 cm
Materiale riflettore	H_2O
Materiale assorbitore esterno	B_4C arricchito al 90% in ^{10}B
Spessore assorbitore esterno	20 cm
Dimensioni "slab" del combustibile	129 x 109 cm

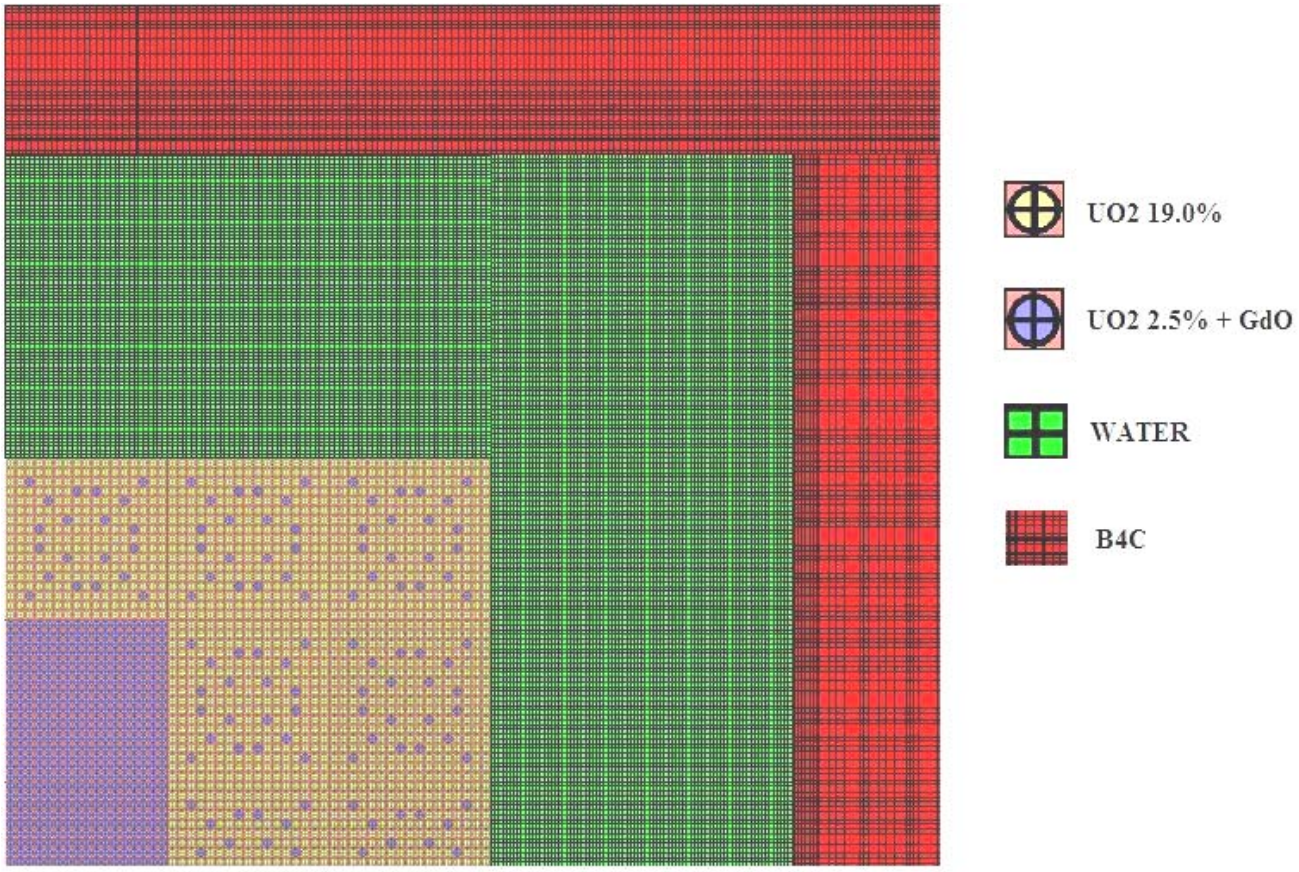

Figura 5.5 – Modello "E-2" nel funzionamento "normale"

Tabella 5.12– Risultati del modello "E-2"

Core analizzato	**k_{eff}**	**Δk**
E-2 "normale"	1.1625	-
E-2 "controllo"	1.1558	-578

Il basso valore del Δk ottenuto con il modello "E-2" (-578 pcm) porta a dover fare ulteriori considerazioni sul materiale riflettore da utilizzare.

5.3.4 - Modello "E-3"

Per ottenere un controllo della reattività più efficace rispetto al modello di nocciolo "E-2" si può intervenire con la sostituzione dell'acqua leggera utilizzata come riflettore con acqua pesante, lasciando inalterata la restante composizione del nocciolo. Le caratteristiche di questo modello, riportate nella Tabella 5.13, portano ai risultati mostrati nella Tabella 5.14.

Tabella 5.13 – Caratteristiche modello "E-3"

Tipo di combustibile	UO_2
N. totale di elementi di combustibile	30
ZONA A MAGGIORE ARRICCHIMENTO	
N. di elementi di combustibile	24
N. di barrette per fuel assembly	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile UO_2 per fuel assembly	269
Arricchimento UO_2	19.0%
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly	20
Arricchimento UO_2 negli assembly con Gd_2O_3	2.5%
ZONA A MINORE ARRICCHIMENTO	
N. di elementi di combustibile	6
N. di barrette per fuel assembly	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%) per fuel assembly	289
Arricchimento UO_2	2.5%
Diametro esterno barretta di combustibile	0.95 cm
Spessore della guaina	0.063 cm
Spessore interfaccia guaina-combustibile	0.002 cm
Lunghezza attiva del combustibile	260 cm
Passo tra barrette di combustibile	1.26 cm
Spessore riflettore	40 cm
Materiale riflettore	D_2O
Materiale assorbitore esterno	B_4C arricchito al 90% in ^{10}B
Spessore assorbitore esterno	20 cm
Dimensioni "slab" del combustibile	129 x 109 cm

Tabella 5.14– Risultati del modello "E-3"

Core analizzato	**k_{eff}**	**Δk**
E-3 "normale"	1.1762	-
E-3 "controllo"	1.1558	-1 754 pcm

Rispetto al modello “E-2”, il modello “E-3” fornisce un Δk superiore in valore assoluto (1 754 pcm contro 578 pcm) grazie all’inserimento di acqua pesante come materiale riflettore, ma sempre molto inferiore rispetto ai risultati ottenuti con i modelli “leaky slab reactor”.

5.4 Conclusione sui modelli “leaky”

I modelli “leaky”, soprattutto il “D-1” e “D-2”, risultano essere interessanti dal punto di vista del controllo neutronico, ma legati a essi vi sono numerosi aspetti di progettazione termoidraulica/meccanica che vanno risolti: oltre alla realizzazione di un sistema di iniezione tale da svuotare totalmente questa zona in caso di SCRAM in tempi brevi, occorrerebbe studiare un sistema in grado di garantire la regolazione “fine” della reattività e soprattutto gestire la rimozione di potenza prodotta nella periferia del nocciolo nella fase in cui la regione di acqua risulta svuotata: tutto questo poi deve essere valutato tenendo in considerazione i costi aggiuntivi dovuti all’utilizzo dell’acqua pesante.
Qualora si riuscissero a trovare delle soluzioni in grado di risolvere questi aspetti, tra i “leaky” analizzati, i modelli “D-1”, “D-2” diverrebbero assai interessanti, soprattutto per la loro modularità, con l’aggiunta di altri elementi di combustibile nelle file presenti (aumentando ancor di più le dimensioni totali del nocciolo). In questo lavoro, non potendo fornire soluzioni impiantistiche alle tematiche accennate in precedenza, non si è proceduto alla ricerca della composizione ottimale che garantisse la sottocriticità, ma sono state introdotte soluzioni che appaiono promettenti interessanti dal punto di vista neutronico.

6 Conclusioni

I modelli di nocciolo simulati hanno dimostrato quanto sia complessa la realizzazione di un sistema caratterizzato dall'assenza di boro ma con un sistema sostitutivo di controllo efficace della reattività.

Ogni modello richiede un approfondito studio partendo dall'elemento di combustibile, ragionando su arricchimento, quantità e distribuzione di veleni bruciabili, dimensioni del reticolo, per poi passare a una disposizione ottimale dei fuel assembly nel nocciolo a seconda del sistema assorbitore prescelto. La semplificazione a livello economico e di gestione d'impianto ottenuta eliminando l'acido borico disciolto nel primario deve essere poi affiancata a studi di economicità della soluzione proposta. Come si è visto, infatti, il modello "A-2" (che soddisfa tutti i requisiti per la sottocriticità) presenta un burn-up basso (23 778 MWd/tU), e quindi l'analisi neutronica deve essere necessariamente affiancata da quella economica.

Dal punto di vista della novità, le barre di controllo cruciformi applicate a un reattore PWR si configurano come un'interessante proposta per i reattori pressurizzati, poiché eliminano i problemi di ingombro nella parte alta del nocciolo, agevolando così le ricariche o le ispezioni. Il modello di nocciolo "B-1" presentato può essere considerato come un primo studio di partenza per sviluppare in futuro modelli che ottimizzino i requisiti richiesti per il controllo della reattività.

Proporre un sistema di barre rotanti esterne al nocciolo a un reattore termico incontra l'ostacolo dato dal breve libero cammino medio dei neutroni nell'acqua, e pertanto non è soddisfacente per le esigenze di sicurezza strettamente connesse al controllo della reattività del nocciolo.

I modelli "leaky" rappresentano delle proposte interessanti per degli innovativi layout di nocciolo con controllo della reattività esterno, che forniscono maggiori valori dal punto di vista del Δk rispetto ai sistemi con barre rotanti, ma che dovranno essere affiancati da un approfondito studio sulla realizzazione dei sistemi ausiliari a supporto del processo di controllo del nocciolo. Infatti, la "ottimizzazione fisica" consiste nel proporre delle soluzioni interessanti dal punto di vista neutronico, ma a essa deve seguire lo studio sulla realizzazione pratica degli spunti proposti in questo lavoro, tenendo conto anche degli aspetti normativi. Tuttavia, l'analisi parametrica svolta risulta essere importante per capire quali possono essere i primi passi da muovere nella progettazione di un reattore nucleare di piccola taglia, portando a escludere a-priori alcune soluzioni (come i modelli con barre esterne rotanti), e a reputarne interessanti altre (per esempio i modelli con le barre cruciformi).

7 Sviluppi futuri

L’analisi preliminare sui modelli di nocciolo che è stata sviluppata nel corso di questo lavoro, dovrà essere seguita da uno studio dei fattori di picco e dei coefficienti di reattività delle soluzioni più interessanti e realizzabili tra quelle analizzate o accennate. Altro aspetto fondamentale da analizzare sarà la modalità con cui realizzare il controllo della reattività nel momento in cui si esaurisce il veleno bruciabile mescolato al combustibile: oltre a studiare la possibilità di utilizzare barre di combustibile rivestite da materiali che contengono assorbitori, interessante sarà lo studio d’inserimento di barre di veleno bruciabile in tubi guida precedentemente vuoti. Tale soluzione ha bisogno di un nuovo studio a partire dall’elemento di combustibile, per poi arrivare a identificare il tempo necessario per questa sorta di refueling, poiché tale operazione non può essere effettuata con reattore a potenza.

In ultimo sarà interessante effettuare un confronto dei risultati ottenuti con i codici NEWT e TRITON con altri codici di calcolo, sia deterministici sia stocastici, per ottenere una sorta di validazione dei risultati ottenuti. Analogo confronto dovrebbe essere fatto utilizzando librerie di sezioni d’urto diverse.

8 Bibliografia e pagine web consultate

[1] World Nuclear Association, "*Small Nuclear Power Reactors*", 2009.

[2] Vladimir Kuznetsov, "*Opportunities, Challenges and Common Design Objectives for Innovative Small and Medium Sized Reactors*", 2007.

[3] Mario D. Carelli, "*IRIS: A global approach to nuclear power renaissance*", 2003.

[4] M. Cumo, "*Impianti Nucleari*", Roma, Ed. Università La Sapienza, 2008.

[5] L. Sani, "*Centrali Elettronucleari*", Roma, Ed. Sistema, 1997.

[6] Chien C. Lin, "*Radiochemistry in Nuclear Power Reactors*", Committee on Nuclear and Radiochemistry, National Research Council, 1996.

[7] Westinghouse Electric Corporation, "*Source Term Data for Westinghouse Pressurized Water Reactors*", WCAP-8253, May 1974.

[8] http://www.toshiba.co.jp/nuclearenergy/english/business/reactor/newabwr.htm , Toshiba.

[9] http://fti.neep.wisc.edu/neep602/SPRING00/lecture35.pdf , University of Wisconsin.

[10] M. D. De Hart, "*NEWT: a new transport algorithm for two dimensional discrete ordinates analysis in non-orthogonal geometries*", ORNL/NUREG/CSD-2/R7, 2004.

[11] NEA, "*Benchmark on the Three-dimensional VENUS-2 MOX Core Measurements*", NEA/NSC/DOC (2003)5, 2004.

[12] M. D. De Hart, "*TRITON: a two-dimensional depletion sequence for characterization of spent nuclear fuel*", ORNL/NUREG/CSD-2/R7, 2004.

[13] S. Caterino, "*Verifiche neutroniche relative a due modelli di nocciolo per reattore PWR con gestione del combustibile a 4 cicli di ricarica e a ciclo unico di irraggiamento*", CERSE-UNIROMA1 RL 1151/2008, Roma, 2008.

[14] A. Gandini, "*Elementi di ingegneria del nocciolo*", Edizioni Sapienza, 2005.

[15] Kenneth D. Kok, "*Nuclear Engineering Handbook*", CRC Press, 2009.

9 Appendici

APPENDICE A – Il codice di calcolo NEWT

Introduzione

NEWT (New ESC-based Weighting Transport code) è un codice di trasporto bi-dimensionale (2-D) deterministico alle ordinate discrete basato sull'approccio "Extended Step Characteristic" (ESC) per la discretizzazione spaziale su un'arbitraria struttura di mesh. Questo schema di discretizzazione fa di NEWT uno strumento estremamente potente e versatile per calcoli deterministici in problemi reali con domini non ortogonali. Il codice NEWT è evoluto dal precedente codice di prova CENTAUR, ed è stato sviluppato per essere accoppiato con SCALE. Infatti, NEWT utilizza le sezioni d'urto formattate di AMPX processate da altri moduli di SCALE. Se le sezioni d'urto sono adeguatamente preparate, NEWT può essere lanciato in modalità stand-alone. Comunque, può essere anche usata la sequenza *t-xsec* all'interno del modulo di controllo TRITON di SCALE per preparare automaticamente le sezioni d'urto e quindi eseguire NEWT per la soluzione del trasporto.
L'equazione del trasporto, una derivazione linearizzata dell'equazione di Boltzmann, fornisce un'esatta descrizione del campo di radiazione di particelle neutre in termini di posizione, direzione del percorso, ed energia di ogni particella nel campo. Le tecniche deterministiche, come il trasporto integrale, la probabilità di collisione, la teoria della diffusione, e i metodi alle ordinate discrete sono più adatti rispetto agli approcci stocastici per problemi dove le quantità differenziali come il flusso neutronico funzione dell'energia e dello spazio sono desiderati; l'approccio alle ordinate discrete è un'approssimazione più rigorosa dell'equazione del trasporto, ma è tipicamente molto limitata nella sua flessibilità per descrivere sistemi geometrici complessi.
Gli approcci alle ordinate discrete sono derivati dalla forma integro-differenziale dell'equazione del trasporto di Boltzmann, dove le dipendenze da spazio, tempo ed energia sono normalmente trattate utilizzando una griglia alle differenze finite, mentre il comportamento angolare è trattato considerando un numero di direzioni discreto nello spazio. La soluzione angolare è accoppiata con la soluzione spaziale attraverso alcune forme di integrazione numerica. L'approssimazione alle ordinate discrete è considerata di essere la più rigorosa caratterizzazione deterministica del trasporto. Proprio per via del trattamento diretto angolare dell'approccio alle ordinate discrete, le funzioni di distribuzione dipendenti dall'angolo possono essere computate; perciò questo approccio

è il metodo preferito di soluzione in molte specifiche applicazioni dove l'anisotropia angolare è importante.

L'approccio ESC è stato sviluppato per ottenere soluzioni alle ordinate discrete in geometrie complicate per le quali altri metodi forniscono soluzioni meno soddisfacenti. Questo metodo è stato sviluppato per gestire le necessità delle configurazioni irregolari.

Le soluzioni deterministiche all'equazione del trasporto generalmente calcolano una soluzione in termini di particelle di flusso; il flusso è il prodotto della densità della particella e della velocità, ed è una quantità utile nella determinazione dei tassi di reazione che caratterizzano i sistemi nucleari. I metodi generali 2-D alle ordinate discrete realizzano calcoli che forniscono flussi pesati sui quattro lati e un flusso mediato sulla cella per ogni cella in un problema a griglia regolare; le iterazioni sono svolte per ottenere una distribuzione a convergenza. Questo approccio è generalmente chiamato "approccio alla differenza a diamante". Usando l'approccio ESC, un problema con una griglia più flessibile e completamente arbitraria può essere definito in termini di poligoni convessi; non è fissato un limite al numero di lati in un dato poligono. I flussi pesati sui lati per ogni poligono nel dominio del problema sono calcolati e usati per calcolare il flusso mediato di cella. Questo processo è ripetuto per ogni cella nel dominio del problema e, come nei tradizionali approcci, l'iterazione è svolta per arrivare a convergenza. Questa flessibilità geometrica è un miglioramento significativo rispetto alle tecnologie esistenti, e fornisce la capacità di modellare problemi che sono difficili e non praticabili da modellare direttamente.

NEWT offre diverse capacità che possono essere potenzialmente usate in un'ampia varietà di aree di applicazione, come calcoli di autovalore (2-D e un'approssimazione 3-D usando la correzione del buckling), soluzioni di flussi in avanti e flussi aggiunti, calcoli di spettro di flusso multigruppo, e collassamento delle sezioni d'urto pesate con i materiali per le sequenze di bruciamento con TRITON [10].

In Figura A.1 è riportato un diagramma di flusso delle principali subroutine di NEWT durante i normali calcoli.

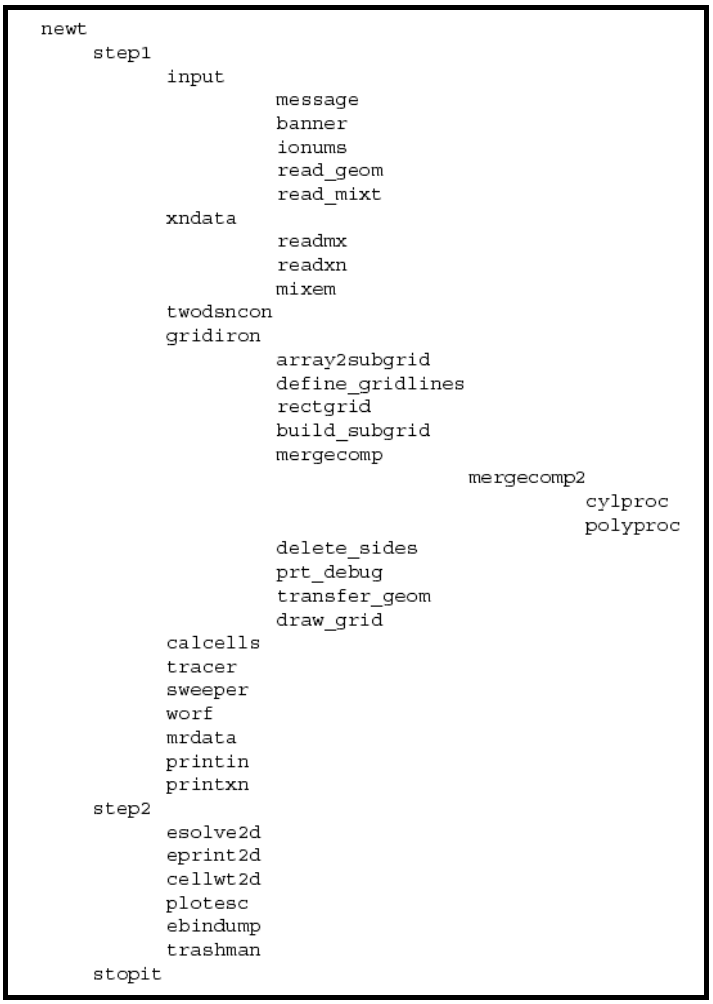

Figura A.1 – Diagramma di flusso delle principali subroutine di NEWT

Validazione del codice NEWT

Per la validazione del codice NEWT si è proceduto con un confronto dei risultati del benchmark internazionale del reattore VENUS-2 ("Benchmark on the Three-dimensional VENUS-2 MOX Core Measurements") con il codice in questione. L'obiettivo del benchmark era quello di validare e comparare i set di dati nucleari e codici utilizzati per i calcoli in sistemi con combustibile MOX nei paesi membri del NEA. Il confronto con i dati sperimentali permette di identificare le discrepanze tra calcoli e misure e quantificare i relativi meriti dei differenti metodi di calcolo.

Il nocciolo analizzato per il confronto è quello di VENUS-2: si tratta di un reattore critico a potenza zero, localizzato presso SCK·CEN in Belgio. Poiché lo scopo del lavoro non era la validazione di tutto il benchmark di VENUS-2 con NEWT, si è proceduto solo alla verifica del primo punto richiesto dal benchmark, e cioè il calcolo di k_∞ per i tre tipi di celle di combustibile presenti nel reattore:

- combustibile UO_2 "3/0", arricchito al 3.306% in ^{235}U;

- combustibile UO_2 “4/0”, arricchito al 4.022% in ^{235}U;
- combustibile MOX “2/2.7”, UO_2 arricchito al 2.0% in ^{235}U e PuO_2 arricchito al 2.7%.

Al benchmark di VENUS-2 per il calcolo del k_∞ hanno contribuito undici partecipanti, fornendo in totale 19 soluzioni. La lista dei partecipanti, delle librerie di base e dei codici utilizzati è riportata qui di seguito.

1. **FRAMATOME ANP GmbH, Germania**

Libreria utilizzata: ENDF/B-IV.
Codice di cella: CASMO-4 (70 gruppi).
Note: approssimazione S_8P_0.

2. **KAERI, Corea**

Libreria utilizzata: ENDF/B-VI release 7.
Codice di cella: TRANSX 2.15 (190 gruppi.)
Note: approssimazione S_8P_3.

3. **NEA+KAERI, Corea**

Libreria utilizzata: ENDF/B-IV.
Codice di cella: TRANSX 2.15 (190 gruppi) .
Note: approssimazione S_8P_0.

4. **Purdue University, USA**

Libreria utilizzata: ENDF/B-VI release 3.
Codice di cella: HELIOS 1.7 (190 gruppi) .
Note: kernel SP3 con una mesh per cella.

5. **JAERI, Giappone**

Libreria utilizzata: JENDL-3.2 e JENDL-3.3.
Codice di cella: MVP.
Note: 49 milioni come numero di storie utilizzate.

6. **SCK·CEN, Belgio**

Libreria utilizzata: ENDF/B-VI release 5 e JEF-2.2.

Codice di cella: MCNP-4C.

Note: 1 milione come numero di storie utilizzate.

7. **KAERI+NEA, Corea**

Libreria utilizzata: ENDF60 (libreria di MCNP), ENDF/B-VI release 5, JENDL-3.2, JEF-2.2.

Codice di cella: MCNP-4B.

Note: 12.5 milioni come numero di storie utilizzate.

8. **KFKI, Ungheria**

Libreria utilizzata: ENDF/B-VI release 2.

Codice di cella: MCNP-4B.

Note: 1 milione come numero di storie utilizzate.

9. **KI, Russia**

Libreria utilizzata: MCU basata su ENDF/B-VI, JENDL-3.2 e BROND.

Codice di cella: MCU-REA.

Note: 1 milione come numero di storie utilizzate.

10. **GRS+IKE, Germania**

Libreria utilizzata: JEF-2.2, ENDF/B-VI release 5 e JENDL-3.2.

Codice di cella: MCNP-4C.

Note: 4 milioni come numero di storie utilizzate.

11. **SEA, Spagna**

Libreria utilizzata: ENDF/B-VI per combustibile, acqua, alcuni elementi di strutture di acciaio (per il resto ENDF/B-V).

Codice di cella: MCNP-4C.

Note: 40 milioni come numero di storie utilizzate.

A questa lista di partecipanti e ai rispettivi risultati si inseriscono quelli ottenuti attraverso il codice NEWT contenuto nel pacchetto SCALE5:

0. **La Sapienza, Italia**

Libreria utilizzata: ENDF/B-V.

Codice di cella: NEWT.

Note: approssimazione S_8P_0.

Per la verifica dell'allineamento del codice NEWT al benchmark di VENUS-2, è stata utilizzata la libreria ENDF/B-V a 238-gruppi, mentre per i successivi modelli di nocciolo è stata utilizzata la ENDF/B-V a 44-gruppi.

La libreria ENDF/B-V a 238-gruppi è una libreria per scopi generali di analisi di criticità ed è la più completa libreria disponibile in SCALE. Questa libreria contiene i dati per tutti i nuclidi (più di 300) disponibili nella ENDF/B-V processata dai sistemi AMPX-77 e contiene anche i dati di ENDF/B-VI di valutazione di elementi come ^{14}N, ^{15}N, ^{16}O, ^{154}Eu e ^{155}Eu.

La libreria ha 148 gruppi veloci e 90 gruppi termici (sotto i 3 eV) e tutti i nuclidi utilizzano lo stesso spettro di pesatura, che consiste in:

1. Spettro maxwelliano (picco a 300 K) da 10^{-5} eV a 0.125 eV,
2. Spettro 1/E da 0.125 eV a 67.4 keV,
3. Spettro di fissione (temperatura effettiva a 1.273 MeV) da 67.4 keV a 10 MeV,
4. Spettro 1/E da 10 MeV a 20 MeV.

Tutti i nuclidi utilizzano l'espansione di Legendre P_5 per adattare lo scattering elastico e anelastico nell'intervallo veloce, rendendo quindi la libreria adatta sia per applicazioni di reattori sia di schermaggio. L'espansione P_3 è stata usata per lo scattering termico, mentre tutti gli altri processi di scattering utilizzano la P_0.

La libreria ENDF/B-V a 44-gruppi è stata sviluppata per l'analisi di combustibile fresco ed esausto e sistemi di rifiuti radioattivi. Collassata dalla libreria di sezioni d'urto fine a 238 gruppi, questa libreria a gruppi larghi contiene tutti i nuclidi (più di 300) dai data file della ENDF/B-V. I contorni della libreria sono stati scelti come un "subset" di quelli della libreria madre a 238 gruppi, enfatizzando gli aspetti di un tipico combustibile di un LWR: due finestre nello spettro della sezione d'urto dell'ossigeno, una finestra nella sezione d'urto del ferro, il picco maxwelliano nell'intervallo termico e la risonanza a 0.3 eV nel ^{239}Pu. I contorni risultanti rappresentano 22 gruppi veloci e 22 termici.

La libreria a 44 gruppi è stata testata con la sua libreria madre utilizzando un set di 33 benchmark per dimostrare che il set collassato è un'accettabile rappresentazione della libreria a 238 gruppi, sia per sistemi con spettro termico che con spettro veloce, mentre per sistemi a energie intermedie la libreria a 238 gruppi rimane la libreria raccomandata da utilizzare.

Le caratteristiche delle pin di combustibile da schematizzare per il calcolo del k_∞ sono riportate nella Tabella A1 e la realizzazione in NEWT è riportata nella Figura A.2 [11].

Tabella A.1 – Caratteristiche pin di combustibile del benchmark di VENUS-2

Pin di combustibile	**3/0**		**4/0**		**2/2.7**
Tipo di combustibile	UO_2		UO_2		UO_2+PuO_2
Diametro del combustibile	0.819 cm		0.8926 cm		0.902
Materiale di cladding	Zircaloy 4		Acciaio inossidabile AISI 304		Acciaio inossidabile
Diametro esterno del cladding	0.95 cm		0.978 cm		0.978 cm
Diametro interno del cladding	0.836 cm		0.902 cm		0.902 cm
Passo della pin di combustibile	1.26 cm		1.26 cm		1.26 cm
Arricchimento ^{235}U in UO_2	3.306 %		4.022 %		2.002 %
Arricchimento PuO_2	-		-		2.7 %
Note	Il gap tra fuel e cladding è “vuoto”.		Il gap tra fuel e cladding è “vuoto”.		Percentuale isotopi fissili sul PuO_2: ^{239}Pu = 79.3 %, ^{241}Pu = 3.05 %.

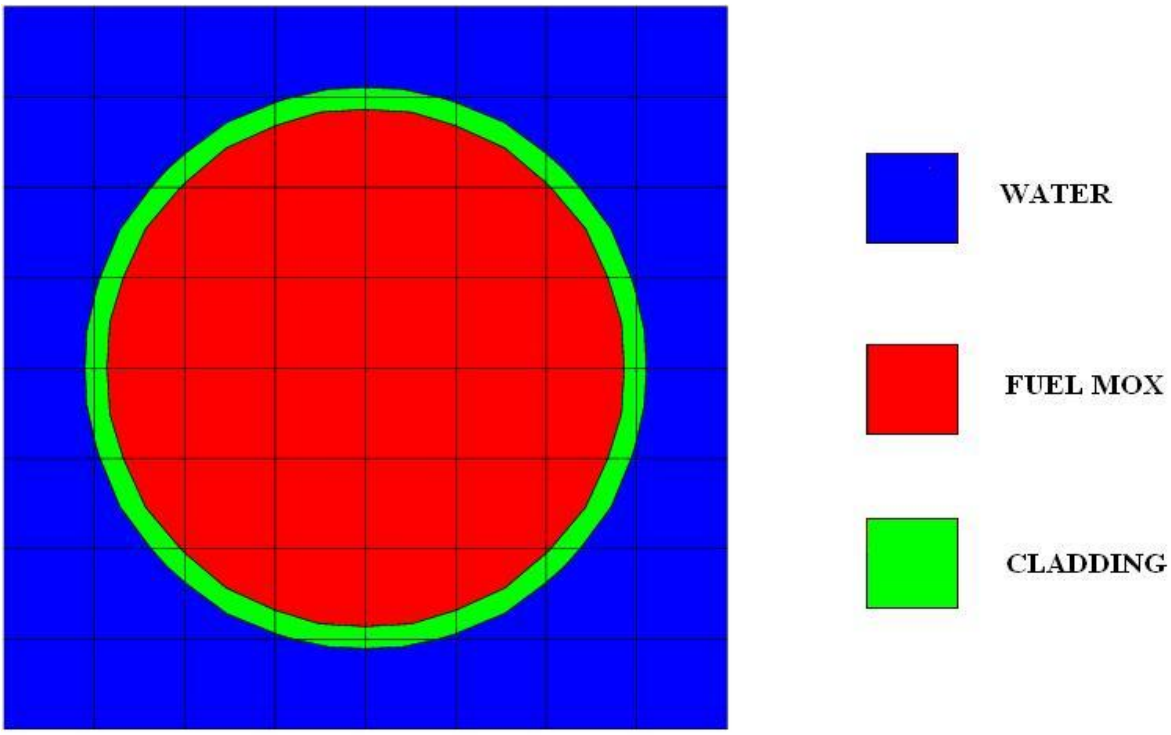

Figura A.2 – Schematizzazione in NEWT della pin di combustibile MOX

La Tabella A.2 riporta i risultati ottenuti con il codice NEWT e quelli presenti nel benchmark.

Tabella A.2 – Risultati k_∞ benchmark e La Sapienza

Partecipante	Codice	Libreria	3/0 (UO_2)	Dev. [%]	4/O (UO_2)	Dev. [%]	2/2.7 (MOX)	Dev. [%]
La Sapienza	SCALE5	ENDF/B-V	**1.41104**	0.32	**1.33035**	-0.55	**1.25771**	0.03
FRAMATOME-ANP	CASMO-4	ENDF/B-IV	1.40394	-0.19	1.33469	-0.22	1.2555	-0.15
KAERI	TRANSX-2.15	ENDF/B-VI.7	1.39612	-0.74	1.32679	-0.81	1.24636	-0.88
NEA+KAERI	TRANSX-2.15	ENDF/B-VI.5	1.39612	-0.74	1.32679	-0.81	1.24636	-0.88
		JENDL-3.2	1.40207	-0.32	1.33093	-0.51	1.24947	-0.63
Purdue Univ.	HELIOS-1.7	ENDF/B-VI.3	1.40850	0.14	1.34331	0.42	1.26339	0.48
JAERI	MVP	JENDL-3.2	1.41183	0.37	1.34635	0.65	1.26383	0.51
		JENDL-3.3	1.40710	0.04	1.33951	0.14	1.26209	0.38
SCK-CEN	MCNP-4C	ENDF/B-VI.5	1.40832	0.13	1.33572	-0.15	1.25555	-0.14
		JEF-2.2	1.41244	0.42	1.34299	0.40	1.25839	0.08
KAERI+NEA	MCNP-4B	ENDF60	1.40479	-0.13	1.33635	-0.10	1.25447	-0.23
		ENDF/B-VI.5	1.40726	0.05	1.33677	-0.07	1.25876	0.11
		JENDL-3.2	1.41239	0.41	1.34153	0.29	1.26109	0.30
		JEF-2.2	1.41129	0.34	1.34291	0.39	1.25959	0.18
KFKI	MCNP-4C	ENDF/B-VI.2	1.40430	-0.16	1.33519	-0.19	1.25339	-0.32
KI	MCU-REA	MCUDAT	1.40810	0.11	1.33650	-0.09	1.25490	-0.20
GRS	MCNP-4C	ENDF/B-VI.5	1.40690	0.02	1.33798	0.02	1.25859	0.10
		JENDL-3.2	1.41128	0.34	1.34267	0.37	1.26146	0.33
		JEF-2.2	1.41170	0.37	1.34391	0.46	1.26117	0.30
SEA	MCNP-4C	ENDF/B-VI	1.40570	-0.06	1.33530	-0.18	1.26570	0.66
AVERAGE*			**1.40656**		**1.33769**		**1.25737**	

*esclusi risultati La Sapienza

Per visualizzare in maniera migliore l'allineamento al valore medio del benchmark, si riportano i risultati della Tabella A.2 in grafici appositi per le tre differenti tipologie di pin di combustibile analizzate.

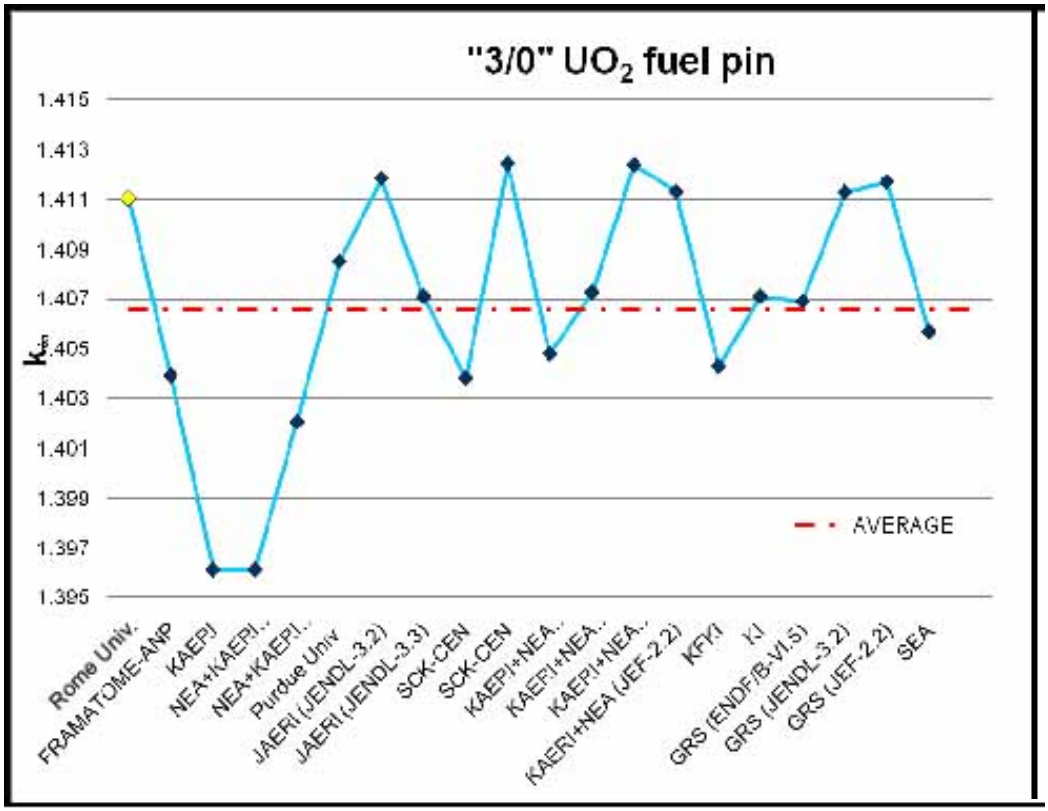

Figura A.3 – Confronto k_∞ pin di combustibile 3/0

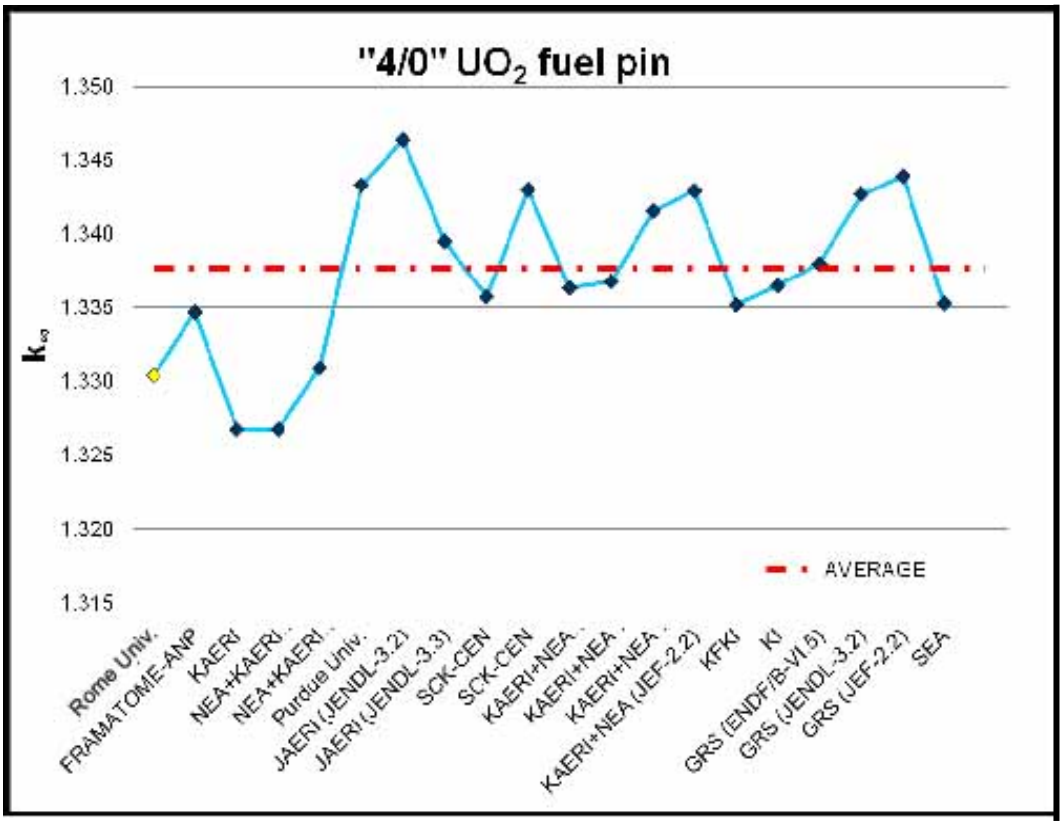

Figura A.4 – Confronto k_∞ pin di combustibile 4/0

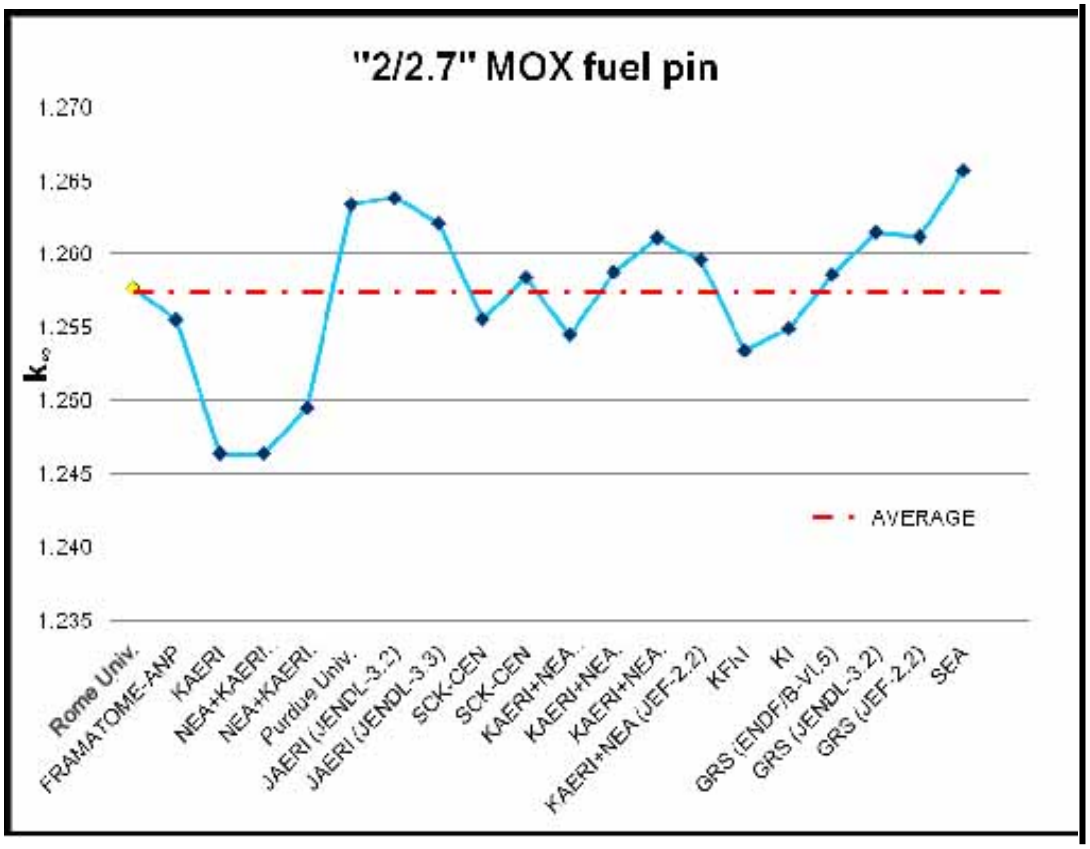

Figura A.5 – Confronto k_∞ pin di combustibile 2/2.7 (MOX)

Conclusioni sulla validazione del codice NEWT

I valori medi del k_∞ del benchmark sono 1.40656±0.00491 per il combustibile “3/0”, 1.33769±0.00556 per il combustibile “4/0” e 1.25737±0.00561 per il combustibile “2/2.7” (MOX), e la massima differenza tra i valori massimi e minimi è, rispettivamente, 1 632 pcm, 1 956 pcm e 1 934 pcm: rispetto ai valori medi del k_∞, questi valori rappresentano deviazioni dell’1.1% per il combustibile “3/0”, 1.5% per il combustibile “4/0” e 1.4% per il combustibile “2/2.7”.
I risultati conseguiti con il codice NEWT si allineano sia con gli altri codici deterministici, sia con i valori medi del k_∞ del benchmark, risultando per il combustibile “3/0” un valore di 1.41104 (+0.32% di deviazione dal valor medio, pari a +318 pcm), per il combustibile “4/0” un valore di 1.33035 (-0.55% di deviazione dal valor medio, pari a -550 pcm) e per il combustibile “2/2.7” un valore di 1.25771 (+0.03% di deviazione dal valor medio, pari a +27 pcm). Si può dunque concludere che il codice NEWT sia stato validato per i calcoli di cella.

APPENDICE B – Il codice di calcolo TRITON

Introduzione

Storicamente, le capacità di bruciamento nella "piattaforma" SCALE sono state disponibili attraverso la sequenza di calcolo SAS2, che utilizza un modello a due passi che realizza l'omogeneizzazione di materiali di una singola cella di pin di combustibile in un reticolo mono-dimensionale (1-D), e utilizza questa rappresentazione omogeneizzata all'interno di una rappresentazione di assembly 1-D più grande. Nel secondo passo, i flussi mediati di assembly sono utilizzati per pesare le sezioni d'urto di nuclide come sono collassate nel formato di ORIGEN-S.
Il modulo di controllo di TRITON (Transport Rigor Implemented with Time-dependent Operation of Neutronic bruciamento) è stato sviluppato per andare incontro alla "sfida" di realizzare calcoli per l'evoluzione del combustibile del reattore, fornendo caratteristiche e capacità che non erano disponibili quando SAS2 fu sviluppato. Infatti, è stato dimostrato come SAS2 sia in grado di fornire prestazioni molto buone per previsioni isotopiche per il burn-up del combustibile, rispetto a un semplice modello di trasporto bi-dimensionale, ma se si aumentano le complessità del design degli elementi di combustibile si va oltre le capacità di SAS2: TRITON è stato sviluppato per fornire una modellazione del trasporto migliorata e rigorosa per prevedere il burn-up di materiali nucleari in configurazioni che hanno una forte dipendenza su effetti bi-dimensionali. TRITON fornisce la capacità di eseguire indipendentemente calcoli di bruciamento per multipli materiali all'interno di un certo sistema, capacità non disponibile in SAS2.
TRITON è stato progettato usando l'approccio modulare che è una caratteristica che contraddistingue le funzionalità di SCALE. È stato costruito attorno al codice di trasporto bi-dimensionale 2-D alle ordinate discrete con geometria arbitraria NEWT, che permette di realizzare analisi di trasporto deterministiche rigorose per un'ampia varietà di tipi di problemi; comunque, TRITON è stato sviluppato per supportare l'inclusione di altre soluzioni del trasporto in sviluppi futuri.
Il modulo di controllo può essere usato per fornire processamenti automatizzati o "problem-dependent" di sezioni d'urto, seguiti da calcoli del fattore di moltiplicazione per un sistema bi-dimensionale. Inoltre, questa funzionalità può essere ripetuta insieme con i calcoli di bruciamento di ORIGEN-S per prevedere concentrazioni isotopiche, termini di sorgente e calore di decadimento come risultato di flussi varianti nel tempo calcolati in maniera deterministica bi-dimensionale. TRITON supporta il processamento di sezioni d'urto utilizzando i moduli BONAMI e NITAWL, ma permette anche un più rigoroso processamento usando CENTRM al posto di NITAWL.

In quanto modulo di controllo, TRITON serve come controllore della sequenzialità dei moduli, trasferimento di dati, e controllo input/output per sequenze di analisi multiple. Sei differenti sequenze di calcolo sono disponibili all'interno di TRITON: tre tipi di analisi che utilizzano BONAMI e NITAWL per il processamento di risonanze, e gli stessi tre tipi di analisi ma basati su un processamento con BONAMI e WORKER/CENTRM/PMC. La sequenza *t-xsec* è utilizzata per preparare una libreria di sezioni d'urto specifica per un problema per utilizzarla nell'analisi susseguente. La sequenza *t-newt* è stata progettata per automatizzare il processo di esecuzione dei calcoli del trasporto di NEWT preparando sezioni d'urto e dati di mixing table dalle specificazioni dei materiali standard di NEWT, impostando i dati di geometria di NEWT, e poi eseguendo NEWT. TRITON supporta anche calcoli di bruciamento e decadimento attraverso la sequenza *t-depl*, che realizza il processamento iterativo di sezioni d'urto, calcoli di trasporto 2-D, e calcoli di bruciamento per completare la storia del bruciamento/decadimento specificata dall'utente per le mixture specificate nel modello del trasporto.

Ogni sequenza disponibile con i moduli fornisce differenti funzionalità e quindi diversi percorsi del flusso attraverso il modulo. Nella Figura B.1 è riportato il diagramma di flusso della sequenza *t-depl*, che è stata quella utilizzata nell'input per i casi analizzati [12].

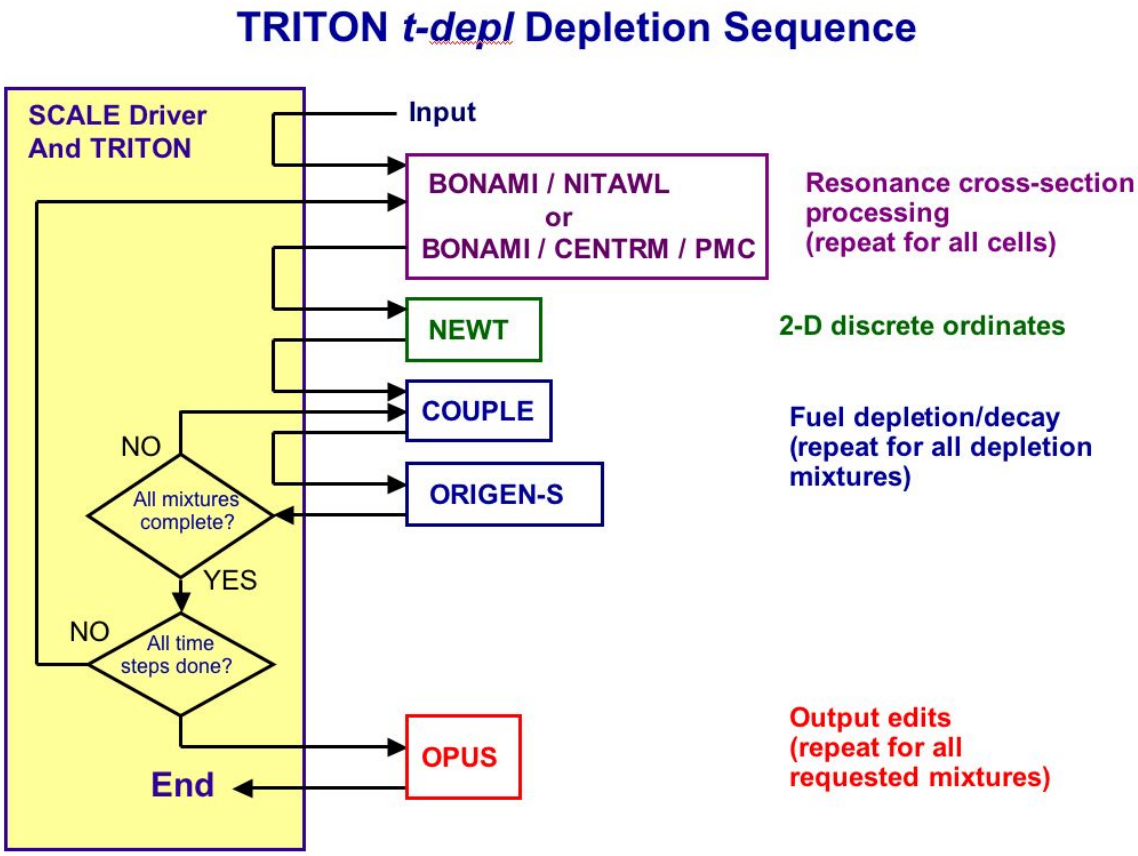

Figura B.1. – Diagramma di flusso della sequenza *t-depl* per i calcoli di bruciamento

Validazione del codice TRITON

Per la validazione del codice TRITON si è proceduto con un confronto nell'analisi di un singolo elemento di combustibile, con riferimento al modello proposto nel lavoro [13]: si tratta di un elemento di combustibile tipico di un reattore PWR in cui è disciolto nel refrigerante primario acido borico in una concentrazione di 650 ppm, e le sue caratteristiche sono riportate nella Tabella B.1.
I risultati di riferimento dello studio del fuel assembly sono stati effettuati con il codice di calcolo APOLLO2, e hanno portato a un burn-up di 29 000 MWd/tU.

Tabella B.1 - Caratteristiche del fuel assembly di riferimento

Tipo di elemento di combustibile	"17x17"
N. di barrette di combustibile UO_2	244
Arricchimento UO_2	4.9%
N. di barrette di combustibile UO_2+Gd_2O_3 (8%)	20
Arricchimento UO_2 negli assembly con Gd_2O_3	0.25%
N. di tubi guida in zircaloy	25
Diametro esterno barretta di combustibile	0.95 cm
Spessore della guaina	0.063 cm
Spessore interfaccia guaina-combustibile	0.002 cm
Lunghezza attiva del combustibile	260 cm
Passo tra barrette di combustibile	1.26 cm
Diametro esterno tubo guida	1.224 cm
Spessore tubo guida	0.04 cm
Concentrazione acido borico nel refrigerante	650 ppm

Partendo dai dati geometrici e dai materiali a disposizione, si è costruito l'input per il fuel assembly in questione per verificare i risultati forniti da TRITON, impostando la densità di potenza del MARS e le condizioni di riflessione sui quattro lati dell'elemento.

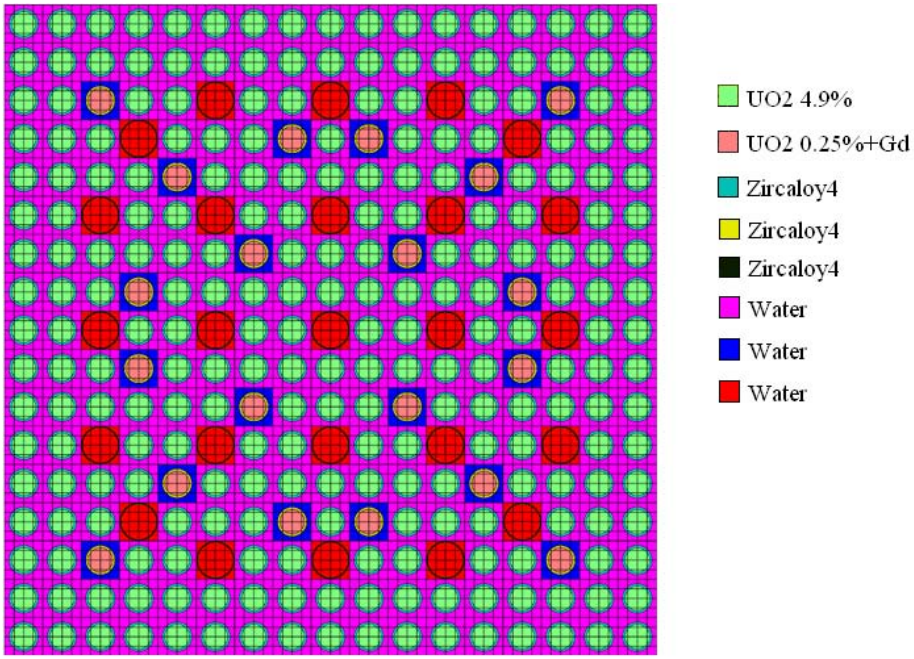

Figura B.2 – Rappresentazione del fuel assembly di riferimento in NEWT

Avendo considerato l'elemento di combustibile in geometria infinita, cioè con condizioni di riflessione sui quattro lati, si deve tener conto di un valore di leakage pari a 4 000 pcm: il risultato del burn-up del fuel assembly fornito da TRITON, che è stato dunque interrotto quando si giunge a un valore del k_∞ pari a 1.04, è di 30 035 MWd/tU, con una differenza del 3.6% rispetto al risultato fornito da APOLLO 2 (29 000 MWd/tU), il che rende valido l'uso del codice TRITON.

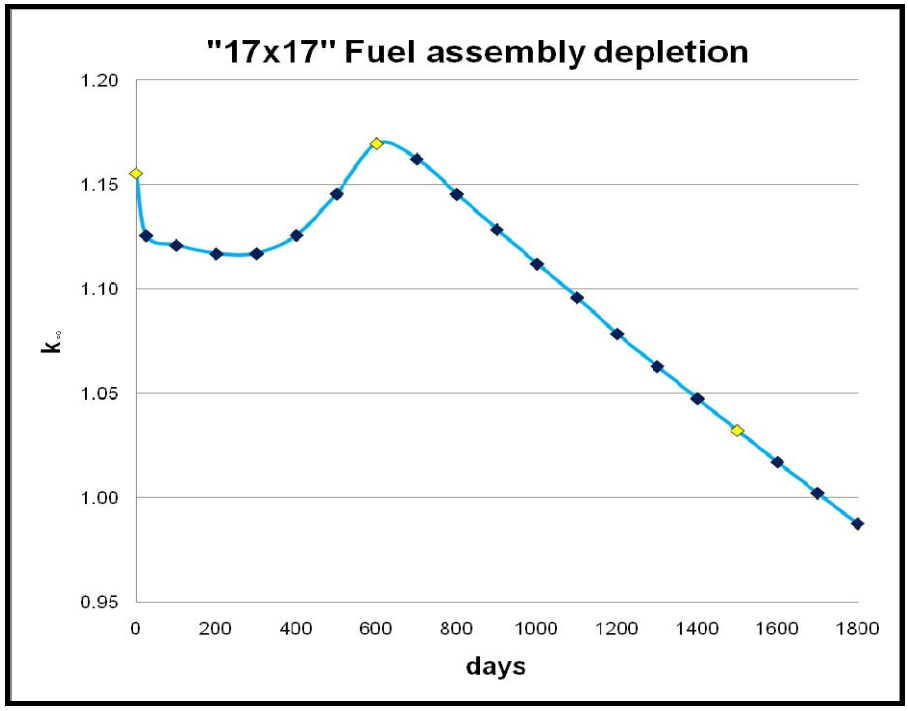

Figura B.3 – Andamento del k_∞ nel burn-up del fuel assembly di riferimento

Tabella B.2 – Evoluzione k_∞ nel fuel assembly "17x17" per il confronto APOLLO2/TRITON

Days	k_∞
0	1.155536
25	1.125687
100	1.120954
200	1.116894
300	1.117012
400	1.125839
500	1.145705
600	1.169681
700	1.162417
800	1.145536
900	1.128549
1 000	1.112096
1 100	1.095919
1 200	1.078500
1 300	1.062933
1 400	1.047469
1 500	1.032168
1 600	1.017057
1 700	1.002192
1 800	0.987489

Conclusioni sulla validazione dei codici NEWT e TRITON

Il confronto con il benchmark internazionale di VENUS-2 ha dimostrato la validità del codice NEWT grazie all'allineamento dei risultati con il valor medio e con i risultati degli altri codici deterministici.

Il confronto del codice TRITON con il codice APOLLO2 mostra una contenuta differenza nei risultati (3.6%), probabilmente dovuta a diversi valori delle concentrazioni dei materiali utilizzati; c'è da sottolineare, inoltre, che il confronto con il codice APOLLO2 è stato effettuato per verificare l'allineamento dei risultati ottenuti con TRITON con un codice già utilizzato in passato per calcoli sul reattore MARS.

APPENDICE C – Tabelle

Tabella C.1 – Evoluzione k_∞ nel fuel assembly "17x17" con boro disciolto e 4.9%+20Gd rods

Days	k_∞
0	1.1970
100	1.1618
300	1.1501
500	1.1487
700	1.1658
900	1.1867
1100	1.1638
1300	1.1351
1500	1.1064
1700	1.0781
1900	1.0501
2100	1.0224
2300	0.9952
2500	0.9684
2700	0.9423

Tabella C.2 – Evoluzione k_∞ nel fuel assembly "17x17" senza boro disciolto e 4.9%+20Gd rods

Days	k_∞
0	1.2496
100	1.2111
300	1.1984
500	1.1981
700	1.2196
900	1.2447
1100	1.2203
1300	1.1903
1500	1.1603
1700	1.1306
1900	1.1011
2100	1.0718
2300	1.0427
2500	1.0141
2700	0.9861

Tabella C.3 – Evoluzione k_∞ nel fuel assembly "17x17" senza boro disciolto e 4.9%+32Gd rods

Days	k_∞
0	1.1293
100	1.1027
300	1.1055
500	1.1298
700	1.1904
900	1.2306
1100	1.2111
1300	1.1809
1500	1.1510
1700	1.1215
1900	1.0922
2100	1.0631
2300	1.0322
2500	1.0061
2700	0.9785

Tabella C.4 – Evoluzione k_∞ nel fuel assembly "10x10" 3.0%+4Gd rods

Days	k_∞
0	1.1629
25	1.1264
100	1.1222
200	1.1176
300	1.1225
400	1.1390
500	1.1443
600	1.1250
700	1.1044
800	1.0847
900	1.0662
1000	1.0484
1100	1.0313
1200	1.0148
1300	0.9989
1400	0.9836
1500	0.9691
1600	0.9551
1700	0.9418
1800	0.9291

Tabella C.5 – Evoluzione k_∞ nel fuel assembly "10x10" 4.0%+4Gd rods

Days	k_∞
0	1.1629
25	1.1264
100	1.1222
200	1.1176
300	1.1225
400	1.1390
500	1.1443
600	1.1250
700	1.1044
800	1.0847
900	1.0662
1000	1.0484
1100	1.0313
1200	1.0148
1300	0.9989
1400	0.9836
1500	0.9691
1600	0.9551
1700	0.9418
1800	0.9291

Tabella C.6 – Evoluzione k_∞ nel fuel assembly "10x10" 4.5%+8Gd rods

Days	k_∞
0	1.1360
25	1.1084
100	1.1085
200	1.1120
300	1.1240
400	1.1489
500	1.1843
600	1.2025
700	1.1894
800	1.1715
900	1.1539
1000	1.1371
1100	1.1207
1200	1.1048
1300	1.0893
1400	1.0741
1500	1.0591
1600	1.0446
1700	1.0303
1800	1.0164
1900	1.0027
2000	0.9894

Tabella C.7 – Evoluzione k_∞ nel fuel assembly "10x10" 4.9%+8Gd rods

Days	k_∞
0	1.1596
25	1.1319
100	1.1304
200	1.1318
300	1.1399
400	1.1591
500	1.1875
600	1.2125
700	1.2067
800	1.1900
900	1.1729
1000	1.1562
1100	1.1403
1200	1.1247
1300	1.1095
1400	1.0945
1500	1.0798
1600	1.0654
1700	1.0513
1800	1.0375
1900	1.0239
2000	1.0106
2100	0.9976

Tabella C.8 – Evoluzione k_∞ nel fuel assembly "10x10" 4.9%+12Gd rods

Days	k_∞
0	1.0781
25	1.0552
100	1.0581
200	1.0647
300	1.0776
400	1.1026
500	1.1390
600	1.1825
700	1.1960
800	1.1829
900	1.1662
1000	1.1497
1100	1.1337
1200	1.1181
1300	1.1029
1400	1.0880
1500	1.0734
1600	1.0590
1700	1.0450
1800	1.0312
1900	1.0177
2000	1.0045
2100	0.9915

Tabella C.9 – Evoluzione k_∞ nel fuel assembly "10x10" 5.5%+12Gd rods

Days	k_∞
0	1.1117
25	1.0884
100	1.0891
200	1.0930
300	1.1011
400	1.1185
500	1.1456
600	1.1808
700	1.2084
800	1.2054
900	1.1906
1000	1.1747
1100	1.1592
1200	1.1441
1300	1.1294
1400	1.1149
1500	1.1006
1600	1.0866
1700	1.0728
1800	1.0593
1900	1.0460
2000	1.0329
2100	1.0200
2200	1.0074
2300	0.9949

Tabella C.10 – Evoluzione k_∞ nel fuel assembly "10x10" 5.5%+16Gd rods

Days	k_∞
0	1.0286
25	1.0100
100	1.0153
200	1.0253
300	1.0406
400	1.0670
500	1.1059
600	1.1560
700	1.1966
800	1.1971
900	1.1827
1000	1.1669
1100	1.1515
1200	1.1364
1300	1.1217
1400	1.1072
1500	1.0930
1600	1.0790
1700	1.0653
1800	1.0519
1900	1.0386
2000	1.0255
2100	1.0127
2200	1.0001
2300	0.9878

Tabella C.11 – Evoluzione k_∞ nel fuel assembly "10x10" 6.0%+16Gd rods

Days	k_∞
0	1.0547
25	1.0357
100	1.0393
200	1.0470
300	1.0588
400	1.0795
500	1.1111
600	1.1521
700	1.1957
800	1.2100
900	1.2000
1000	1.1850
1100	1.1700
1200	1.1553
1300	1.1409
1400	1.1268
1500	1.1129
1600	1.0993
1700	1.0858
1800	1.0725
1900	1.0595
2000	1.0467
2100	1.0340
2200	1.0215
2300	1.0092
2400	0.9971

Tabella C.12 – Evoluzione k_{eff} core "B-1"

Days	K_{eff}
0	1.1145
25	1.0880
100	1.0860
200	1.0872
300	1.0947
400	1.1134
500	1.1423
600	1.1718
700	1.1697
800	1.1543
900	1.1381
1000	1.1221
1100	1.1064
1200	1.0912
1300	1.0761
1400	1.0612
1500	1.0465
1600	1.0318
1700	1.0173
1800	1.0029
1900	0.9887