

**Titolo**

**Verifiche neutroniche relative a due modelli di nocciolo per reattore PWR con gestione del combustibile a 4 cicli di ricarica ed a ciclo unico di irraggiamento**

Ente emittente CIRTEN

**PAGINA DI GUARDIA****Descrittori**

**Tipologia del documento:** Rapporto Tecnico/Technical Report

**Collocazione contrattuale:** ENEA-MSE Agreement

**Argomenti trattati:** Reattori nucleari ad acqua / Light Water Reactors

**Sommario**

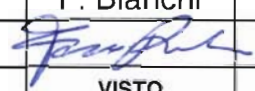
In questo lavoro viene presentato lo studio neutronico di un nocciolo per impianto nucleare modulare, ad acqua leggera in pressione, con potenza termica pari a 600 MW. Lo studio ha permesso di individuare due opzioni ottimali per la strategia di gestione del combustibile che si adattano alle esigenze dei più diversi mercati energetici.

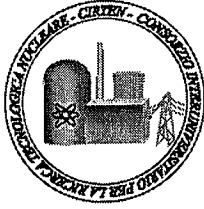
**Note**

**Autori:** Salvatore Caterino, Massimo Frullini, Augusto Gandini, Antonio Naviglio

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	26/01/09	NOME		F. Bianchi	
			FIRMA	NA		NA
REV.	DESCRIZIONE	DATA		CONVALIDA	VISTO	APPROVAZIONE



**CIRTEN**  
**CONSORZIO INTERUNIVERSITARIO**  
**PER LA RICERCA TECNOLOGICA NUCLEARE**

**UNIVERSITA' DI ROMA "LA SAPIENZA"**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ELETTRICA**

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI  
NOCCILO PER REATTORE PWR CON GESTIONE DEL  
COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

**AUTORI**

**Salvatore Caterino**

**Massimo Frullini**

**Augusto Gandini**

**Antonio Naviglio**

**CERSE-UNIROMA1 RL-1152/2008**

**Roma, Dicembre 2008**

*Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP2 punto U dell'AdP ENEA MSE del 21/06/07,*

**Tema 5.2.5.8 – "Nuovo Nucleare da Fissione"**

[PAGINA BIANCA]

## PREMESSA

Negli ultimi anni, a livello internazionale, si registra un rinnovato interesse per lo studio e la ricerca di soluzioni progettuali in grado di aprire un possibile mercato alla commercializzazione di impianti nucleari di media e piccola taglia.

Storicamente nei paesi sviluppati la tendenza dell'industria sia convenzionale che nucleare ha portato a costruire impianti per la produzione di energia elettrica sempre più grandi e centralizzati: pochi poli, posizionati nel centro di gravità dei consumi, producono l'energia di cui il paese ha necessità. Impianti di grande potenza, spesso costruiti in più unità per singolo sito, hanno permesso fino ad oggi di ridurre i costi di costruzione ed esercizio definendo così un fattore di scala ottimale alla minimizzazione dei costi del KWh prodotto.

Diversa è invece la situazione per i paesi emergenti o in via di sviluppo: si pensi ai paesi dell'area araba o africana. Per essi, spesso, la situazione è quella di un vasto territorio privo di infrastrutture per la fornitura di servizi (primo tra tutti l'acqua potabile) e con reti di distribuzione dell'energia elettrica sottodimensionati rispetto ai crescenti consumi. Per tali paesi risulta quindi non praticabile la soluzione di centralizzare la produzione di energia. In questo caso, la soluzione più razionale potrebbe essere costituita da piccoli impianti modulari in grado di adattare la produzione di energia elettrica alle richieste della regione di interesse e capaci, nel contempo, di fornire anche acqua potabile da dissalazione.

Tuttavia altri aspetti fanno vedere con fiducia alla possibilità di utilizzare impianti nucleari di piccola taglia anche per i mercati energetici dei paesi sviluppati:

- la modularità permette di abbassare ulteriormente i costi di costruzione on-site: l'impianto può essere in gran parte costruito in fabbrica e, successivamente, assemblato in cantiere con notevole riduzione di costi e tempi;
- investimento di capitali inferiore durante la costruzione dell'impianto con conseguente riduzione del rischio finanziario;
- incremento dei fattori di sicurezza: reattori di piccola taglia hanno, tipicamente, coefficienti di potenza fortemente negativi.

In questo lavoro viene presentato lo studio neutronico di un nocciolo per impianto nucleare modulare, ad acqua leggera in pressione, con potenza termica pari a 600 MW. Lo studio ha permesso di individuare due opzioni ottimali per la strategia di gestione del combustibile che si adattano alle esigenze dei più diversi mercati energetici.

[PAGINA BIANCA]

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

**SOMMARIO**

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE GENERALI DEL NOCCIOLO</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA E CRITERI BASE DI PROGETTO</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>IL SISTEMA DI CALCOLO SAPHYR DEL CEA</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>ANALISI DI ASSEMBLY CON IL CODICE APOLLO2</b>	<b>26</b>
5.1	PARAMETRI COINVOLTI NELLA PROGETTAZIONE DEL NOCCIOLO	29
5.1.1	Parametri geometrici	29
5.1.2	Assunzioni per la gestione del combustibile	29
5.1.3	Parametri fisici	29
5.2	ASSEMBLY SENZA BARRETTE DI VELENI BRUCIABILI	31
5.2.1	Analisi dei risultati	31
5.2.2	Conclusioni	34
5.3	ASSEMBLY CON BARRETTE DI VELENI BRUCIABILI	36
5.3.1	Analisi dei risultati	38
5.3.2	Coefficienti neutronici: risultati	46
5.3.3	Efficienza delle barre di controllo	49
5.3.4	Valutazione della reattività tra gli stati HFP e CZP	55
5.3.5	Conclusioni	57
<b>6</b>	<b>ANALISI DEL NOCCIOLO DI EQUILIBRIO CON CRONOS2</b>	<b>58</b>
6.1	OBIETTIVI PER LO STUDIO DEL NOCCIOLO DI EQUILIBRIO	58
6.2	GESTIONE DEL NOCCIOLO A 4 CICLI DI RICARICA: ANALISI DEL CORE	60
6.2.1	Distribuzione di potenza radiale a BOC e EOC	63
6.2.2	Distribuzione radiale del burn-up nel nocciolo a BOC ed EOC	64
6.2.3	Concentrazione di boro critica	66
6.2.4	Coefficienti neutronici	66
6.2.4.1	Coefficienti neutronici in condizioni isoterme	67
6.2.4.2	Coefficienti neutronici in condizioni operative	68
6.2.5	Margini di shutdown del nocciolo calcolati allo stato hot zero power (HZP)	72
6.2.6	Conclusioni	75
6.3	GESTIONE DEL NOCCIOLO A CICLO UNICO: ANALISI DEL CORE	76
6.3.1	Distribuzione di potenza radiale a BOI ed EOI	77
6.3.2	Distribuzione radiale del burn-up ad EOI	78
6.3.3	Fattori di picco Fq, Fxy e Fz ed axial offset (AO) nel nocciolo	79
6.3.4	Concentrazione di boro critica	81
6.3.5	Coefficienti neutronici	82
6.3.5.1	Coefficienti neutronici in condizioni isoterme	82
6.3.5.2	Coefficienti neutronici in condizioni operative	82
6.3.6	Margini di shutdown del nocciolo calcolati allo stato hot zero power (HZP)	86
6.3.7	Conclusioni	88
<b>7</b>	<b>APPENDICE A: coefficienti neutronici</b>	<b>89</b>

## Lista delle Figure

Figura 1 - Sezione dell'elemento di combustibile con matrice 17 x 17	15
Figura 2 - Tipologie di assembly con varie distribuzioni di veleni bruciabili	19
Figura 3 - Diagramma di flusso dei codici di calcolo utilizzati	25
Figura 4 - Variazione del difetto di reattività con il burn-up	34
Figura 5 - Concentrazioni di boro a differenti arricchimenti di $U_{235}$	35
Figura 6 - Variazione del $K_{-Inf}$ in funzione del tempo con differenti numeri di barrette di gadolinio	44
Figura 7 - Variazione del $K_{-Inf}$ in funzione del burn-up con differenti numeri di barrette di gadolinio	45
Figura 8 - Core a 4 cicli di ricarica: mappa di caricamento ( <sup>a</sup> RCCA attivi, <sup>p</sup> RCCA passivi)	60
Figura 9 - Nocciolo con riflettore radiale costituito da strato di acqua	62
Figura 10 - Nocciolo con riflettore radiale in acciaio	62
Figura 11 - Core a 4 cicli di ricarica: distribuzione della potenza radiale a BOC	63
Figura 12 - Core a 4 cicli di ricarica: distribuzione della potenza radiale ad EOC	64
Figura 13 - Core a 4 cicli di ricarica: distribuzione di burn-up radiale a BOC	65
Figura 14 - Core a 4 cicli di ricarica: distribuzione di burn-up radiale ad EOC	65
Figura 15 - Core a 4 cicli: concentrazione di boro critica	66
Figura 16 - Core a 4 cicli: coefficienti neutronici a BOI e Xe all'equilibrio	69
Figura 17 - Core a 4 cicli: coefficienti neutronici a EOI e Xe all'equilibrio	70
Figura 18 - Core a 4 cicli: coefficienti neutronici a BOI in assenza di Xe	70
Figura 19 - Core a 4 cicli: coefficienti neutronici a EOI in assenza di Xe	71
Figura 20 - Core a 4 cicli: coefficienti neutronici in funzione del burn-up	71
Figura 21 - Core a ciclo unico di ricarica: mappa di caricamento ( <sup>a</sup> RCCA attivi, <sup>p</sup> RCCA passivi)	76
Figura 22 - Core a ciclo unico: distribuzione radiale di potenza a BOI	78
Figura 23 - Core a ciclo unico: distribuzione radiale di potenza a EOI	78
Figura 24 - Core a ciclo unico: distribuzione radiale di burn-up ad EOI	79
Figura 25 - Core a ciclo unico: $F_q$ , $F_{xy}$ , $F_z$ ed axial offset	80
Figura 26 - Core a ciclo unico di ricarica: concentrazione di boro critica	81
Figura 27 - Core a ciclo unico: coefficienti neutronici a BOI e Xe all'equilibrio	83
Figura 28 - Core a ciclo unico: coefficienti neutronici a EOI e Xe all'equilibrio	83
Figura 29 - Core a ciclo unico: coefficienti neutronici a BOI in assenza di Xe	84
Figura 30 - Core a ciclo unico: coefficienti neutronici a EOI in assenza di Xe	84
Figura 31 - Core a ciclo unico: coefficienti neutronici in funzione del burn-up	85

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

## Lista delle Tabelle

Tabella 1 - Caratteristiche generali del nocciolo	14
Tabella 2 - Lunghezza di ciclo con vari arricchimenti di $UO_2$ nel combustibile per differenti strategie di caricamento	33
Tabella 3 - Guadagno di reattività con differenti arricchimenti dell' $U^{235}$ nel combustibile per differenti strategie di caricamento	33
Tabella 4 - Lunghezza di ciclo per assembly con diversi numeri di barrette di veleni per differenti strategie di caricamento	40
Tabella 5 - Burn-up e lunghezza di ciclo: caso senza veleni bruciabili	40
Tabella 6 - Lunghezza di ciclo per differenti arricchimenti di $UO_2$ nelle barrette di veleno bruciabile per differenti strategie di caricamento	41
Tabella 7 - Lunghezza di ciclo per differenti frazioni di gadolinio nelle barrette di veleno per differenti strategie di caricamento	43
Tabella 8 - Impatto sulla reattività dovuto a variazione del numero di barrette di veleni bruciabili per differenti strategie di caricamento	43
Tabella 9 - Impatto sulla reattività dovuto a variazione dell'arricchimento dell' $UO_2$ nelle barrette di veleno bruciabile	44
Tabella 10 - Coefficienti neutronici: assembly senza barrette di veleno bruciabile	47
Tabella 11 - Coefficienti neutronici: assembly con barrette di veleno bruciabile	48
Tabella 12 - Efficienza delle barre di controllo per assembly con 20 barrette di veleni bruciabili	53
Tabella 13 - Efficienza delle barre di controllo nel nocciolo con 45 RCCA	53
Tabella 14 - Efficienza delle barre di controllo nel nocciolo con 36 RCCA	53
Tabella 15 - Fattore di picco nell'assembly con 20 barrette di veleni bruciabili	54
Tabella 16 - Fattore di picco nell'assembly con 32 barrette di veleni bruciabili	55
Tabella 17 - Reattività totale inserita nel nocciolo durante la transizione HFP-CZP	56
Tabella 18 - Definizione delle condizioni operative per il nocciolo	59
Tabella 19 - Core a 4 cicli: coefficienti neutronici in condizioni isoterme	68
Tabella 20 - Core a 4 cicli: margini di shutdown ad HZP con 36 RCCA attive	74
Tabella 21 - Core a 4 cicli: margini di shutdown ad HZP con 45 RCCA attive	74
Tabella 22 - Core a 4 cicli: margini di shutdown ad CZP con 45 RCCA attive	74
Tabella 23 - Core a ciclo unico di ricarica: coefficienti neutronici in condizioni isoterme	82
Tabella 24 - Nocciolo a ciclo unico: margini di shutdown ad HZP con 36 RCCA attive	87
Tabella 25 - Nocciolo a ciclo unico: margini di shutdown ad HZP con 45 RCCA attive	87
Tabella 26 - Nocciolo a ciclo unico: margini di shutdown ad CZP con 45 RCCA attive	87



**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

## Acronimi

ACRONIMO	DESCRIZIONE
BOC	Beginning Of Cycle
BOI	Beginning Of Irradiation
CZP	Cold Zero Power
DNB	Departure from Nucleate Boiling
DNBR	Departure from Nucleate Boiling Ratio
EFPD	Effective Full Power Day
EFPY	Effective Full Power Year
EOC	End Of Cycle
EOI	End Of Irradiation
HFP	Hot Full Power
HZP	Hot Zero Power
IZP	Intermediate Zero Power
PWR	Pressurized Water Reactor
RCCA	Reactivity Control Cluster Assembly

# VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO DI IRRAGGIAMENTO

## 1 INTRODUZIONE

La rapida scalata economica di nuovi paesi emergenti nel panorama internazionale sta conducendo ad un'esponenziale impennata dei consumi energetici mondiali. La ricerca di sistemi in grado di fornire energia, con costi accettabili, anche a paesi privi di robuste reti di distribuzione dell'energia elettrica e di infrastrutture per la fornitura di servizi, apre la via alla possibilità di mercato per impianti nucleari di piccola e media potenza.

Difatti, la possibilità di avere sistemi in grado di fornire localmente a ristrette aree urbane sia energia elettrica sia servizi aggiuntivi rappresenta la risposta al problema di approvvigionamento di molti paesi dell'area medio-orientale, dell'estremo oriente e del continente africano. Tale tipo di problematica inoltre, su scala ridotta, è tipica di comunità insediate in regioni estremamente remote come nel caso dell'area siberiana.

Ci sono tuttavia altri fattori che attualmente fanno vedere con interesse alla possibilità di sviluppo commerciale di reattori di piccola potenza.

Un impianto modulare costituisce infatti un sistema flessibile, in grado di potersi adattare agevolmente a variazioni nella domanda grazie ad espansioni incrementali della propria potenza.

Inoltre va considerato che, diversamente dai grandi impianti nucleari di potenza (con unità da 1000 MW elettrici o superiori), un impianto di piccola taglia permette contestualmente di ridurre gli investimenti richiesti per la costruzione minimizzando così i rischi finanziari connessi.

Nel caso dei paesi in via di sviluppo quindi la limitata capacità di investimento fa sì che l'unica possibilità di produzione di energia elettrica da fonte nucleare debba passare obbligatoriamente attraverso sistemi a piccola o media potenza. Tuttavia per tali paesi, collocati, spesso, in aree a forte instabilità geopolitica, gli impianti devono poter incorporare sistemi a garanzia contro il rischio di proliferazione nucleare: il paese acquisisce il diritto di sfruttare l'energia prodotta dal reattore ma non la tecnologia relativa alla sua realizzazione.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Per tali paesi inoltre, alla necessità di produrre energia elettrica tipicamente si unisce la necessità dei servizi primari come l'acqua potabile. Un impianto nucleare di piccola taglia cogenerativo potrebbe quindi costituire il target ideale per questo tipo di mercato.

In questo lavoro viene presentato lo studio parametrico del nocciolo di un reattore ad acqua leggera in pressione con una potenza termica di circa 600 MW (pari a 220 MWe) con architettura fortemente semplificata. Sono stati individuati due strategie ottimali per il caricamento del combustibile che portano a due soluzioni progettuali differenti concepite per i due diversi target commerciali:

- strategia a 4 cicli di ricarica per massimizzare lo sfruttamento del combustibile. Tale soluzione è pensata per paesi in aree a basso rischio geopolitico e con alta capacità di gestire in sicurezza tecnologie nucleari: l'obiettivo è quello di proporre un impianto nucleare modulare ad alta efficienza.
- strategia a ciclo unico di ricarica. Tale soluzione è pensata per paesi in aree ad alto rischio geopolitico e con bassa capacità di gestire in sicurezza tecnologie nucleari: l'obiettivo è quello di proporre un impianto nucleare con contratti di "leasing" del combustibile ovvero dell'energia elettrica prodotta. Viene trasferito il know-how relativo alla gestione dell'impianto in totale sicurezza ma non vengono trasferite informazioni relative alla progettazione.

Lo studio neutronico che ha condotto ad identificare i due modelli di caricamento di riferimento è stato ottenuto per mezzo di due fasi intermedie.

Nella prima fase l'analisi è stata condotta su un sistema ridotto: è stato studiato esclusivamente l'elemento di combustibile che è stato ipotizzato a geometria infinita. Dopo aver identificato tutte le variabili che caratterizzano l'assembly e definito il campo di variabilità per tali grandezze, è stata elaborata una dettagliata analisi parametrica.

All'analisi ha fatto poi seguito uno studio di sensitività per identificare le correlazioni esistenti tra le diverse caratteristiche che identificano gli elementi di combustibile presi in considerazione. Sono stati considerati diversi scenari relativi all'arricchimento dell' $UO_2$  nel

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

combustibile, alle caratteristiche dei veleni bruciabili e alla concentrazione di boro richiesta nel moderatore per il controllo di reattività.

Nella seconda fase invece, è stato condotto lo studio neutronico in diffusione sull'intero nocciolo: è stata calcolata la lunghezza di vita complessiva del reattore, il burn-up per singola assembly ed il burn-up medio allo scarico, la distribuzione di potenza nel nocciolo. Infine sono stati valutati i margini di sicurezza per lo spegnimento del reattore.

## **2 CARATTERISTICHE GENERALI DEL NOCCIOLO**

---

In generale la progettazione neutronica di un nocciolo si presenta come un problema combinatorio a moltissime variabili: il progettista deve saper valutare l'influenza di tutte le variabili che contribuiscono alla definizione del modello ottimale in termini di efficienza, sicurezza, gestione del combustibile, manutenzione e costi. Inoltre il dimensionamento di un nocciolo nasce dal rispetto di diverse esigenze spesso contrastanti espresse dai simultanei progetti termico, idraulico, nucleare e tecnologico. La soluzione va quindi ottenuta come ricerca di compromesso tra tutte le variabili di progetto.

Il nocciolo di riferimento, oggetto di questo studio, è costituito da 89 elementi di combustibile. Le assembly presentano barrette di combustibile con guaine realizzate in zircalloy IV: le barrette sono organizzate secondo una disposizione con matrice 17x17. Nel complesso l'elemento di combustibile include 264 barrette di combustibile e 25 ulteriori posizioni che sono disponibili per i tubi guida delle barre di controllo, delle barrette di veleni bruciabili o delle eventuali sorgenti neutroniche. Il tubo al centro dell'elemento di combustibile alloggia la strumentazione <sup>1</sup>. Nella *Fig. 1* viene presentata una sezione dell'assembly con matrice 17 x 17 senza considerare la distribuzione delle barrette di veleni bruciabili.

Il nocciolo è refrigerato e moderato con acqua leggera in pressione (PWR) contenente boro in soluzione per il controllo omogeneo della reattività. In particolar modo il boro ed i veleni bruciabili collocati in speciali barrette<sup>2</sup> inserite nell'assembly hanno lo scopo di compensare l'eccesso di reattività ad inizio vita e durante i cicli di irraggiamento.

Per lo spegnimento del reattore è previsto l'utilizzo di un doppio sistema di barre di controllo.

Il primo sistema è attivo (con 36 cluster di barre di controllo, RCCS) e presenta caratteristiche costruttive tipiche di quelli previsti per i reattori PWR standard: il sistema è movimentato da attuatori elettromeccanici.

Il secondo sistema invece è passivo (con 9 RCCS): le barre vengono rilasciate per gravità nel nocciolo mediante un meccanismo che aziona lo sgancio semplicemente quando la temperatura

---

<sup>1</sup> Nel modello simulato dell'assembly il tubo centrale alloggia una barretta di combustibile.

<sup>2</sup> 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 UO<sub>2</sub>.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

del refrigerante raggiunge un prefissato valore: l'energia richiesta per il meccanismo di sgancio è quella rilasciata esclusivamente dall'espansione termica dei materiali.

Gli obiettivi di progetto possono essere sintetizzati principalmente nei seguenti punti:

- Potenza termica prodotta in condizioni nominali pari a 600 MW;
- Possibilità di implementare due modelli di caricamento:
  - un ciclo multiplo di irraggiamento, con reshuffling degli elementi di combustibile ad ogni ricarica al fine di massimizzare lo sfruttamento del combustibile
  - un ciclo unico di irraggiamento ad elevato bruciamento con l'obiettivo di estendere la vita del reattore senza richiedere tuttavia il reshuffling del combustibile
- Utilizzazione di un solo tipo di assembly nel modello di nocciolo di riferimento prescelto (sia nel caso di ciclo multiplo che nel caso di ciclo unico di irraggiamento)<sup>3</sup>.
- Densità lineare di potenza per la barretta di combustibile ( $q'$ ) collocata nel punto di "hot spot" inferiore a 590 W/cm in ogni condizione operativa: in questo modo è possibile avere un considerevole margine rispetto al valore limite per l'integrità della barretta (755 W/cm).

I dati iniziali di progetto del nocciolo oggetto di questo studio sono riportati in sintesi nella *Tab. 1*.

---

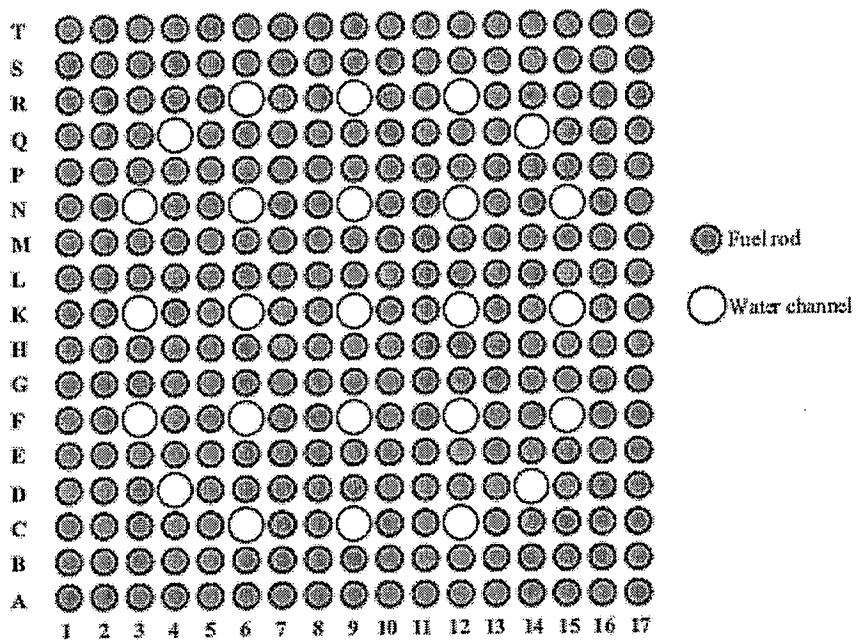
<sup>3</sup> Tale obiettivo nasce da due considerazioni. Da un lato, nel caso di utilizzo del ciclo multiplo di irraggiamento, la presenza nel nocciolo di assembly dello stesso tipo semplifica la gestione della sequenza di reshuffling del combustibile. Dall'altro standardizzare un componente riduce ovviamente i costi di costruzione.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

*Tabella 1 - Caratteristiche generali del nocciolo*

Potenza termica	600 MW <sub>th</sub>
Tipo di combustibile	UO <sub>2</sub>
N. di elementi di combustibile	89
N. di barrette per assembly	289 (17x17)
N. di barrette di combustibile per assembly	264
N. di tubi guida in zircalloy per RCCS	25 (A1C, B4C)
Temperatura d'ingresso del moderatore	214 °C
Temperatura d'uscita del moderatore	254 °C
Pressione media primario	75 bar
Densità di potenza lineare media nel nocciolo	98.2 W/cm
Flusso termico medio nel nocciolo	32.9 W/cm <sup>2</sup>
Densità di potenza media nel nocciolo	56.61 kW/l
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 RCCS	1.224 cm
Spessore tubo guida RCCS	0.04 cm
Diametro barra di controllo	0.978 cm
Superficie di scambio termico del nocciolo	1823 m <sup>2</sup>
Entalpia ingresso / uscita	917.9 / 1105.3 kJ/kg
Portata del refrigerante	3227 kg/s a 214 °C e 75 bar
Frazione della portata attiva nel nocciolo (%)	93,5

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**



*Figura 1 - Sezione dell'elemento di combustibile con matrice 17 x 17*



### **3 METODOLOGIA E CRITERI BASE DI PROGETTO**

---

Lo studio neutronico del nocciolo è stato strutturato secondo tre fasi successive. Dapprima viene analizzato nel dettaglio il comportamento dell' elemento di combustibile al variare dei parametri che lo caratterizzano.

Nella seconda fase sono state valutate preliminarmente le caratteristiche dei noccioli ipotizzando differenti modelli di caricamento del combustibile.

Infine, nella terza fase, dopo aver individuato i modelli di nocciolo con caratteristiche più promettenti (in termini di efficienza, gestione in fase di refuelling e sicurezza) è stato elaborato lo studio di dettaglio.

#### **1. Studio dell'elemento di combustibile in geometria infinita**

L'obiettivo è innanzitutto quello di realizzare uno studio parametrico dell'assembly in geometria infinita, valutando diverse soluzioni nella scelta dei parametri fisici.

Vengono considerati diversi modelli di assembly con differenti arricchimenti per l'  $UO_2$  nelle barrette di combustibile e considerando, contestualmente, la possibilità di poter variare composizione e numero delle barrette di veleni bruciabili. In *Fig. 2* sono riportate le sezioni dei diversi modelli delle assembly analizzate in questo studio, differenziate per numero di barrette di veleni bruciabili.

L'analisi dell' assembly così condotta permetterà poi di ottenere informazioni generali sul comportamento dell' intero nocciolo, sebbene in modo approssimato, prima ancora di dover eseguire un'intera procedura di calcolo sul modello completo. In questo modo l'analisi parametrica sull' elemento di combustibile costituisce uno strumento per poter stabilire quali siano le caratteristiche generali attese globalmente per il nocciolo.

# VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO DI IRRAGGIAMENTO

In coda all'analisi parametrica viene eseguita un'analisi di sensitività per stabilire l'interconnessione tra le singole variabili che caratterizzano le varie configurazioni degli elementi di combustibile presi in esame.

Le caratteristiche geometriche di tutte le assembly considerate in questo studio sono quelle tipiche di un PWR, con matrice standard  $17 \times 17$ . Alcuni dati caratteristici sono riportati in *Tab. 1*.

Le valutazioni oggetto di questo studio prendono in esame il burn-up, la lunghezza di ciclo ed i coefficienti neutronici.

## 2. Calcoli preliminari sul nocciolo allo stato di equilibrio sulla base dell'analisi parametrica

In questa seconda parte dello studio sono stati confrontati diversi modelli di nocciolo, differenziati per strategia di caricamento del combustibile: l'obiettivo è quello di individuare i modelli con le migliori caratteristiche globali. Il confronto è stato eseguito in termini di burn-up medio allo scarico, coefficienti neutronici e distribuzione della potenza. Questo studio preliminare ha permesso di identificare i due modelli di riferimento che vengono analizzati nel dettaglio nella terza parte. I modelli di nocciolo individuati presentano:

- strategia con 4 cicli di ricarica per il combustibile: è previsto il reshuffling delle assembly. Tale modello permette di massimizzare il burn-up con conseguente impatto sulla vita del nocciolo.
- strategia con ciclo unico di ricarica per il combustibile: le assembly una volta caricate restano nella stessa posizione per tutta la vita del reattore. Questo modello non richiede quindi nessun accesso diretto al combustibile: tale caratteristica rende questo nocciolo particolarmente interessante in termini di garanzia contro il rischio di proliferazione nucleare.

## 3. Analisi del nocciolo allo stato di equilibrio

Nella terza fase, dopo aver definito quali modelli di caricamento presentano caratteristiche migliori, l'obiettivo è stato quello di analizzare nel dettaglio il

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

comportamento del nocciolo per poterne dimostrare l'effettivo funzionamento in condizioni di piena potenza (stato di equilibrio).

La prima analisi eseguita è relativa alla valutazione di impatto sull'economia neutronica dovuto all'utilizzo di un riflettore in acciaio confrontandola con un modello in cui la riflessione sia dovuta esclusivamente allo strato di moderatore (acqua leggera) compreso nell'intercapedine tra nocciolo e vessel.

Dopo aver definito le caratteristiche dello schermo neutronico adottato lo studio è indirizzato ad investigare:

- burn-up medio per singolo ciclo di irraggiamento
- distribuzione di potenza nel nocciolo
- analisi dei coefficienti neutronici
- valutazione dei margini di sicurezza per lo shutdown

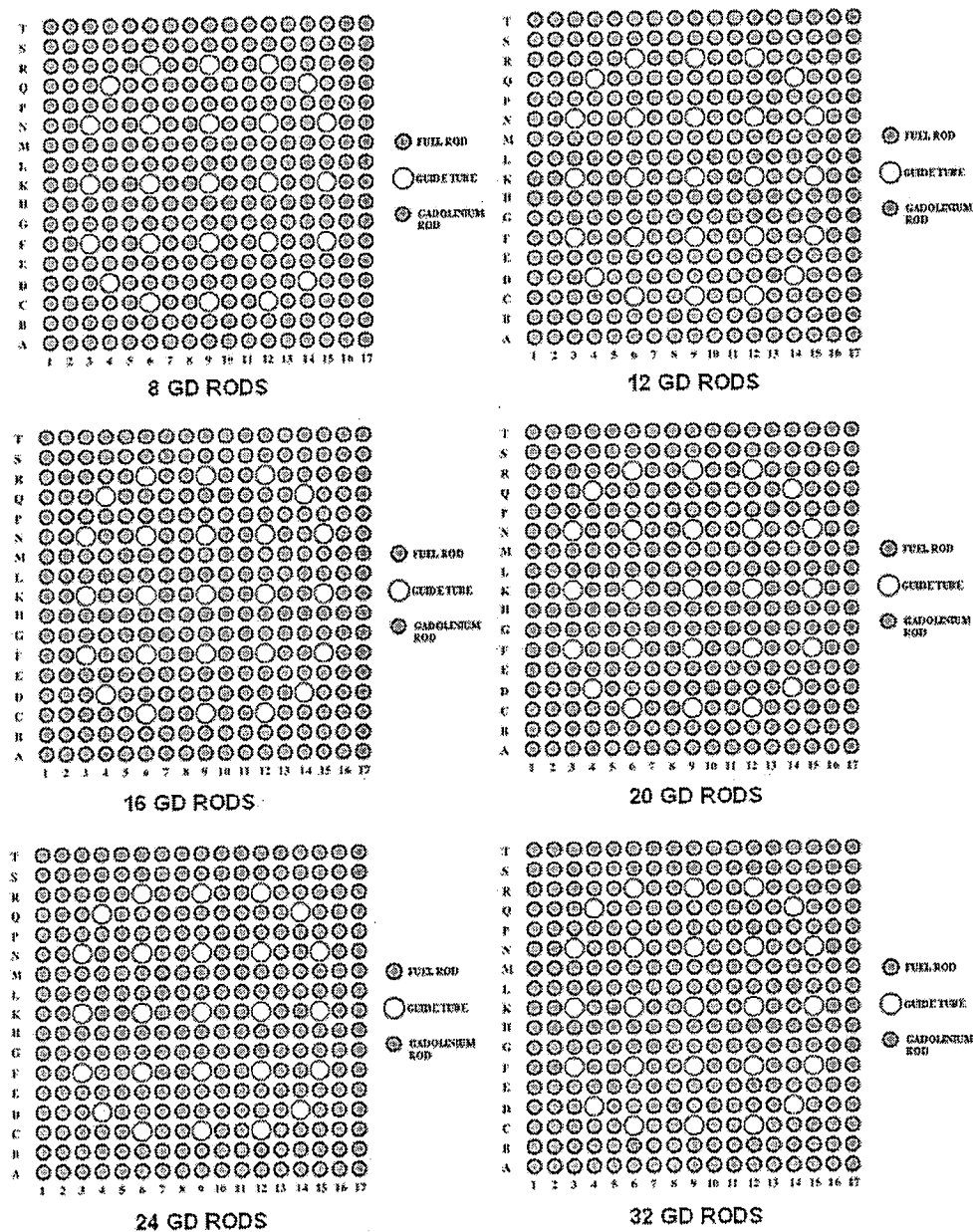
### **Burn-up**

L'obiettivo è quello di dimostrare la possibilità di raggiungere i 60 GWd/t<sup>4</sup> nel caso di gestione del combustibile con 4 cicli di carica. Nel caso di gestione del combustibile in ciclo diretto invece l'obiettivo in termini di burn-up è quello di poter raggiungere i 35 MWd/t. I risultati dell'analisi parametrica e dello studio di sensitività vengono usati in questa fase per individuare quale sia la migliore strategia di veleni e l'arricchimento richiesto per raggiungere tali valori obiettivo.

---

<sup>4</sup> Tale valore di bruciamento è quello atteso sulla base dei calcoli di assembly ed è, inoltre, il valore di burn-up tipico degli attuali reattori di III generazione.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLIO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**



*Figura 2 - Tipologie di assembly con varie distribuzioni di veleni bruciabili*

**Limitazioni termoidrauliche**

Nell'analisi termoidraulica dell'assembly, l'integrità della guaina va studiata in relazione alla cosiddetta *crisi termica*. L'eccessivo innalzamento di temperatura nella

## VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO DI IRRAGGIAMENTO

guaina può portare alla formazione di un sottile strato di vapore all'interfaccia guaina-moderatore che pregiudica drasticamente le caratteristiche di scambio termico tra la barretta di combustibile ed il moderatore stesso: questo meccanismo può portare alla fusione del materiale della guaina o ad un parziale danneggiamento con perdita di integrità. Il parametro che deve essere tenuto sotto controllo è il flusso termico. Il flusso termico al quale si innesca la crisi termica viene definito come flusso termico critico (CHF). Il nocciolo deve essere progettato in modo tale da evitare il raggiungimento del flusso termico critico.

Per evitare la perdita di integrità nella guaina per surriscaldamento viene assunto un limite, dato dal fattore DNBR: tale fattore è calcolato come rapporto tra il flusso termico nominale e flusso termico critico.

Un modo indiretto di verificare il criterio del DNBR è ottenuto utilizzando il fattore di picco radiale: il criterio consiste nel verificare i limiti di questo valore per prevenire il raggiungimento delle condizioni DNB sull'assembly in condizioni operative normali o in caso di transitori. L'obiettivo di questa sezione è teso a dimostrare che i fattori di picco del *canale caldo* del nocciolo sono compatibili con le limitazioni imposte dal rapporto DNBR.

Il fattore di picco radiale è scelto in modo conservativo tenendo in considerazione le incertezze insite nelle misurazioni e nei metodi di progetto.

### Analisi dei coefficienti neutronici

L'analisi è mirata a verificare che tutti i valori assunti dai coefficienti neutronici siano sempre negativi in condizioni isoterme<sup>5</sup> e di potenza nominale per il reattore. Questo requisito viene imposto dall'autorità di sicurezza e deve sempre essere strettamente rispettato. I coefficienti neutronici includono: coefficiente di boro, coefficiente Doppler e coefficiente di temperatura del moderatore.

---

<sup>5</sup> Per condizione isoterma (Hot Zero Power) si intende quella alla quale il moderatore ed il combustibile si trovano alla stessa temperatura di 214 °C, ovvero la temperatura di ingresso del refrigerante nel nocciolo.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

### **Margini di sicurezza per lo spegnimento del reattore**

Per *margini di sicurezza per lo spegnimento del reattore* si intende la riserva di reattività negativa che risulta inserita nel nocciolo, dopo lo shutdown, quando tutte le barre di controllo sono pienamente inserite ad eccezione del cluster di barre con maggiore efficacia che viene ipotizzato bloccato in posizione esterna al nocciolo. Inoltre, al fine di essere maggiormente conservativi, l'antireattività del sistema di barre di controllo (senza quella più efficace) viene diminuita del 10% per tenere conto degli errori associati alle approssimazioni introdotte nei modelli di calcolo. In ogni caso il margine deve essere sufficiente a poter escludere il ritorno alla criticità.

Più in dettaglio l'analisi consiste in:

- Calcolare la reattività positiva inserita nel nocciolo per effetto del transitorio di potenza: l'incremento di reattività è dovuto al coefficiente di temperatura del moderatore ed al coefficiente di temperatura del combustibile. Il calcolo sarà eseguito dapprima per un modello a reticolo infinito nel quale non sono presenti effetti di fuga neutronica. Successivamente il calcolo sarà modificato prendendo in considerazione anche la geometria del nocciolo: in questo secondo caso l'effetto di leakage non è trascurabile e, come si vedrà, presenta un notevole impatto sui coefficienti neutronici.
- Calcolare il margine minimo per lo spegnimento ottenuto come bilancio tra la reattività positiva inserita dal transitorio di potenza e la reattività negativa inserita dalle barre di controllo in cui, come già ricordato, viene considerato il cluster a maggiore efficacia completamente estratto dal nocciolo: il valore così ottenuto viene poi conservativamente ridotto del 10% per tenere conto delle incertezze nei metodi di calcolo.

I casi che saranno esaminati sono i seguenti:

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

- Spegnimento del nocciolo con transizione dallo stato *Hot Full Power* (HFP<sup>6</sup>) allo stato *Hot Zero Power* (HZP<sup>6</sup>), ovvero dalle condizioni di piena potenza con nocciolo in equilibrio fino a condizioni isoterme;
- Spegnimento del nocciolo con transizione dallo stato *Hot Full Power* (HFP) allo stato *Cold Zero Power* (CZP<sup>6</sup>), ovvero dalle condizioni di piena potenza con nocciolo in equilibrio fino a condizioni di nocciolo freddo con potenza zero (condizioni di temperatura ambiente: 40°C).

Per lo spegnimento del nocciolo, vengono considerati sia l'utilizzo di barre di controllo che la diluizione del boro nel moderatore.

*Nel caso di spegnimento del nocciolo, con transizione da HFP ad HZP, i margini di reattività devono essere tali da permettere la sottocriticità esclusivamente per mezzo delle barre di controllo: il valore di reattività negativa deve essere strettamente superiore ai 1700 pcm (valore tipico richiesto dall'autorità di controllo per i PWR).*

Per quanto riguarda le caratteristiche di assorbimento delle barre di controllo, vengono considerati i seguenti materiali:

- B<sub>4</sub>C: con concentrazione naturale di B<sub>10</sub> pari al 20 %
- B<sub>4</sub>C: con concentrazione di B<sub>10</sub> pari al 40%
- B<sub>4</sub>C: con concentrazione di B<sub>10</sub> pari al 90 % ed afnio aggiunto nella guaina.

---

<sup>6</sup> I diversi stati in cui il nocciolo si trova ad operare sono descritti in Tab. 18.

## **4 IL SISTEMA DI CALCOLO *SAPHYR* DEL CEA**

Il pacchetto di software SAPHYR (in francese l'acronimo significa Sistema Avanzato per la Fisica dei Reattori) è dedicato al calcolo neutronico, analisi di sicurezza ed alla progettazione di reattori nucleari. La suite è composta da tre codici di calcolo nucleare principali, APOLLO2 per i calcoli di trasporto di cella, CRONOS2 per i calcoli in diffusione sull'intero nocciolo e FLICA4 per i calcoli di termoidraulica: uno speciale linguaggio di programmazione ad oggetti, GIBLANE, è stato sviluppato per connettere i vari moduli del codice di calcolo.

Il sistema SAPHYR viene utilizzato presso il CEA per studiare qualsiasi tipo di reattore: PWR standard, reattori sperimentali, reattori per applicazioni spaziali e reattori veloci (FBR).

- **CODICE DI CALCOLO APOLLO2 [6]**

Apollo2 è un codice modulare sviluppato per calcoli di trasporto multi-gruppo in geometrie 2-D and 3D. Il codice Apollo2, codice di cella sviluppato presso i laboratori di CEA-Saclay in Francia viene usato per il trasporto neutronico ma anche per il calcolo in evoluzione di burn-up. Originariamente il codice è stato sviluppato per analizzare gli elementi di combustibile dei reattori ad acqua leggera (LWR). Apollo2 è in grado di calcolare il flusso neutronico eterogeneo all'interno dell'assembly, il buckling critico, eseguire calcoli di irraggiamento in evoluzione radioisotopica e calcoli di omogeneizzazione sulla cella. Il codice di calcolo permette di risolvere l'equazione di trasporto multigruppo con diversi metodi: probabilità di collisione, metodo  $S_n$  e metodo delle caratteristiche.

Il codice permette di generare (Cfr. Libreria di sezioni d'urto "SAPHYB") librerie di sezioni d'urto macroscopiche a due gruppi che vengono poi utilizzate nel codice di diffusione CRONOS2. Le sezioni d'urto sono tabulate in funzione di burnup, concentrazione di boro, densità del moderatore, temperatura del combustibile, inserimento delle barre di controllo. Questi calcoli vengono eseguiti in geometria 2D in un mezzo infinito (condizioni di riflessione alla superficie esterna dell'assembly).

In questo studio per la soluzione dell'equazione di trasporto è stato utilizzato il metodo di collisione con una mesh del campo energetico a 99 gruppi.

- **CODICE DI CALCOLO CRONOS2 [7]**



# VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO DI IRRAGGIAMENTO

Il codice di calcolo CRONOS2 è basato su una struttura modulare che ne permette una grande flessibilità di utilizzo.

Il codice è stato progettato per fornire tutti gli strumenti necessari per il calcolo di reattore che includono la progettazione neutronica, la gestione delle procedure di ricarica del combustibile e l'analisi incidentale. CRONOS2 permette di eseguire calcoli multigruppo nello stato stazionario e nei transitori e di studiare la distribuzione della potenza nel nocciolo tenendo in considerazione gli effetti di feedback dovuti ai fenomeni termoidraulici. Tutti questi calcoli possono essere eseguiti senza nessuna limitazione in ogni parametro (gruppi energetici, mesh ...).

Il codice di calcolo permette di risolvere l'equazione di diffusione con scattering isotropico o con sorgenti aggiuntive. Differenti tipologie di geometrie sono disponibili come la geometria cartesiana in 1D, 2D e 3D, la geometria esagonale in 2D e 3D e la geometria cilindrica.

Il metodo numerico di soluzione utilizzato è quello agli elementi finiti. Il nocciolo del PWR, oggetto di questo studio, viene descritto con una mesh geometrica che presenta radialmente 4 nodi per assembly ed assialmente 28 nodi, di cui 24 posizionati nella parte attiva dell'assembly.

- Libreria di sezioni d'urto "SAPHYB"

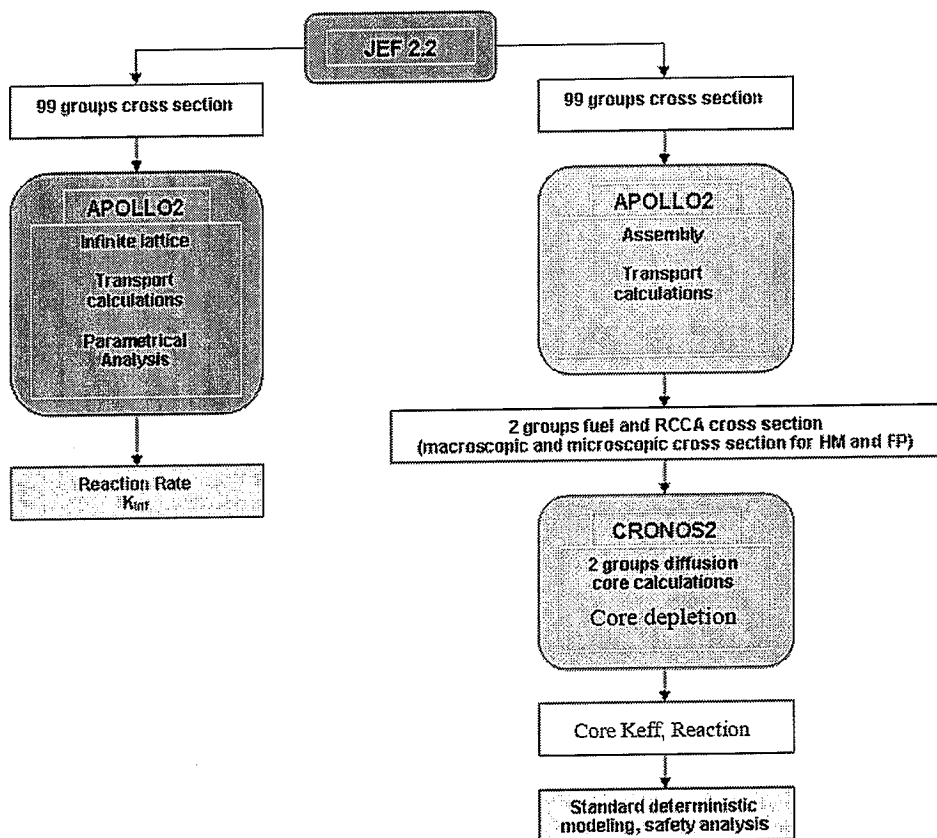
Le librerie di sezioni d'urto utilizzate sono state generate collassando le librerie ottenute da un calcolo di trasporto bidimensionale a 99 gruppi eseguito su assembly in geometria infinita, utilizzando il codice di calcolo APOLLO2.

Alle sezioni d'urto originarie viene applicato un'equivalenza trasporto / diffusione: la libreria viene modificata in modo tale che il tasso di reazione in ogni cella in teoria della diffusione sia uguale al tasso di reazione in teoria del trasporto.

La libreria è tabulata prendendo in considerazione parametri come: burn-up, densità e temperatura del moderatore, concentrazione di boro, xeno ed altri parametri scelti dall'utilizzatore. In CRONOS2 i parametri sono memorizzati piano per piano nel nocciolo ed isotopo per isotopo. Nel codice di calcolo, un sistema di gestione della memoria del calcolatore permette di elaborare le caratteristiche di un singolo piano per volta. Relativamente ai calcoli di omogeneizzazione le sezioni d'urto utilizzate sono quelle che

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO DI IRRAGGIAMENTO**

derivano dall'omogenizzazione di quelle calcolate con il codice APOLLO2. In *Fig. 3* viene riportato il diagramma di flusso dei codici APOLLO2 e CRONOS2.



*Figura 3 - Diagramma di flusso dei codici di calcolo utilizzati*

## **5 ANALISI DI ASSEMBLY CON IL CODICE APOLLO2**

---

La prima fase di questo studio consiste nell'analisi di un modello di assembly in geometria infinita. Questo studio, come vedremo nel corso dell'analisi, permetterà di ottenere informazioni sulle performance del nocciolo in funzione del burn-up.

La metodologia utilizzata consiste dapprima nel selezionare i parametri fisici coinvolti nella modellazione dell'assembly (variazione dell'arricchimento dell'  $UO_2$  nel combustibile, composizione caratteristica dei veleni bruciabili e relativo numero di barrette nelle assembly). Sulla base poi dei parametri selezionati, vengono costruiti altrettanti modelli, sui quali viene condotta l'analisi parametrica che permetterà di ottenere informazioni di massima sul nocciolo senza eseguire complessi calcoli in teoria della diffusione. Il confronto tra burn-up, lunghezza di ciclo e coefficienti di reattività delle varie assembly studiate viene utilizzato come primo passo per selezionare i modelli che presentano migliori caratteristiche globali.

In particolare l'obiettivo dell'analisi di assembly consiste in:

**1. Compensare l'eccesso di reattività ad inizio ciclo (BOC)**

La lunghezza di ciclo è strettamente dipendente dall'eccesso di reattività presente ad inizio ciclo che tuttavia deve essere costantemente monitorata durante l'irraggiamento. Tale obiettivo può essere ottenuto aumentando l'arricchimento dell'  $UO_2$  nel combustibile. L'analisi, in questo caso, è finalizzata, da una parte ad ottenere il massimo burn-up (allungamento del ciclo), dall'altra a controllare l'eccesso di reattività ad inizio ciclo. Vengono proposte differenti soluzioni.

**2. Ridurre i fattori di picco nella barretta migliorando così i margini termo-idraulici di sicurezza**

Il principale obiettivo dell'analisi termoidraulica di un nocciolo consiste nel verificare che i limiti termoidraulici siano strettamente rispettati. Due limitazioni devono essere strettamente verificate:

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

- Per escludere la fusione del combustibile va controllata la densità lineare di potenza:

$$q'(r) < q'_{\max}$$

- Il flusso termico in condizioni operative deve mantenersi sempre sotto il flusso termico critico:

$$q''(r) < q''_{\text{CHF}}$$

Per facilitare l'analisi termoidraulica del nocciolo, una comune strategia consiste nell'investigare il comportamento del canale più caldo nel nocciolo: infatti, se le limitazioni termoidrauliche sono rispettate in questo canale, si potrà ritenere che esse siano rispettate anche negli altri canali. Il canale caldo nel nocciolo è definito come il canale nel quale il flusso termico e l'entalpia raggiungono il valore massimo.

Il fattore di picco totale nel canale caldo è definito come:

$$F_q^N = \frac{\text{maximum heat flux in the core}}{\text{average heat flux in the core}} = F_R^N F_Z^N$$

dove  $F_R^N$  è il fattore radiale nucleare del canale caldo che è definito come:

$$F_R^N = \frac{\text{heat flux of the hot channel}}{\text{average heat flux of the channels in core}} = \frac{\int_0^L q''(r_{\text{HC}}) dz}{\frac{1}{N_C} \sum_{i=1}^{N_C} \int_0^L q''(r_i) dz}$$

( $N_C$  è il numero totale di canali nel nocciolo) ed  $F_Z^N$  è il fattore assiale nucleare del canale caldo che è definito come:

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

$$F_z^N = \frac{\text{maximum heat flux of the hot channel}}{\text{average heat flux of the hot channel}} = \frac{\max[q''(r_{HC})]}{\frac{1}{L} \int_0^L q''(r_{HC}) dz}$$

**3. Valutare i coefficienti di reattività e le caratteristiche di controllo della reattività**

Obiettivo di questa sezione è verificare che i coefficienti di reattività (coefficiente Doppler e coefficiente di temperatura del moderatore) siano sempre negativi e valutare le caratteristiche di controllo della reattività realizzate per mezzo delle barre di controllo e della concentrazione del boro nel moderatore (coefficiente di boro).

L'obiettivo dell'analisi di efficienza delle barre di controllo è quello di verificare che la reattività negativa dovuta all'inserimento di un cluster di barre nell'assembly sia sufficiente a controllare la reattività positiva inserita nel nocciolo durante le transizioni HFP -> HZP ed HFP -> CZP. Inoltre, l'efficienza delle barre di controllo viene testata considerando una concentrazione di boro pari a zero (fine ciclo di irraggiamento) nel moderatore. Questo è infatti il caso più penalizzante in termini di controllo della reattività. Differenti materiali assorbitori sono stati considerati per le barre di controllo: l'analisi è stata condotta su due assembly con 20 e 32 barrette di veleni bruciabili.

## 5.1 PARAMETRI COINVOLTI NELLA PROGETTAZIONE DEL NOCCILO

In questa sezione riportiamo quali sono le variabili che vengono prese in considerazione nella modellazione delle assembly e del nocciolo. Sono stati identificati tre classi di parametri:

- Geometrici
- Assunzioni sulla gestione del combustibile
- Parametri fisici

### 5.1.1 Parametri geometrici

Per quanto riguarda l' assembly, I parametri geometrici sono quelli tipici di una assembly per PWR standard con array 17 x 17: i dati caratteristici sono riportati in Tab. 1.

### 5.1.2 Assunzioni per la gestione del combustibile

Sono state prese in considerazione tre tipologie di gestione del combustibile:

- Ciclo unico<sup>7</sup> di ricarica del combustibile (1 / 1)
- Gestione di ricarica del combustibile a 3 cicli (1 / 3)
- Gestione di ricarica del combustibile a 4 cicli (1 / 4)

### 5.1.3 Parametri fisici

Il progetto del nocciolo deve tenere in considerazione diversi aspetti fisici:

- L' arricchimento dell' UO<sub>2</sub> nelle barrette di combustibile
- La diluizione del boro nel moderatore-refrigerante
- La caratterizzazione di una strategia di veleni bruciabili

*L'obiettivo finale dell'analisi di assembly è quello di ricercare la combinazione migliore di tutte queste variabili per raggiungere caratteristiche accettabili in termini di efficienza e sicurezza, dapprima nell'elemento di combustibile e conseguentemente nel nocciolo.*

Lo studio ha richiesto la classificazione di un gran numero di variabili e la costruzione di numerosi modelli ottenuti come combinazione delle variabili individuate. Per questo motivo si è preferito procedere per gradi successivi: dapprima è stato analizzato un modello semplificato, successivamente è stato definito un modello più sofisticato in grado di tenere conto, contemporaneamente, di tutti i parametri.

---

<sup>7</sup> Il combustibile non viene riprocessato per recuperare plutonio o uranio per la rifabbricazione di nuovo combustibile.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Nella prima fase è stato studiato un modello semplificato in cui non sono presenti barrette di veleni bruciabili. L'eccesso di reattività viene controllato esclusivamente dalla concentrazione del boro disciolto nel moderatore. Nella seconda fase invece sono stati analizzati diversi modelli di assembly in cui sono stati utilizzati differenti numeri di barrette di veleno bruciabile differenziati anche in termini di composizione chimica.

I parametri individuati per i due modelli di assembly sono:

➤ Assembly senza barrette di veleni bruciabili

- Arricchimento dell'  $UO_2$  nelle barrette di combustibile. Vengono considerati 5 differenti arricchimenti per l'  $U_{235}$ : 4.0 %, 4.5%, 4.9%, 5.5%, 6.0%.
- Concentrazione del boro (ppm) : per questa prima analisi, al fine di eseguire un primo calcolo con APOLLO2, viene assunto un valore di primo tentativo di 700 ppm per la concentrazione di boro. I risultati successivi successivi, ottenuti a livello di nocciolo, mostreranno che questa scelta è, approssimativamente, corretta nel caso di gestione della ricarica del combustibile a quarti di nocciolo [1/4] ma è sottostimata nel caso di ciclo unico di ricarica [1/1].

➤ Assembly con barrette di veleni bruciabili

- Concentrazione del boro (ppm): 700 ppm nel moderatore.
- Arricchimento dell'  $UO_2$  nel combustibile. Vengono considerati 5 differenti arricchimenti nel combustibile: 4.0 %, 4.5%, 4.9%, 5.5%, 6.0%.
- Numero di barrette di veleni bruciabili. Vengono considerati 6 diversi casi con 8, 12, 16, 20, 24 e 32 barrette.
- Tipo di veleno bruciabile: gadolinio
- Frazione in peso dell' ossido di gadolinio nelle barrette di veleni bruciabili. Vengono considerati 7 casi con le seguenti frazioni in peso: 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 11%, 12%.
- Arricchimento dell'  $UO_2$  nelle barrette di veleno bruciabile : 1.0%, 1.5%, 2.5%.

# VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO DI IRRAGGIAMENTO

## 5.2 ASSEMBLY SENZA BARRETTE DI VELENI BRUCIABILI

Per eseguire un primo calcolo con APOLLO2 il valore di concentrazione del boro viene fissato a 700 ppm, per cui in questo caso l'unica variabile libera è l'arricchimento dell' $UO_2$  nel combustibile. Sotto queste condizioni sono state calcolate le caratteristiche dell'assembly per i seguenti arricchimenti di  $U_{235}$ :

4.0 %, 4.5%, 4.9%, 5.5%, 6.0%

I confronti tra differenti assembly individuate sulla base dei diversi arricchimenti sono eseguiti in funzione di:

1. Valutazione del tasso di bruciamento del combustibile e lunghezza di ciclo per ciascuna strategia di caricamento proposta.
2. Guadagno di reattività per ciascun arricchimento considerato e per ogni strategia di caricamento proposta. Il guadagno di reattività è misurato rispetto al *caso di riferimento* in cui l'arricchimento, dell' $UO_2$  nel combustibile, viene fissato al 4.9%.

Per questo modello di calcolo si assume che la fine del ciclo è raggiunta assumendo un tasso di fuga pari a 4000 pcm: il che significa che la fine del ciclo è raggiunta quando il valore del  $K_{inf}$  risulta pari a 1.04 (questa assunzione è valida per tutte le strategie di caricamento considerate: 1/1, 1/3, 1/4).

### 5.2.1 Analisi dei risultati

I risultati, relativi alla lunghezza di ciclo, ottenuti in funzione della variazione dell'arricchimento dell' $UO_2$  nel combustibile sono riportati in Tab. 2: i risultati sono calcolati per ogni strategia di caricamento proposta.

Dall'analisi dei risultati, emerge innanzitutto che il burn-up e la lunghezza di ciclo aumentano con l'incremento dell'arricchimento dell' $U_{235}$  e risultano tanto più performanti quanto più si aumenta il numero di cicli di irraggiamento, nella strategia di caricamento di combustibile.



**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Considerando rispettivamente una gestione del combustibile del tipo 1/1, 1/3, 1/4 , è stato calcolato che un arricchimento del combustibile pari al 4.9% conduce ad un burn-up a fine ciclo pari a 32 GWd/t, 49 GWd/t e 52 GWd/t, corrispondenti ad una lunghezza di ciclo di 1567, 784 (per ciclo) e 627 (per ciclo) giorni rispettivamente.

La prima indicazione che si ottiene da questi risultati, relativi ad un modello semplificato, è la seguente: un burn-up intorno ai 60 GWd/t può essere ottenuto assumendo un caricamento a 3 o a 4 cicli con un arricchimento per il combustibile uguale o superiore al 5.5 %.

In Tab. 3 viene presentato l'impatto sul guadagno<sup>s</sup> di reattività misurato con diversi valori di arricchimento nel combustibile. Il guadagno di reattività viene misurato rispetto al *caso di riferimento* con combustibile arricchito al 4.9%.

Considerando invece uno stesso valore di arricchimento, il guadagno di reattività aumenta con il numero di cicli di irraggiamento per il combustibile. Ad esempio, considerando un arricchimento nel combustibile pari al 5.5% a BOI-BOC, il guadagno di reattività è rispettivamente **322 pcm/%** nel caso di gestione del combustibile con ciclo unico , **501 pcm/%** nel caso di gestione del combustibile con tre cicli di ricarica e **530 pcm/%** nel caso di gestione del combustibile con 4 cicli di ricarica.

In *Fig. 4*, viene mostrato l'andamento del difetto di reattività ( $\Delta\rho$ ) in funzione del burn-up. Anche in questo caso l'assembly di riferimento, con il quale sono stati eseguiti i confronti, è quello con arricchimento pari al 4.9%. Si può notare un effetto di stabilizzazione al di sopra dei 45 GWd/t dovuto al build-up del plutonio.

---

<sup>s</sup> La definizione della misura di reattività in unità pcm (percent millirho) è ottenuta dalla formula  $\Delta\rho = 10^5 * \ln\left(\frac{K_1}{K_0}\right)$  dove  $K_0$ , in questo caso , è il K-INF di riferimento misurato a con un arricchimento nel combustibile pari a 4.9%.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLIO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

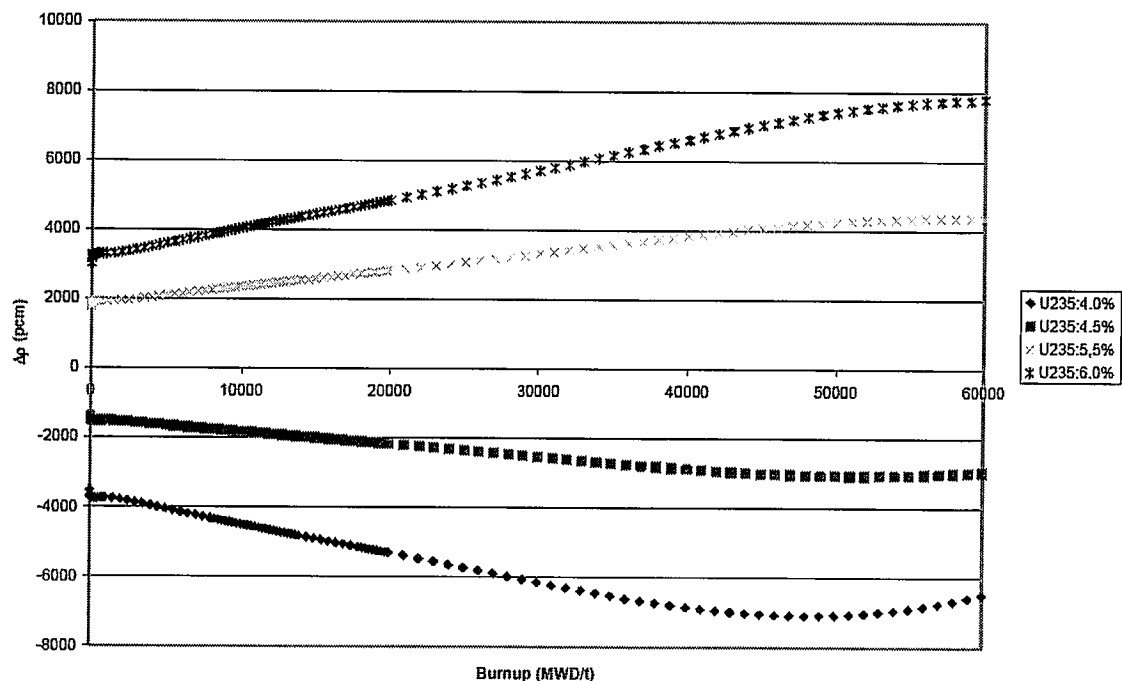
*Tabella 2 - Lunghezza di ciclo con vari arricchimenti di UO<sub>2</sub> nel combustibile per differenti strategie di caricamento*

CASO :	Arricchimento (% U <sub>235</sub> )	4	4,5	4,9	5,5	6
<b>Ciclo Unico</b>	<b>Burn-up (BOI) (MWD/t)</b>	0	0	0	0	0
"1/1"	EOI	24500	29000	32500	37500	41500
	Lunghezza ciclo (giorni)	1181	1399	1567	1808	2001
<b>3 Cicli</b>	<b>Burn-up (BOC) (MWD/t)</b>	12250	14500	16250	18750	20750
"1/3"	EOC	24500	29000	32500	37500	41500
"1/3"	EOI	36750	43500	48750	56250	62250
	Lunghezza ciclo (giorni)	591	700	784	904	1001
<b>4 Cicli</b>	<b>Burn-up (BOC) (MWD/t)</b>	14700	17400	19500	22500	24900
"1/4"	EOC	24500	29000	32500	37500	41500
"1/4"	EOI	39200	46400	52000	60000	66400
	Lunghezza ciclo (giorni)	472	560	627	723	800

*Tabella 3 - Guadagno di reattività con differenti arricchimenti dell' U<sub>235</sub> nel combustibile per differenti strategie di caricamento*

CASO:	1/1		1/3			1/4		
	BOI	EOI		BOC	EOC		BOC	EOC
$\Delta\rho/4.0\%$	-879	-1412	$\Delta\rho/4.0\%$	-1164	-1412	$\Delta\rho/4.0\%$	-1214	-1412
$\Delta\rho/4.5\%$	-313	-556	$\Delta\rho/4.5\%$	-441	-556	$\Delta\rho/4.5\%$	-464	-556
$\Delta\rho/4.9\%$	0	0	$\Delta\rho/4.9\%$	0	0	$\Delta\rho/4.9\%$	0	0
$\Delta\rho/5.5\%$	322	669	$\Delta\rho/5.5\%$	501	669	$\Delta\rho/5.5\%$	530	669
$\Delta\rho/6.0\%$	502	1117	$\Delta\rho/6.0\%$	808	1117	$\Delta\rho/6.0\%$	864	1117

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**



*Figura 4 - Variazione del difetto di reattività con il burn-up*

### 5.2.2 Conclusioni

L'analisi condotta su questo modello semplificato di assembly (non sono state considerate le barrette di veleni bruciabili) ha permesso di evidenziare che l'obiettivo di ottenere un burn-up di 60 GWd/t può ottenersi con una strategia di caricamento del combustibile a terzi [1/3] o quarti [1/4] di nocciolo, assumendo rispettivamente un arricchimento per il combustibile pari al 5.5% ed al 4.9%. Nel caso di gestione a ciclo unico di ricarica invece lo studio ha evidenziato che è possibile raggiungere un burn-up di circa 35 GWd/t.

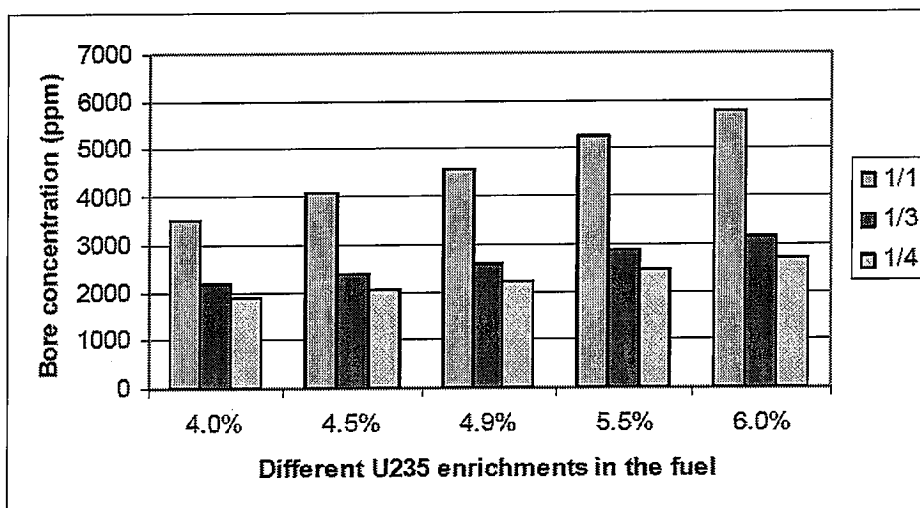
Per questo modello semplificato sono stati studiati anche i coefficienti neutronici e la concentrazione di boro critica richiesta per compensare l'eccesso di reattività durante il ciclo di irraggiamento: i risultati dei modelli analizzati sono riportati nell' Appendice A. L'assenza dei veleni bruciabili in questo modello produce: da una parte, un valore troppo elevato di concentrazione del boro ad inizio ciclo con conseguente rischio di cristallizzazione e, dall' altra come conseguenza, un valore positivo del coefficiente di temperatura del moderatore.

Questo modello va quindi perfezionato con l' implementazione di una strategia di veleni bruciabili in modo da poter ridurre considerevolmente le concentrazioni di boro richiesto a

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO DI IRRAGGIAMENTO**

BOC/BOI e, conseguentemente, in modo da poter ridurre anche il coefficiente di temperatura del moderatore.

In *Fig. 5* vengono riportate le concentrazioni di boro richieste per le differenti strategie di caricamento adottate.



*Figura 5 - Concentrazioni di boro a differenti arricchimenti di U<sub>235</sub>*

### 5.3 ASSEMBLY CON BARRETTE DI VELENI BRUCIABILI

L'elaborazione di una strategia di veleni bruciabili per l'assembly impone un elevato numero di valutazioni sui vari modelli che possono essere identificati combinando le diverse variabili in gioco.

L'obiettivo è quello di analizzare l'impatto sulla reattività e sulla distribuzione di potenza dovuto alle diverse assunzioni: composizione per il materiale che costituisce il veleno neutronico e numero di barre di veleni bruciabili che si intende utilizzare nel modello.

In questa fase la progettazione neutronica viene supportata dall'analisi termoidraulica per verificare con procedura iterativa che le limitazioni termoidrauliche imposte siano sempre rispettate.

Nei vari modelli delle assembly studiate sono stati calcolati i relativi coefficienti neutronici: i risultati dei modelli analizzati sono riportati nell'Appendice A.

I parametri da gestire nella identificazione dei diversi modelli delle assembly sono i seguenti:

- Concentrazione del boro (ppm): fissato a 700 ppm.
- Arricchimento dell'  $\text{UO}_2$  nel combustibile. Vengono considerati 5 differenti arricchimenti nel combustibile: 4.0 %, 4.5%, 4.9%, 5.5%, 6.0%.
- Numero di barrette di veleni bruciabili. Vengono considerati 6 diversi casi con 8, 12, 16, 20, 24 e 32 barrette.
- Tipo di veleno bruciabile: gadolinio
- Frazione in peso dell'ossido di gadolinio nelle barrette di veleni bruciabili. Vengono considerati 7 casi con le seguenti frazioni in peso: 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 11%, 12%.
- Arricchimento dell'  $\text{UO}_2$  nelle barrette di veleno bruciabile : 1.0%, 1.5%, 2.5%.

Per semplificare le analisi è stato definito un modello di assembly di riferimento con il quale poter confrontare tutti gli altri modelli. Le caratteristiche dell'assembly di riferimento sono:

- Arricchimento nel combustibile: 4.9%

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

- Numero di barrette di veleni bruciabili : 20
- Frazione in peso di gadolinio nella barrette di veleno: 8%
- Arricchimento dell' UO<sub>2</sub> nella barretta di veleno bruciabile: 0.25%

Questo tipo di strategia permette di ottenere un confronto di varie assembly con la variazione progressiva dei differenti parametri. Si è proceduto in questo modo: partendo dai valori che i parametri assumono nel *caso di riferimento* si è fatto variare in modo libero una sola variabile per volta. Applicando questa metodologia sono stati così ottenuti tre gruppi per le assembly:

1. Il primo in cui varia il numero di barre di veleni bruciabili
2. Il secondo in cui varia la frazione in peso del gadolinio
3. Il terzo in cui varia l'arricchimento dell' UO<sub>2</sub> nelle barrette di veleni bruciabili.

Le analisi sono finalizzate a descrivere il comportamento dell'assembly in termini di:

1. valutazione della lunghezza di ciclo in funzione della variazione del numero di barre di veleni bruciabili per ognuna delle strategie di caricamento prese in considerazione.
2. valutazione della lunghezza di ciclo in funzione dell' arricchimento in U<sub>235</sub> nelle barrette di veleni bruciabili per ognuna delle strategie di caricamento prese in considerazione.
3. Valutazione della lunghezza di ciclo in funzione della variazione della frazione in peso del gadolinio nelle barrette di veleni bruciabili.
4. Valutazione del difetto di reattività, misurato in termini di  $\Delta\rho/\text{rod}$ , in funzione del numero di barrette di veleni bruciabili per ognuna delle strategie di caricamento prese in considerazione.
5. Valutazione del difetto di reattività in termini di  $\Delta\rho/\%$ , in funzione della variazione della frazione in peso del gadolinio nelle barrette di veleni bruciabili.
6. Valutazione del difetto di reattività in termini di  $\Delta\rho$  (pcm), in funzione della variazione di arricchimento dell' UO<sub>2</sub> presente nelle barrette di veleno bruciabile.

### *5.3.1 Analisi dei risultati*

In *Tab. 4* sono riportati i risultati in termini di burn-up e lunghezza di ciclo in funzione della variazione del numero di barrette di veleni bruciabili.

Prima di tutto va osservato che un aumento del numero di barrette di veleni bruciabili comporta in generale una progressiva riduzione del burn-up e della lunghezza di ciclo. Considerando, ad esempio, una gestione di ricarica del combustibile con ciclo unico [1/1] e confrontando due modelli di assembly, il primo con 8 ed il secondo con 32 barrette di veleni bruciabili, ne deriva una diminuzione in termini di burn-up pari a 4 GWd/t (corrispondente ad una diminuzione di 193 giorni sulla lunghezza di ciclo). Si può dire che ad ogni incremento di 4 barrette di veleno bruciabile nell'assembly vengono perduti circa 1 GWd/t in termini di burn-up.

*Come mostrato dai risultati la configurazione che presenta il miglior compromesso in termini di riduzione del burn-up e controllo di reattività durante il ciclo è quella dell' assembly costituito da 20 barrette di veleno bruciabile.*

In *Tab. 4* vengono riportati gli effetti globali sul burn-up e sulla lunghezza di ciclo dovuti alla presenza delle barrette di veleni bruciabili. In *Tab. 5* vengono riportati i risultati del *caso di riferimento*: assembly senza barrette di veleni bruciabili.

Nel caso di assembly con 20 barrette di veleni bruciabili, l'impatto dei veleni può essere valutato in questo modo<sup>9</sup>:

---

<sup>9</sup> Il confronto viene eseguito con un assembly identico ma senza barrette di veleno bruciabile.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

- Perdita di burn-up valutabile tra 3.5 e 5.6 GWd/t, rispettivamente nel caso di gestione a ciclo unico ed a 4 cicli di ricarica.
- Riduzione della lunghezza di ciclo tra 169 e 272 giorni, rispettivamente nel caso di gestione a ciclo unico ed a 4 cicli di ricarica.

*La riduzione della performance dovuta alla necessaria strategia di veleni bruciabili può essere compensata mediante un incremento di arricchimento nell' UO<sub>2</sub> presente nelle barrette di veleno bruciabile.* Nella Tab. 6 vengono riportati i valori di burn-up e di lunghezza di ciclo calcolati con un arricchimento dell' UO<sub>2</sub>, nelle barrette di veleno bruciabile, pari a 1.0%, 1.5%, 2.5%: nell'assembly di riferimento il valore di arricchimento è pari a 0.25%.

Un confronto tra la *Tab. 6* e la *Tab. 4* permette di evidenziare che utilizzando, nelle barrette di veleno bruciabile, un arricchimento pari al 2.5 %, la perdita di burn-up e lunghezza di ciclo può essere in parte ridotta (il confronto viene effettuato con una assembly identica ma senza barrette di veleno bruciabile).

I risultati per questo nuovo modello, che implementa un arricchimento al 2.5%, sono:

- Perdita di burn-up tra 2.3 and 3.7 GWd/t, rispettivamente nel caso di gestione a ciclo unico ed a 4 cicli di ricarica.
- Riduzione della lunghezza di ciclo tra 115 e 184 giorni, rispettivamente nel caso di gestione a ciclo unico ed a 4 cicli di ricarica.

Un incremento ulteriore nell'arricchimento dell' UO<sub>2</sub> nelle barrette di veleno bruciabile non può essere preso in considerazione: infatti la potenza prodotta nelle barrette di veleno bruciabile deve essere compatibile con la conduttività termica della barretta stessa al fine di preservarne l'integrità. Alcuni studi dimostrano che la conduttività termica del gadolinio decresce rapidamente con l'aumento della frazione in peso del gadolinio stesso [9], [10]. Resta dunque fissato un limite superiore per la potenza prodotta in funzione della concentrazione del gadolinio.



**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

*Tabella 4 - Lunghezza di ciclo per assembly con diversi numeri di barrette di veleni per differenti strategie di caricamento*

Caso di riferimento: U <sub>235</sub> 4.9% -Gd8%-U <sub>235</sub> 0.25%							
LUNGHEZZA DI CICLO in funzione del N. di barrette di gadolinio							
Caso :	N. di barrette	8	12	16	20	24	32
<b>Ciclo Unico</b>	<b>Burnup (BOI)</b>						
		0	0	0	0	0	0
"1/1"	EOI	31000	30500	30000	29000	28000	27000
	Lunghezza ciclo (gg)	1495	1470	1447	1398	1351	1302
<b>3 Cicli</b>	<b>Burnup (BOC)</b>	15500	15250	15000	14500	14000	13500
"1/3"	EOC	31000	30500	30000	29000	28000	27000
"1/3"	EOI	46500	45750	45000	43500	42000	40500
	Lunghezza ciclo (gg)	748	735	724	699	676	651
<b>4 Cicli</b>	<b>Burnup (BOC)</b>	18600	18300	18000	17400	16800	16200
"1/4"	EOC	31000	30500	30000	29000	28000	27000
"1/4"	EOI	49600	48800	48000	46400	44800	43200
	Lunghezza ciclo (gg)	598	588	579	559	540	521

*Tabella 5 - Burn-up e lunghezza di ciclo: caso senza veleni bruciabili*

CASO :	Arricchimento (% U <sub>235</sub> )	4,9
<b>Ciclo Unico</b>	<b>Burn-up (BOI) (MWD/t)</b>	0
"1/1"	EOI	32500
	Lunghezza ciclo (gg)	1567
<b>3 Cicli</b>	<b>Burn-up (BOC) (MWD/t)</b>	16250
"1/3"	EOC	32500
"1/3"	EOI	48750
	Lunghezza ciclo (gg)	784
<b>4 Cicli</b>	<b>Burn-up (BOC) (MWD/t)</b>	19500
"1/4"	EOC	32500
"1/4"	EOI	52000
	Lunghezza ciclo (gg)	627

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

*Tabella 6 - Lunghezza di ciclo per differenti arricchimenti di UO<sub>2</sub> nelle barrette di veleno bruciabile per differenti strategie di caricamento*

Caso di riferimento: U <sub>235</sub> 4.9%-20Gd rods-Gd8%				
Caso :	% U <sub>235</sub>	1	1,5	2,5
<b>Ciclo Unico</b>	Burnup (BOI) (MWD/t)	0	0	0
"1/1"	EOI	29500	30000	30144
	Lunghezza ciclo (gg)	1374	1446	1452
<b>3 Cicli</b>	Burnup (BOC) (MWD/t)	14750	15000	15072
"1/3"	EOC	29500	30000	30144
"1/3"	EOI	44250	45000	45216
	Lunghezza ciclo (gg)	687	723	726
<b>4 Cicli</b>	Burnup (BOC) (MWD/t)	17700	18000	18086
"1/4"	EOC	29500	30000	30144
"1/4"	EOI	47200	48000	48230
	Lunghezza ciclo (gg)	550	578	581

Relativamente alla valutazione della lunghezza di ciclo con differenti frazioni in peso di gadolinio nelle barrette di veleni, i risultati principali sono riportati in *Tab 7*. A causa della riduzione di conduttività termica nelle barrette in funzione dell'aumento della concentrazione di gadolinio, viene assunto un valore massimo della frazione in peso dell'ossido di gadolinio pari al 12%. I risultati mostrano una debole dipendenza del burn-up e della lunghezza di ciclo in funzione della frazione di gadolinio. ***Tuttavia un buon compromesso si ottiene selezionando il valore di frazione in peso del gadolinio pari all' 8%.***

La valutazione dell'impatto sul difetto di reattività in funzione della variazione del numero di barrette di veleni bruciabili al BOI/BOC per le differenti strategie di caricamento è presentata in *Tab. 8*. Questi risultati sono comparati con il modello di assembly senza barrette di veleni, assumendo un arricchimento nel combustibile pari al 4.9 %. Nel caso di gestione del combustibile a 4 cicli, il difetto di reattività calcolato è abbastanza costante e vale circa -110 pcm/rod. Invece, il valore medio calcolato nel caso di gestione a ciclo unico ed a terzi di nocciolo è rispettivamente: -840 pcm/rod e -200 pcm/rod. La dipendenza del difetto di reattività misurato per barretta di veleno bruciabile in funzione del numero di barre di veleni è invece molto debole.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

La valutazione dell'impatto sul difetto di reattività in funzione della variazione dell'arricchimento dell' UO<sub>2</sub> nelle barrette di veleno bruciabile viene riportato in *Tab. 9*. L'assembly di riferimento rispetto al quale sono eseguite le misurazioni è quello che presenta:

- Arricchimento nel combustibile: 4.9%
- Frazione in peso di gadolinio nelle barrette di veleni: 8%
- Arricchimento di UO<sub>2</sub> nelle barrette di veleno bruciabile: 0.25%

Queste valutazioni sono sviluppate considerando due differenti stati di irraggiamento per l'assembly: nello stato di *inizio vita* [BOI/BOC] e nello stato in cui il valore del burn-up raggiunge i 21 GWd/t (valore di burn-up al quale l'efficienza dei veleni bruciabili è praticamente azzerata).

I risultati indicano che se, invece del valore di 0.25%, viene adottato un valore di arricchimento pari a 2.5% per l' UO<sub>2</sub> nelle barrette di veleno bruciabile, dopo la scomparsa dei veleni bruciabili (che avviene a circa 21 GWd/t di burn-up ), resta ancora disponibile una riserva di reattività pari a 500 pcm.

L'evoluzione del K-Inf in funzione del tempo in presenza ed in assenza di barrette di veleni bruciabili viene illustrato in *Fig. 6* e *Fig. 7*. nelle due figure viene riportato l'effetto dei veleni bruciabili durante l'irraggiamento. Dopo circa 950 giorni, tutti i veleni bruciabili presenti nelle assembly sono praticamente scomparsi e l'andamento per tutti i tipi i modelli di assembly analizzati diventa praticamente identico [rimane solo una piccola variazione nel K-Inf dovuto alla differenza dei valori di massa fissile presente nelle diverse assembly).

Dai risultati si può evidenziare che confrontando un modello di assembly senza barrette di veleno con altri modelli di assembly a numero di barrette via via crescente, il valore del K-Inf ad un fissato tempo è tanto minore quanto maggiore è il numero di barrette. Questo effetto è dovuto al fatto che l'incremento del numero di barrette di veleno bruciabile nell' assembly riduce la massa del fissile presente e conseguentemente la reattività complessiva dell' elemento di combustibile.

Nel caso di assembly con 20 barre di veleni brucabili, l'andamento del K-Inf è abbastanza piatto (se confrontato con altri modelli) durante l' irraggiamento per tutto il periodo in cui i

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

veleni risultano ancora attivi. Inoltre il periodo di tempo richiesto all' esaurimento del gadolinio è confrontabile approssimativamente con la fine del primo ciclo (modelli 1/3 e 1/4).

Questi risultati confermano che l'assembly con 20 barrette di gadolinio è quello che presenta le caratteristiche migliori tra tutti i modelli studiati.

*Tabella 7 - Lunghezza di ciclo per differenti frazioni di gadolinio nelle barrette di veleno per differenti strategie di caricamento*

Case :	% in peso di Gd	6	7	9	10	11	12
<b>Ciclo Unico</b>	Burn-up (BOI) (MWD/t)	0	0	0	0	0	0
"1/1"	EOI	29000	29000	29000	29000	29000	29000
	Lunghezza ciclo (gg)	1398	1397	1396	1396	1395	1395
<b>3 Cicli</b>	Burn-up (BOC) (MWD/t)	14500	14500	14500	14500	14500	14500
"1/3"	EOC	29000	29000	29000	29000	29000	29000
"1/3"	EOI	43500	43500	43500	43500	43500	43500
	Lunghezza ciclo (gg)	699	699	698	698	698	698
<b>4 Cicli</b>	Burn-up (BOC) (MWD/t)	17400	17400	17400	17400	17400	17400
"1/4"	EOC	29000	29000	29000	29000	29000	29000
"1/4"	EOI	46400	46400	46400	46400	46400	46400
	Lunghezza ciclo (gg)	559	559	558	558	558	558

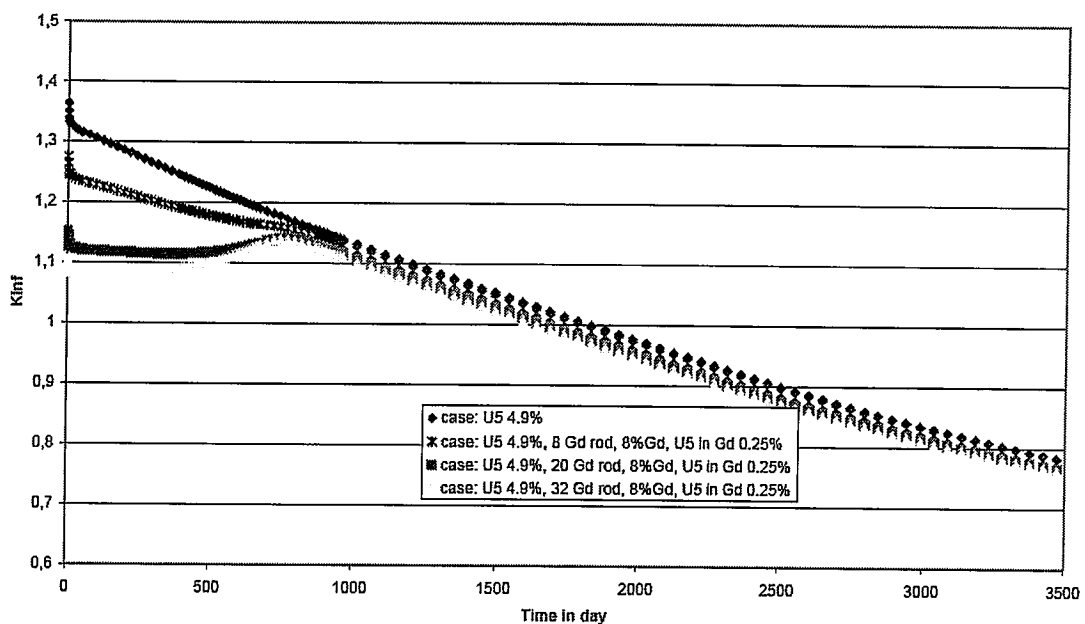
*Tabella 8 - Impatto sulla reattività dovuto a variazione del numero di barrette di veleni bruciabili per differenti strategie di caricamento*

Case:	1/1	1/3	1/4
	<b>BOI</b>	<b>BOC</b>	
$\Delta\rho/8$	-835	$\Delta\rho/8$	-173
pcm/12	-844	pcm/12	-190
pcm/16	-835	pcm/16	-217
pcm/20	-842	pcm/20	-202
pcm/24	-871	pcm/24	-201
pcm/32	-863	pcm/32	-224
		<b>BOC</b>	
$\Delta\rho/8$		$\Delta\rho/8$	-111
pcm/12		pcm/12	-110
pcm/16		pcm/16	-112
pcm/20		pcm/20	-111
pcm/24		pcm/24	-112
pcm/32		pcm/32	-114

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

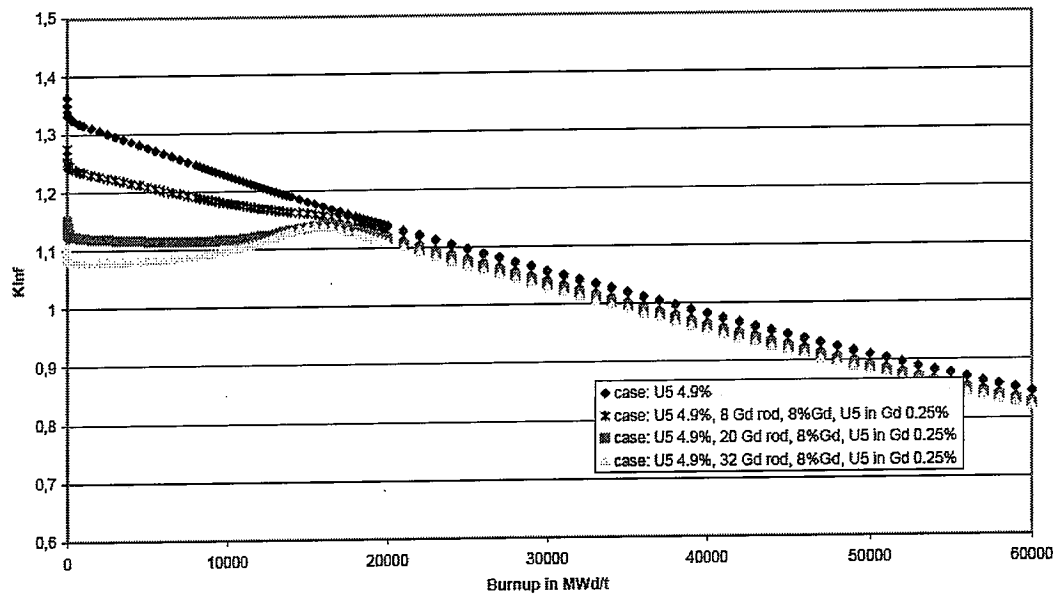
*Tabella 9 - Impatto sulla reattività dovuto a variazione dell'arricchimento dell'UO<sub>2</sub> nelle barrette di veleno bruciabile*

Variazione di arricchimento in U <sub>235</sub> nelle barrette di veleni: effetti sulla reattività			
$\Delta\rho$ (pcm)/%	Arricchimento U <sub>235</sub> nelle barrette di veleni		
	1.00%	1.50%	2.50%
BOI	-3306	-3202	-2999
21000MWD/t	-123	91	499



*Figura 6 - Variazione del  $K_{inf}$  in funzione del tempo con differenti numeri di barrette di gadolinio*

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**



*Figura 7 - Variazione del  $K_{inf}$  in funzione del burn-up con differenti numeri di barrette di gadolinio*

### *5.3.2 Coefficienti neutronici: risultati*

La reattività nel nocciolo viene modificata da molti fattori. Tra questi, primo tra tutti, va considerato l'irraggiamento del combustibile, la temperatura e le caratteristiche dei veleni bruciabili. Per quantificare l'impatto che questi fattori hanno sulla reattività vengono calcolati i coefficienti neutronici.

In *Tab. 10* e *Tab. 11* vengono riportati i coefficienti neutronici, calcolati rispettivamente per i seguenti modelli di assembly:

- Assembly con arricchimento al 4.9% dell' UO<sub>2</sub> nel combustibile senza barrette di veleni bruciabili.
- Assembly con arricchimento al 4.9% dell' UO<sub>2</sub> nel combustibile, 20 barrette di veleno bruciabile con frazione in peso di gadolinio pari all' 8% ed arricchimento in UO<sub>2</sub> pari a 2.5% nelle barrette di veleni.

Tutti i risultati numerici sono riportati nell' *Appendice A*. Sulla base dei risultati dei coefficienti neutronici, è possibile stabilire quali modelli di assembly vanno sicuramente esclusi da ulteriori indagini. Infatti, la presenza di valori positivi nei coefficienti neutronici ne rende inaccettabile il modello sotto il profilo della stabilità di controllo e quindi più in generale della sicurezza.

I risultati riportati nella *Tab. 10* sono ottenuti senza barre di veleni bruciabili. In questo caso, come già presentato precedentemente, è stato studiato un modello semplificato di assembly. La concentrazione di boro critica richiesta a BOI/BOC è molto alta. Nel caso del ciclo unico di ricarica la concentrazione di boro richiesta ad inizio ciclo è 4559 ppm. Questo alto valore di concentrazione di boro influenza profondamente il coefficiente di temperatura del moderatore. Infatti in questo caso il coefficiente di temperatura del moderatore raggiunge un valore positivo molto alto pari a +34 pcm/°C. D'altra parte un alto valore di concentrazione di boro può portare al rischio di cristallizzazione.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

In Tab. 11 sono riportati invece i risultati dei coefficienti neutronici ottenuti nel caso di assembly con 20 barrette di veleni bruciabili. La concentrazione di boro critica richiesta ad inizio ciclo si riduce in questo caso a 2250 ppm in luogo dei precedenti 4559 ppm. L'utilizzo di 20 barrette di gadolinio conduce dunque ad una sensibile riduzione del coefficiente di temperatura del moderatore che passa da +34.47 a +5.46 pcm/°C.

Tuttavia va evidenziato che se nei calcoli si tiene conto del buckling geometrico ( $B_{2,g}$ ) i coefficienti neutronici diminuiscono in senso negativo. Con questa correzione, il precedente valore del coefficiente di temperatura del moderatore (calcolato per l'assembly con: 4.9% di  $UO_2$ , 20 barrette di gadolinio con frazione in peso 8% e 2.5% di  $UO_2$  nelle barrette di veleno) cambia da +5.46 pcm/°C a -8 pcm/°C. Questo significa che la geometria di un nocciolo di piccole dimensioni può avere un importante impatto sui coefficienti neutronici.

Risulta dimostrato dai risultati che le limitazioni imposte dall' autorità di sicurezza, in materia di coefficienti neutronici, possono essere rispettate implementando una idonea strategia di gestione dei veleni bruciabili.

**Tabella 10 – Coefficienti neutronici: assembly senza barrette di veleno bruciabile  
Assembly senza barrette di veleni. Arricchimento nel combustibile: 4.9%**

Ciclo "1/1"	Burn-up	Tempo	Boro	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ Cb
[Unità]	MWD/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	4559	-0.90	34.47	-5.80
EOC	32097	1664	0	-2.67	-24.99	-9.28
<b>Ciclo "1/3"</b>						
Unit	MWD/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	16045	832	2598	-1.62	13.12	-6.73
EOC	32097	1664	0	-2.67	-24.99	-9.28
<b>Ciclo "1/4"</b>						
Unit	MWD/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	19305	1001	2235	-1.76	8.75	-7.03
EOC	32097	1664	0	-2.67	-24.99	-9.28



**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

*Tabella 11 - Coefficienti neutronici: assembly con barrette di veleno bruciabile*  
**Assembly con barrette di veleni. U<sub>235</sub>4.9%-20GD-8%-U<sub>235</sub>2.5%**

<i>Ciclo "1/1"</i>	Burn-up	Tempo	Boro	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ Cb
[Unità]	MWD/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	2250	-0.43	5.46	-6.24
EOC	41134	1960	0	-2.69	-23.42	-9.88
<i>Ciclo "1/3"</i>	Burn-up	Tempo	Boro	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ Cb
Unit	MWD/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	16548	789	2215	-1.25	9.52	-6.90
EOC	41134	1960	0	-2.69	-23.42	-9.88
<i>Ciclo "1/4"</i>	Burn-up	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ Cb
Unit	MWD/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	19056	908	2063	-1.37	6.74	-7.15
EOC	41134	1960	0	-2.69	-23.42	-9.88

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

**5.3.3 Efficienza delle barre di controllo**

In questa sezione viene studiata l'efficienza di un cluster di barre di controllo operante su un elemento di combustibile in geometria infinita. Differenti caratteristiche vengono prese in considerazione per modellare il cluster di barre di controllo. Come situazione più penalizzante viene assunto, per il moderatore, la totale assenza di boro.

Gli obiettivi che si vogliono raggiungere con questo studio sono:

- Valutare l'efficienza di controllo nell'assembly utilizzando differenti materiali assorbitori per le barre di controllo;
- Valutare i fattori di picco nell'assembly. Vengono prese in considerazione due tipologie di assembly: con 20 e 32 barrette di veleni bruciabili.
- Valutare il bilancio di reattività durante il transitorio dallo stato HFP allo stato CZP per stabilire l'efficienza di controllo delle barre.

In questa sezione l'analisi è limitata a studiare il *livello assembly* ma alcuni risultati approssimati possono essere estesi a tutto il nocciolo. I due modelli di assembly presi in considerazione sono:

ASSEMBLY I	ASSEMBLY II
- Arricchimento UO <sub>2</sub> : 4.9%	- Arricchimento UO <sub>2</sub> : 4.9%
- N. di barrette di veleni: 20	- N. di barrette di veleni: 32
- Arricchimento UO <sub>2</sub> nelle barrette di veleno: 2.5%	- Arricchimento UO <sub>2</sub> nelle barrette di veleno: 2.5%
- Frazione in peso di gadolinio: 8%	- Frazione in peso di gadolinio: 8%

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Il primo obiettivo dello studio consiste nel calcolare il valore di efficienza delle barre di controllo in condizioni nominali considerando 8 differenti materiali assorbitori. I calcoli sono stati effettuati su un modello di assembly in geometria infinita considerando 4 differenti valori per il burn-up: 0, 20, 40, 60 GWd/t. Il valore di efficienza delle barre di controllo è calcolato mediante la formula:

$$W.E.=10^5 \left[ \frac{1}{K_{\infty(\text{control rod inserted})}} - \frac{1}{K_{\infty(\text{control rod not inserted})}} \right]$$

Per le barre di controllo sono stati selezionati i seguenti materiali con differenti caratteristiche di assorbimento dei neutroni che vanno a costituire 8 casi distinti di studio. I materiali assorbitori per le barre di controllo sono:

- AIC (Argento, Indio e Cadmio)
- Hf (Afnio)
- B<sub>4</sub>C (carburo di boro con 3 differenti frazioni in peso per il boro: 20%, 40%, 90%),
- B<sub>4</sub>C + Hf nella guaina (carburo di boro con 3 differenti frazioni in peso per il boro: 20%, 40%, 90% ed Afnio nella guaina)

In *Tab. 12* vengono riportati i risultati dell'efficienza delle barre di controllo nel caso di assembly con 20 barrette di veleni bruciabili. Il valore di efficienza delle barre di controllo aumenta con il burn-up del combustibile. Nel caso di combustibile fresco la reattività raggiunge il suo valore massimo mentre, per contro, l'efficienza delle barre di controllo raggiunge il minimo. Per questo motivo le analisi vengono condotte nello scenario più penalizzante per le barre di controllo che è dunque quello di burn-up pari a zero.

Naturalmente tanto migliore è l'efficienza delle barre di controllo quanto migliori sono le caratteristiche di assorbimento neutronico dei materiali in esse utilizzati. Calcolando ad esempio l'efficienza delle barre di controllo, allo stato BOI, utilizzando come materiale assorbitore l'AIC si ottiene un valore di efficienza pari a 24370 pcm. Se invece il materiale assorbitore viene sostituito con B<sub>4</sub>C, (con boro arricchito al 90%, ed afnio nel clad) si ottiene un'efficienza calcolata pari a: 52920 pcm.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Uno studio simile è stato condotto sia su assembly con 32 barrette di veleni bruciabili che su assembly senza barrette di gadolinio. Con riferimento ai risultati di Fig. 12, si può notare che nel caso di assembly senza barrette di veleni bruciabili si ha una diminuzione dell'efficienza valutabile tra i 700 ed i 2600 pcm. Nel caso di utilizzo di assembly con 32 barrette di veleno, l'efficienza aumenta tra 100 e 1500 pcm. (Il caso di riferimento rispetto al quale viene eseguito il confronto è quello di assembly a 20 barrette di gadolinio)

Il valore di efficienza del boro è stato calcolato su assembly in geometria infinita: con alcune approssimazioni è possibile ottenere una stima del valore di efficienza di tutte le barre di controllo nel nocciolo.

Per ottenere questa valutazione approssimata vengono calcolati alcuni "fattori di trasformazione" che permettono di passare dal *livello assembly* al *livello nocciolo*.

Prima di tutto bisogna considerare il numero di barre di controllo presenti nel nocciolo: nel modello di riferimento ci sono 36 RCCA attive (corrispondenti al 40% delle assembly del nocciolo) e 9 RCCA passive. Come secondo modello di calcolo invece possiamo considerare lo scenario in cui tutti gli RCCA siano attivi.

- Nel modello in cui vengono utilizzati solo 36 RCCA, il valore di efficienza di controllo calcolato nelle assembly deve essere moltiplicato per il fattore 0.404 ( $0.404=36/89$ ).
- Nel caso in cui tutti (attivi + passivi) i 45 RCCA vengono utilizzati, il valore di efficienza di controllo calcolato nelle assembly deve essere moltiplicato per il fattore 0.505 ( $0.505=45/89$ ).

Inoltre bisogna considerare un'ulteriore approssimazione. Il valore di efficienza deve essere valutato in uno stato intermedio tra lo stato HFP (Hot Full Power) e CZP (Cold Zero Power). Per cui va considerato un terzo "fattore di trasformazione". Il modo di procedere per il calcolo di questo terzo fattore è quello di calcolare l'efficienza negli stati CZP e HFP e poi dividere reciprocamente i valori calcolati. Per i due differenti scenari di nocciolo con 45 e 36 RCCA vengono perciò calcolati con questa metodologia due "fattori di trasformazione" pari a 0.82 e 0.6: per essere conservativi viene assunto il valore 0.6.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLIO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

*Utilizzando il "fattore di trasformazione" complessivo corrispondente a  $(0.505 \times 0.6)$  nel caso di nocciolo con 45 RCCA e  $(0.404 \times 0.6)$  nel caso di nocciolo con 36 RCCA è possibile ottenere in prima approssimazione il valore di efficienza delle barre di controllo sull'intero nocciolo. In Tab. 13 e Tab. 14 vengono riportati i risultati.*

*Un bilancio tra l'anti-reattività inserita dalle barre di controllo e la reattività positiva inserita nel nocciolo durante il transitorio dallo stato HFP allo stato CZP (cfr. Tab. 17) permette di identificare quale tipo di materiale deve essere utilizzato nel caso di 45 e 36 RCCA. La reattività positiva inserita nel nocciolo nella transizione dallo stato HFP allo stato CZP è di circa 11000 pcm. Nel caso vengano utilizzati solo 36 RCCA (cfr. 14), solo 3 soluzioni tra i materiali considerati per le barre di controllo hanno le caratteristiche per consentire di raggiungere adeguati margini di sottocriticità nello shutdown. Tuttavia anche con queste 3 soluzioni il margine di sottocriticità è comunque abbastanza ristretto (<1000 pcm anche nel caso in cui venga utilizzato il materiale con le migliori caratteristiche di assorbimento.*

*Questi calcoli, dimostrano quindi che per avere un margine accettabile (>2000 pcm), è richiesto un controllo delle assembly nel nocciolo almeno pari al 50%<sup>10</sup> e devono essere presi in considerazione solo materiali con alte caratteristiche di assorbimento (come ad esempio B<sub>4</sub>C con boro al 90%). I risultati vengono illustrati in Tab. 13.*

---

<sup>10</sup> Questo significa che la metà di tutte le assembly presenti nel nocciolo sono dotate di un cluster di barre di controllo (RCCA).

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

*Tabella 12 – Efficienza delle barre di controllo per assembly con 20 barrette di veleni bruciabili*

<b>Burn-up</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>
	<b>Efficienza</b>			
<b>AICN</b>	24372	28293	35197	44304
<b>HF</b>	26075	29931	36798	45697
<b>B4Cnat</b>	32426	37189	45557	56273
<b>B4Cint</b>	38029	43261	52536	64229
<b>B4Cenr</b>	45741	51558	61986	74551
<b>B4Cnat + Af</b>	41163	47108	57394	70334
<b>B4Cint + Af</b>	45823	52167	63182	76521
<b>B4enr + Af</b>	52924	59822	71861	83449

*Tabella 13 – Efficienza delle barre di controllo nel nocciolo con 45 RCCA*

<b>Burn-up</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>
	<b>Efficienza</b>			
<b>AICN</b>	7385	8573	10665	13424
<b>HF</b>	7901	9069	11150	13846
<b>B4Cnat</b>	9825	11268	13804	17051
<b>B4Cint</b>	11523	13108	15918	19461
<b>B4Cenr</b>	13860	15622	18782	22589
<b>B4Cnat + Af</b>	12472	14274	17390	21311
<b>B4Cint + Af</b>	13884	15807	19144	23186
<b>B4enr + Af</b>	16036	18126	21774	25285

*Tabella 14 – Efficienza delle barre di controllo nel nocciolo con 36 RCCA*

<b>Burn-up</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>
	<b>Efficienza</b>			
<b>AICN</b>	5908	6858	8532	10739
<b>HF</b>	6321	7255	8920	11077
<b>B4Cnat</b>	7860	9015	11043	13641
<b>B4Cint</b>	9218	10486	12735	15569
<b>B4Cenr</b>	11088	12498	15025	18071
<b>B4Cnat + Af</b>	9978	11419	13912	17049
<b>B4Cint + Af</b>	11107	12645	15315	18549
<b>B4enr + Af</b>	12829	14501	17419	20228

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Il secondo obiettivo di questo studio consiste nel calcolo del massimo fattore di picco all'interno dell'assembly a seguito dell'inserimento della barra di controllo. I calcoli sono stati effettuati considerando vari tipi di materiali assorbitori e considerando 4 valori per il burn-up. Viene anche investigato il caso di fattori di picco senza barre di controllo nell'assembly. Le assembly prese in considerazione sono:

- Assembly con 20 barrette di veleni bruciabili
- Assembly con 32 barrette di veleni bruciabili

I risultati sono riportati nelle Tab. 15 e 16. In generale l'assembly che presenta barre di controllo con maggiori caratteristiche di assorbimento è quello che presenta i maggiori fattori di picco. Inversamente, l'assembly senza barre di controllo è quello che presenta i fattori di picco più bassi tra tutti i modelli studiati.

Un confronto tra le Tab. 15 e 16 mostra che i valori di picco sono influenzati anche dal numero di barre di veleni bruciabili presenti nell'assembly: maggiore è il numero di barrette di veleni maggiori sono i fattori di picco. Nell' assembly con 20 barrette di gadolinio, ad un burn-up pari a 0 , il massimo fattore di picco è 1.447 (con barre di controllo con materiale assorbitore B<sub>4</sub>C e B<sub>10</sub> al 20%) mentre diventa 1.552 se l'assembly presenta 32 barrette di gadolinio (con barre di controllo con materiale assorbitore B<sub>4</sub>C e B<sub>10</sub> al 20%).

*Tabella 15 – Fattore di picco nell'assembly con 20 barrette di veleni bruciabili*

<i>Burn-up</i>	<i>0</i>	<i>20</i>	<i>40</i>	<i>60</i>
	<b>Fattori di picco nell' assembly</b>			
<i>No control rods</i>	1.253	1.204	1.193	1.180
<i>AICN</i>	1.382	1.293	1.289	1.283
<i>HF</i>	1.383	1.292	1.287	1.279
<i>B4Cnat</i>	1.447	1.354	1.353	1.348
<i>B4Cint</i>	1.475	1.378	1.374	1.368
<i>B4Cenr</i>	1.505	1.403	1.397	1.387
<i>B4Cnat + Af</i>	1.501	1.401	1.395	1.384
<i>B4Cint + Af</i>	1.522	1.419	1.412	1.399
<i>B4enr + Af</i>	1.549	1.441	1.431	1.412

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

*Tabella 16 - Fattore di picco nell'assembly con 32 barrette di veleni bruciabili*

<b>Burn-up</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>
	<b>Fattori di picco nell' assembly</b>			
<b>No control rods</b>	1.266	1.218	1.205	1.188
<b>AICN</b>	1.480	1.305	1.300	1.291
<b>HF</b>	1.484	1.304	1.298	1.287
<b>B4Cnat</b>	1.552	1.367	1.364	1.357
<b>B4Cint</b>	1.580	1.391	1.385	1.376
<b>B4Cenr</b>	1.612	1.416	1.408	1.395
<b>B4Cnat + Af</b>	1.604	1.414	1.406	1.393
<b>B4Cint + Af</b>	1.626	1.433	1.423	1.407
<b>B4enr + Af</b>	1.654	1.455	1.443	1.420

*5.3.4 Valutazione della reattività tra gli stati HFP e CZP*

E' stata valutata la reattività durante la transizione dallo stato HFP allo stato CZP: questa è la situazione più penalizzante per le barre di controllo.

La reattività totale inserita durante la transizione da HFP a CZP è dovuta alla somma di tre effetti:

- Effetto Doppler
- Coefficiente di temperature del moderatore
- Effetto dello xeno

Inoltre, al fine di eseguire una misura più precisa della reattività inserita, bisogna considerare l'effetto di non linearità della temperatura durante la transizione di stato. Per questo motivo vengono identificati due ulteriori stati intermedi chiamati HZPS (Hot Zero Power State) ed IZPS (Intermediate Zero Power State) che vengono inseriti tra gli stati HFP e CZP. In questo modo l'inserzione di reattività tra gli stati HFP e CZP è la somma dei seguenti stati intermedi:

HFP->HZPS    HZPS->IZPS    IZPS->CZP



**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Ogni transizione porta il suo contributo alla reattività totale inserita: il valore di reattività totale è dunque ottenuto come somma di tre stati intermedi. La reattività inserita viene calcolata a 4 differenti valori di burn-up: 0, 20, 40, 60 GWd/t.

La procedura qui descritta conduce ai valori presentati in Tab. 17:

*Tabella 17 – Reattività totale inserita nel nocciolo durante la transizione HFP-CZP*

<b>REATTIVITA' TOTALE (DOPPLER + Tmod+XENO)</b>	
<b>BURN-UP</b>	(pcm)
<b>0</b>	10873
<b>20</b>	9887
<b>40</b>	9081
<b>60</b>	5987

I valori riportati nella Tab. 17 sono i valori di reattività che le barre di controllo devono essere in grado di assorbire ad ogni livello di burn-up: la situazione maggiormente penalizzante è quella a burn-up pari a zero che corrisponde ad una reattività di 10873 pcm. Sulla base delle Tab 13, 14 e 17 è possibile valutare quale tipo di materiale assorbitore debba essere scelto per il controllo della reattività e per lo shutdown in sicurezza: le soluzioni accettabili sono evidenziate in giallo nelle Tab. 13 e 14.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

### *5.3.5 Conclusioni*

L'analisi di assembly condotta preliminarmente su un modello semplificato senza la presenza di barrette di veleni bruciabili ha evidenziato la necessità di implementare una strategia di gestione di veleni per controllare l'eccesso di reattività ad inizio ciclo. I calcoli hanno permesso di evidenziare che l'impatto della presenza di veleni sulla lunghezza di ciclo può essere parzialmente ridotto se nelle barrette di gadolinio viene assunto un valore di arricchimento per l' $UO_2$  pari a 2.5%.

La scelta del numero di barrette di veleni bruciabili è un compromesso tra il necessario controllo di eccesso di reattività da una parte e l'effetto di diminuzione della lunghezza di ciclo dall'altra. Le analisi hanno mostrato che il numero di barrette di veleni che massimizza i benefici in questo senso è pari a 20. Con tale numero di barrette si ottiene una sostanziale diminuzione del coefficiente di temperatura del moderatore nell'assembly e conseguentemente del boro critico richiesto. Inoltre nei calcoli di core sarà dimostrato che il valore del coefficiente di temperatura del moderatore è negativo come dimostrato nell'analisi di assembly se viene considerato anche il buckling geometrico ( $B_{2g}$ ).

In conclusione, lo studio di assembly ha permesso di selezionare principalmente due modelli con due strategie di caricamento differenti:

<u>4 cicli di ricarica:</u>	<u>Ciclo unico di ricarica:</u>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Arricchimento <math>UO_2</math>: 4.9%</li><li>▪ Numero barre di veleni: 20</li><li>▪ Arricchimento <math>UO_2</math> nelle barre di veleni: 2.5%</li><li>▪ Frazione di gadolinio: 8%</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Arricchimento <math>UO_2</math>: 4.9%</li><li>▪ Numero barre di veleni: 24</li><li>▪ Arricchimento <math>UO_2</math> nelle barre di veleni: 2.5%</li><li>▪ Frazione di gadolinio: 8%</li></ul>

## **6 ANALISI DEL NOCCIOLO DI EQUILIBRIO CON CRONOS2**

---

### **6.1 OBIETTIVI PER LO STUDIO DEL NOCCIOLO DI EQUILIBRIO**

L'analisi di assembly ha condotto ad identificare i parametri ottimali per i due modelli di caricamento ritenuti maggiormente interessanti. Le strategie di caricamento selezionate sono:

- a 4 cicli di ricarica
- a ciclo unico di ricarica

L'obiettivo di questa sezione dello studio è quello di analizzare le performance dei due modelli di nocciolo individuati con particolare attenzione a:

1. impatto sull'economia neutronica di due differenti riflettori radiali:
  - acqua (strato che circonda il nocciolo)
  - acciaio
2. valori del fattore di picco nel canale caldo ( $Fq$ ), del fattore di picco radiale ( $F_{xy}$ ), del fattore di picco assiale ( $F_z$ ), e dell'axial offset (AO) nel nocciolo.
3. impatto sui margini di shutdown nel caso di utilizzo di 3 differenti materiali assorbitori nelle barre di controllo. I materiali usati sono: B<sub>4</sub>C con B<sub>10</sub> al 20% (abbondanza naturale), B<sub>4</sub>C con B<sub>10</sub> arricchito al 40%, B<sub>4</sub>C con B<sub>10</sub> arricchito al 90% ed afnio nella guaina.
4. possibilità di prevedere un doppio sistema di barre di controllo. Il primo sistema è attivo ed è costituito da 36 cluster di barre di controllo manovrate da attuatori elettromeccanici. Il secondo sistema invece è passivo, costituito da 9 cluster di barre di controllo. Le barre vengono rilasciate per gravità nel nocciolo mediante un meccanismo che aziona lo sgancio semplicemente quando la temperatura del refrigerante raggiunge un prefissato valore: l'energia richiesta per il meccanismo di sgancio è quella rilasciata esclusivamente dall'espansione termica dei materiali.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

5. valutazione dei margini di shutdown per la transizione HFP → HZP ed HFP → CZP.

Come già ricordato, gli obiettivi fondamentali nella progettazione nucleare di un nocciolo consistono nella estensione della lunghezza di ciclo rispettando strettamente i margini di sicurezza. Con riferimento al nocciolo in equilibrio, i criteri di sicurezza che bisogna rispettare sono i seguenti:

- coefficienti neutronici negativi
- sufficienti margini di anti-reattività per la transizione HFP → HZP valutata a fine ciclo (EOC) e con barra di controllo più efficace estratta dal nocciolo.
- sufficienti margini di anti-reattività per la transizione HFP → CZP valutata a fine ciclo (EOC) e con barra di controllo più efficace estratta dal nocciolo.

Nella Tab. 18 vengono riportati le definizioni per vari stati in cui il nocciolo si trova ad operare.

*Tabella 18 – Definizione delle condizioni operative per il nocciolo*

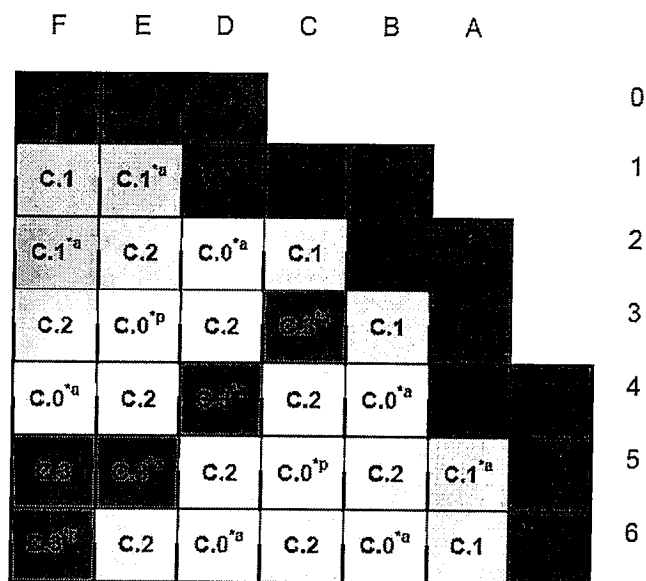
	REFUELLING (CZP)	INTERMEDIAT E ZERO POWER (IZP)	HOT ZERO POWER (HZP)	HOT FULL POWER (HFP)
Potenza (% di potenza nominale)	~0% PN	~0% PN	~0% PN	100% PN
K-INF	≤ 0.90	≤ 0.97	≤ 0.99	1
Temperatura combustibile	30-35 °C	130 °C	214 °C	552 °C
Temperatura moderatore	30-35 °C	130 °C	214 °C	214 °C
Pressione	atmosferica	~20 bar	75 bar	75 bar

Nel seguito viene anche utilizzata l'espressione "condizioni isoterme": con essa si fa riferimento allo stato HZP, durante il quale la temperatura del combustibile è uguale a quella del moderatore (214 °C).

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

**6.2 GESTIONE DEL NOCCIOLO A 4 CICLI DI RICARICA: ANALISI DEL CORE**

La mappa di caricamento del nocciolo a 4 cicli di ricarica viene mostrato in Fig. 8. L'assembly siglato "C.0" contiene combustibile fresco, l'assembly siglato "C.1" è stato già irradiato una volta, "C.2" due volte e "C.3" tre volte. Le assembly evidenziate con una mesh a punti (nella sigla compare il simbolo \*) corrispondono alle posizioni nelle quali vengono inseriti i cluster di barre di controllo. Questa disposizione delle assembly nel nocciolo permette di avere una distribuzione uniforme di potenza e di conseguenza conduce a fattori di picco più bassi.



*Figura 8 – Core a 4 cicli di ricarica: mappa di caricamento (\*<sup>a</sup> RCCA attivi, \*<sup>p</sup> RCCA passivi)*

Con questo modello di caricamento, sono stati eseguiti due calcoli preliminari per stabilire l'impatto sull'economia neutronica dovuto a due differenti riflettori:

- acqua (strato che circonda il nocciolo)
- riflettore in acciaio

La valutazione è stata condotta confrontando i risultati, in termini di: fattore di picco nel canale caldo ( $Fq$ ), fattore di picco radiale ( $F_{xy}$ ), fattore di picco assiale ( $Fz$ ) ed axial offset ( $AO$ ).

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

I risultati ottenuti sono riportati nelle *Fig. 9 e 10*. Come mostrato in *Fig. 9* il fattore di picco nel canale caldo ( $F_q$ ) è compreso, nel caso di riflettore costituito da acqua, tra 2.35 e 2.98 mentre nel caso di riflettore in acciaio è compreso tra 2.2 and 2.7. L'impatto del riflettore radiale in acciaio può essere anche analizzato in termini di axial offset<sup>11</sup>. I risultati mostrano che nel caso di riflettore radiale costituito dallo strato di acqua, l' axial offset varia tra -5% e +3%. Nel caso di riflettore in acciaio il campo di variabilità è tra -5% and +2%. La variazione dell' axial offset con il burn-up viene riportato in *Fig. 9 e Fig. 10* ed ha il tipico andamento dei PWRs: anche in questo caso la soluzione di riflettore in acciaio è quella preferibile dato che riduce il campo di variabilità dell' A.O.<sup>12</sup>

Sulla base delle considerazioni precedenti si assume quindi di utilizzare un riflettore in acciaio.

Inoltre ci sono altri aspetti che fanno vedere con interesse proprio all'acciaio:

- basso costo del materiale ( se confrontato con altri materiali potenzialmente utilizzabili come nel caso del rame)
- assenza di effetti di swelling sotto alti tassi di irraggiamento (tipico è ad esempio il caso del berillio)

---

<sup>11</sup> Considerando il nocciolo diviso in due parti simmetriche da un piano che lo taglia nel punto mediano, l' axial offset è definito come:

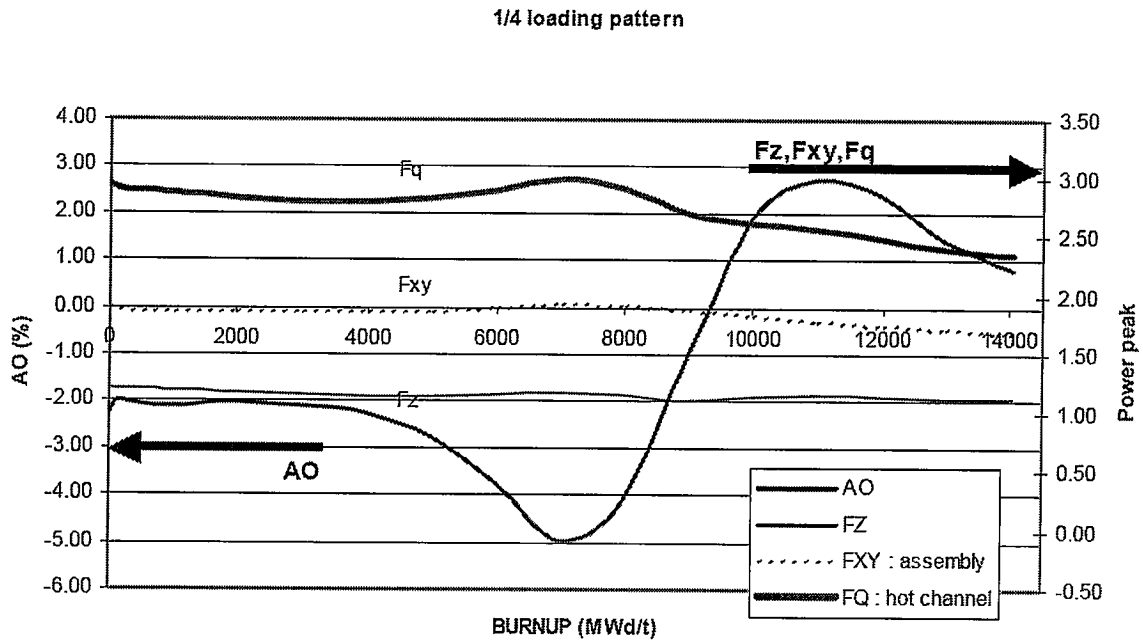
$$A.O. = (P_{up} - P_{down}) / P_{tot.}$$

Dove  $P_{up}$  è la potenza prodotta nella metà superiore del core e  $P_{down}$  quella prodotta nella parte inferiore.

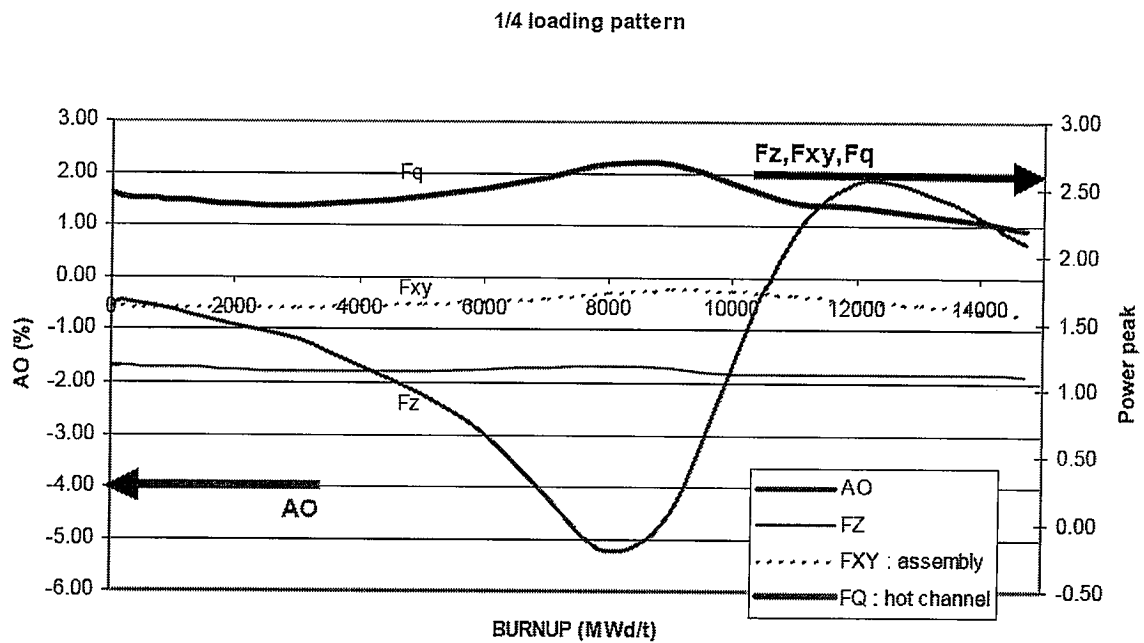
<sup>12</sup>

Ad inizio vita la potenza viene prodotta maggiormente nella parte inferiore del nocciolo a causa della sovra-moderazione in questa zona: questo è il motivo dei valori negativi per l' axial offset ad inizio vita. Tuttavia la sovra-moderazione di questa zona produce un più rapido bruciamento del combustibile presente nella metà inferiore rispetto a quello presente nella parte superiore del nocciolo. Durante l'irraggiamento, l'effetto globale dovuto a questo tasso di bruciamento differenziato si traduce in un progressivo spostamento verso l'alto, lungo l'asse z, della regione di "hot spot" in cui viene prodotta la massima potenza. Nei reattori commerciali, una strategia di spostamento delle barre di controllo di regolazione della distribuzione assiale del flusso permette di rendere costante il valore dell'axial offset durante la vita del nocciolo.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO DI IRRAGGIAMENTO**



*Figura 9 - Nocciolo con riflettore radiale costituito da strato di acqua*



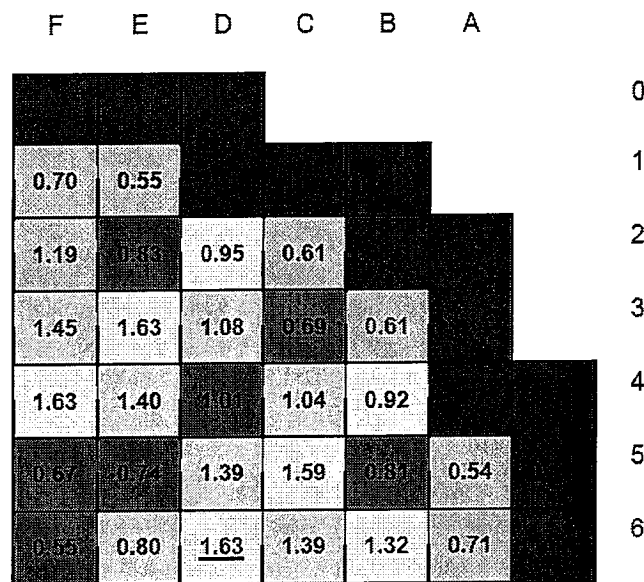
*Figura 10 - Nocciolo con riflettore radiale in acciaio*

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

*6.2.1 Distribuzione di potenza radiale a BOC e EOC*

Nelle *Fig. 11* e *12* vengono presentate le mappe di distribuzione della potenza radiale a BOC ed EOC. Ad inizio ciclo (BOC), l'assembly termicamente più stressato è posizionato nel nocciolo alle coordinate D6 ed F4. Il valore massimo dell'  $F_{xy}$  (questi valori corrispondono al fattore di picco radiale nell'assembly) è 1.63. A fine ciclo (EOC) il valore massimo dell'  $F_{xy}$  è posizionato nelle coordinate E5 con un valore pari a 1.57.

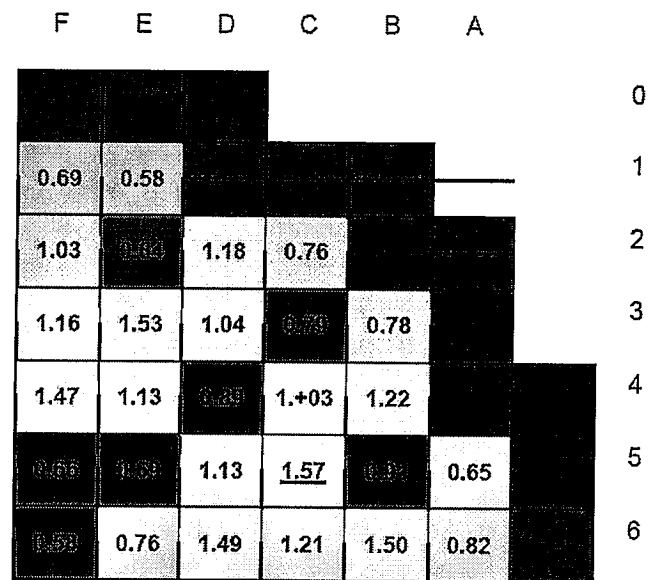
L'andamento dei valori assunti da  $F_{xy}$  in funzione del burnup è stato già illustrato in *Fig. 10*. Il fattore di picco del canale caldo ( $F_q$ ), varia in un campo tra 2,2 e 2,7.



*Figura 11- Core a 4 cicli di ricarica: distribuzione della potenza radiale a BOC*



**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**



*Figura 12 - Core a 4 cicli di ricarica: distribuzione della potenza radiale ad EOC*

### 6.2.2 Distribuzione radiale del burn-up nel nocciolo a BOC ed EOC

Le mappe della distribuzione del burn-up ottenute a BOC ed EOC sono riportate in *Fig. 13 e 14*. Con questa configurazione, si può ottenere un burn-up vicino ai 60 GWd/t utilizzando un solo tipo di assembly: tale burn-up corrisponde ad una lunghezza di ciclo di circa 600 EFPD. Dai risultati deriva che i valori calcolati nell'analisi di nocciolo sono diversi da quelli calcolati nell'analisi parametrica dell'elemento di combustibile in geometria infinita (48 GWd/t e 581 EFPD). Il motivo è dovuto al fatto che nell'analisi di assembly erano state fatte delle assunzioni diverse per quanto riguarda leakage e diluizione di boro da quelle effettivamente calcolate in questa seconda parte dello studio<sup>13</sup>.

Il burn-up medio per ogni ciclo di irraggiamento è:

- 18 GWd/t per assembly irraggiati 1 volta
- 32 GWd/t per assembly irraggiati 2 volte
- 49 GWd/t per assembly irraggiati 3 volte
- 60 GWd/t per assembly irraggiati 4 volte

<sup>13</sup> Assunzioni per l'analisi di assembly: leakage 4000 pcm, concentrazione di boro critica a BOI: 700 ppm  
Valori calcolati nell'analisi di core: leakage 5000 pcm, concentrazione di boro critica ad BOI: 900 ppm

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

	F	E	D	C	B	A	
							0
	23145	23292					1
	23057	46720	0	15393			2
	32906	0	31089	43843	14751		3
	0	24645	46348	33208	0		4
	51918	53352	25031	0	43424	24324	5
	47667	40308	0	35637	0	24126	6

*Figura 13 - Core a 4 cicli di ricarica: distribuzione di burn-up radiale a BOC*

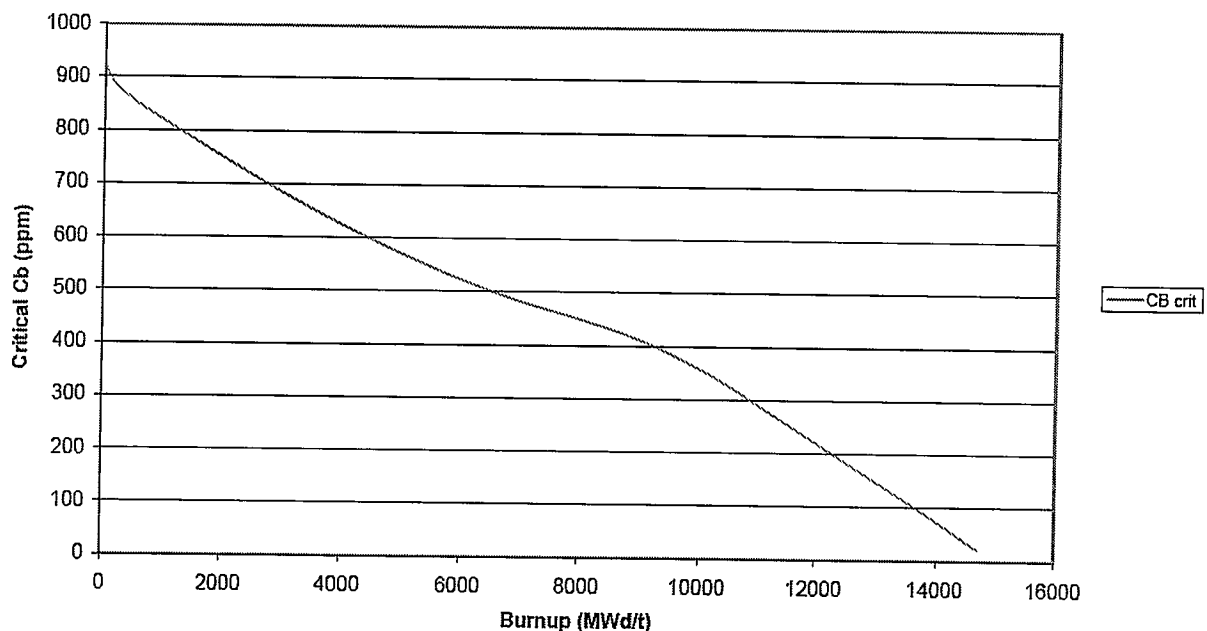
	F	E	D	C	B	A	
							0
	33035	31260					1
	39007	38419	14820	25069			2
	51953	23381	46413	5460	24737		3
	23213	43234	5727	48431	15366		4
	61778	65967	43922	24280	63290	33176	5
	66355	51903	24071	55350	21528	35601	6

*Figura 14 - Core a 4 cicli di ricarica: distribuzione di burn-up radiale ad EOC*

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

*6.2.3 Concentrazione di boro critica*

La concentrazione di boro critica durante l'irraggiamento viene graficata in *Fig. 15*. All'inizio del ciclo, la concentrazione di boro critica è di circa 900 ppm e decresce costantemente fino a 20 ppm: questo valore minimo definisce lo stato di EOC.



*Figura 15 - Core a 4 cicli: concentrazione di boro critica*

*6.2.4 Coefficienti neutronici*

Come già più volte ricordato il progetto del nocciolo deve garantire che i coefficienti neutronici rispettino i requisiti di sicurezza: per essi il valore deve mantenersi negativo. Il calcolo dei coefficienti neutronici viene eseguito variando la temperatura del moderatore, la temperatura del combustibile, la concentrazione di boro, e la potenza del nocciolo. I calcoli sono stati eseguiti considerando le barre di controllo estratte dal nocciolo.

Con riferimento ad una generica variabile  $x$  (fissata la definizione di reattività in termini di:  $\rho = (K_{eff} - 1) / K_{eff}$ ), i coefficienti neutronici vengono calcolati sulla base della seguente formula:

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

$$\alpha_x = \Delta\rho/\Delta x$$

nella quale  $\Delta\rho$  è la reattività totale dovuta alla variazione nel parametro  $x$  e  $\Delta x$  è la differenza tra i due valori assunti dal parametro nei due stati in considerazione. I valori dei coefficienti neutronici sono espressi in pcm:  $1 \text{ pcm} = 10^{-5} (\Delta K/K)$ .

Per una generica variabile  $x$  possiamo così scrivere la formula che permette di calcolare i coefficienti neutronici. Considerando la transizione tra due valori per la variabile  $x$ :  $x_1$  ed  $x_2$ , per la reattività potremo scrivere:

$$\Delta\rho = (1/K_{\text{eff}_x2}) - (1/K_{\text{eff}_x1})$$

E per il coefficiente neutronico relativo alla variabile  $x$  generica allora la forma definitiva sarà:

$$\alpha_{x_1 \rightarrow x_2} = ((1/K_{\text{eff}_x2}) - (1/K_{\text{eff}_x1})) / \Delta x$$

Questa formula permette di calcolare i diversi coefficienti neutronici: la variabile  $x$ , a seconda del caso in considerazione sarà: la temperatura del combustibile, la temperatura del moderatore, la concentrazione di boro ed il valore di potenza del nocciolo.

#### *6.2.4.1 Coefficienti neutronici in condizioni isoterme*

Al fine di rispettare i criteri di sicurezza è necessario verificare che in condizioni isoterme (ovvero quando la temperatura del combustibile e del moderatore è la stessa ed è pari a 214 °C) tutti i coefficienti neutronici siano negativi. Le verifiche conducono ai risultati della *Tab. 19* che sono compatibili con quelli tipici di un PWR standard. I coefficienti neutronici in condizioni isoterme sono sempre negativi.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

*Tabella 19 - Core a 4 cicli: coefficienti neutronici in condizioni isoterme*

<b>Coefficienti neutronici</b>	<b>BOC</b>	<b>EOC</b>
$\alpha_{boron}$ (pcm/ppm)	-9.90	-23.94
$\alpha_{doppler}$ (pcm/°C)	-2.88	-2.25
$\alpha_{mod}$ (pcm/°C)	-8	-9.74

*6.2.4.2 Coefficienti neutronici in condizioni operative*

I valori dei coefficienti neutronici sono stati valutati anche in condizioni nominali, ovvero con reattore in equilibrio ed in evoluzione di burn-up.

Sono stati calcolati i seguenti coefficienti neutronici:

- Efficacia del boro (pcm/ppm)
- Coefficiente Doppler dovuto a variazione di potenza (pcm/% nominal power)
- Coefficiente Doppler dovuto a variazione della temperatura del combustibile (pcm/°C)
- Coefficiente di temperatura del combustibile (pcm/°C)
- Coefficiente del moderatore dovuto a variazione di potenza (pcm/% nominal power)
- Coefficiente di potenza (pcm/% nominal power)

Questi coefficienti sono stati calcolati sotto le seguenti condizioni:

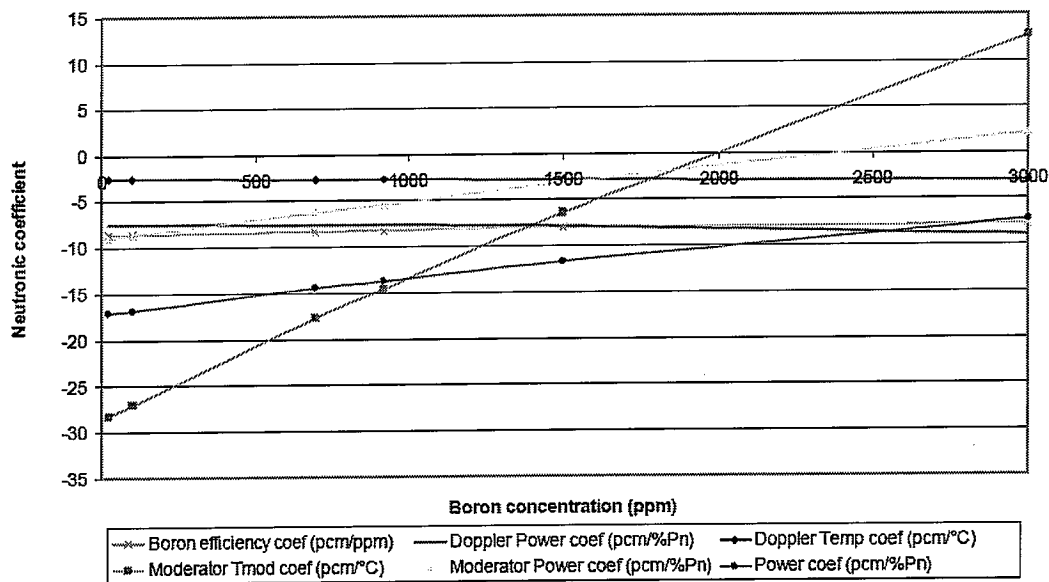
1. Con xeno all'equilibrio in funzione della concentrazione di boro per due casi: ad inizio (BOI) ed a fine ciclo (EOI).
2. Con xeno pari a zero in funzione della concentrazione di boro per due casi: ad inizio (BOI) ed a fine ciclo (EOI).
3. Con xeno all'equilibrio in funzione del burn-up

I risultati sono presentati nelle *Fig. da 16 a 20*. Dall'analisi dei risultati deriva che il coefficiente di temperatura del moderatore diventa positivo quando il valore di concentrazione di boro supera i 2000 ppm. Anche il coefficiente del moderatore dovuto a variazioni di potenza del nocciolo diventa positivo al di sopra di un valore di concentrazione del boro pari a 2450 ppm mantenendosi tuttavia a valori molto prossimi a zero.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

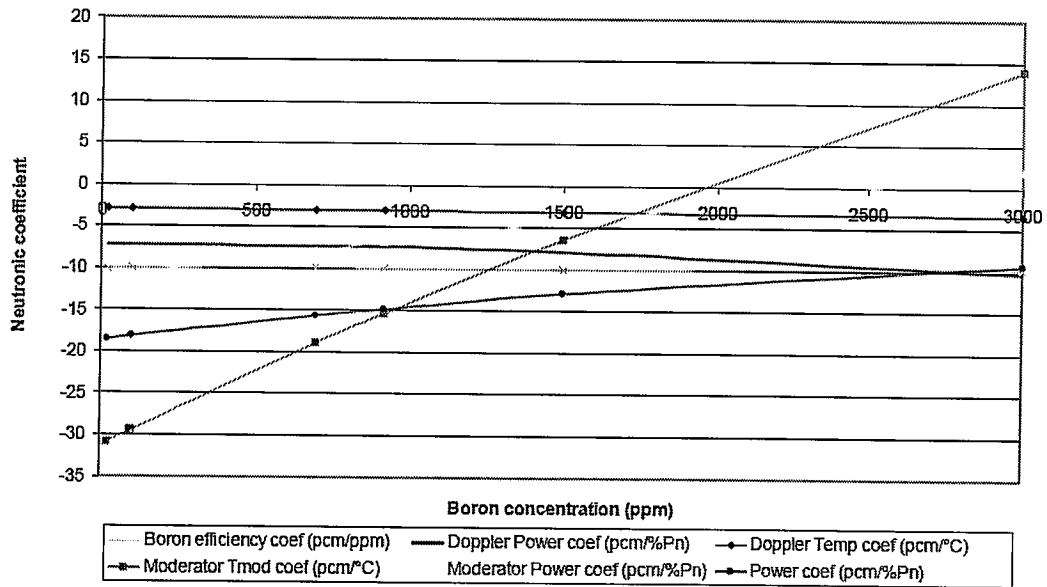
Tuttavia, come già mostrato, il valore di concentrazione critica per questo modello di nocciolo è 900 ppm ed a questo valore di concentrazione tutti i coefficienti sono abbondantemente negativi.

La variazione dei coefficienti neutronici con il burn-up (considerando lo xeno all'equilibrio) viene illustrato in *Fig. 20*. In questo caso i valori di concentrazione di boro sono quelli critici richiesti in funzione del burn-up. I risultati mostrano che il coefficiente di temperatura del moderatore ed il coefficiente del moderatore dovuto a variazioni di potenza sono negativi a BOI e decrescono durante l'irraggiamento.

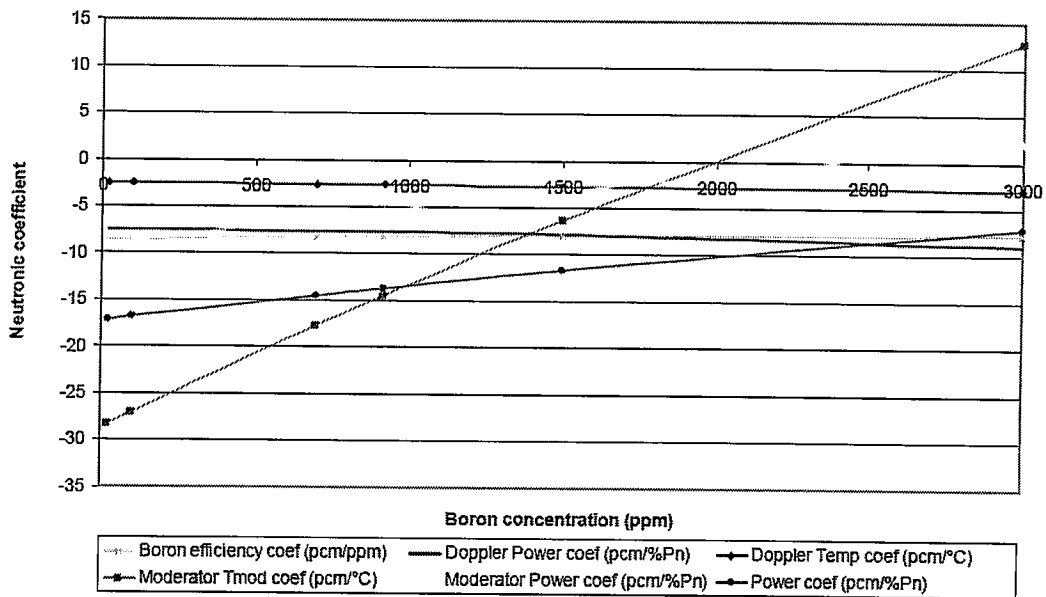


*Figura 16 – Core a 4 cicli: coefficienti neutronici a BOI e Xe all'equilibrio*

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO DI IRRAGGIAMENTO**

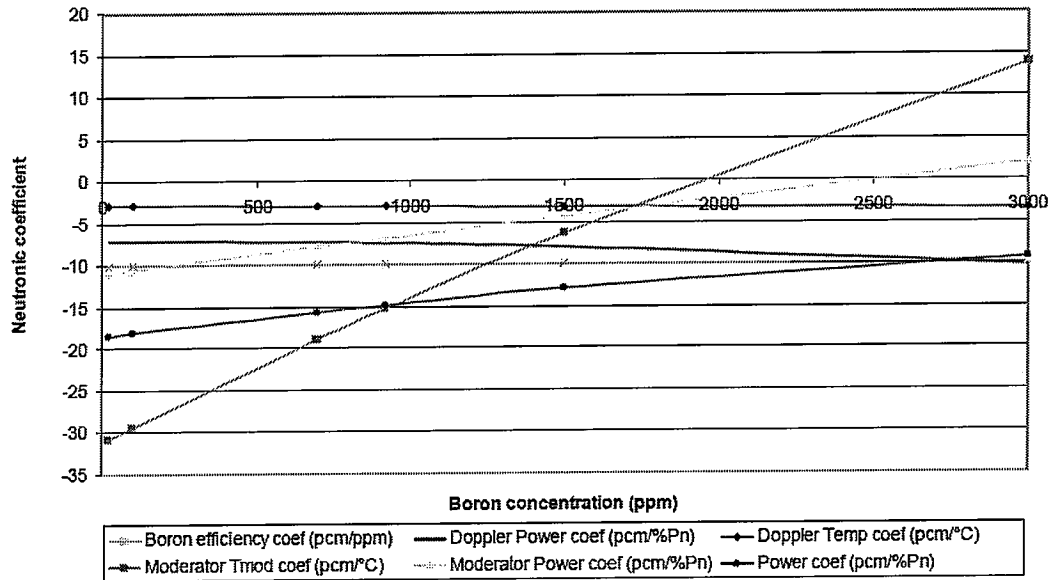


*Figura 17 - Core a 4 cicli: coefficienti neutronici a EOI e Xe all'equilibrio*

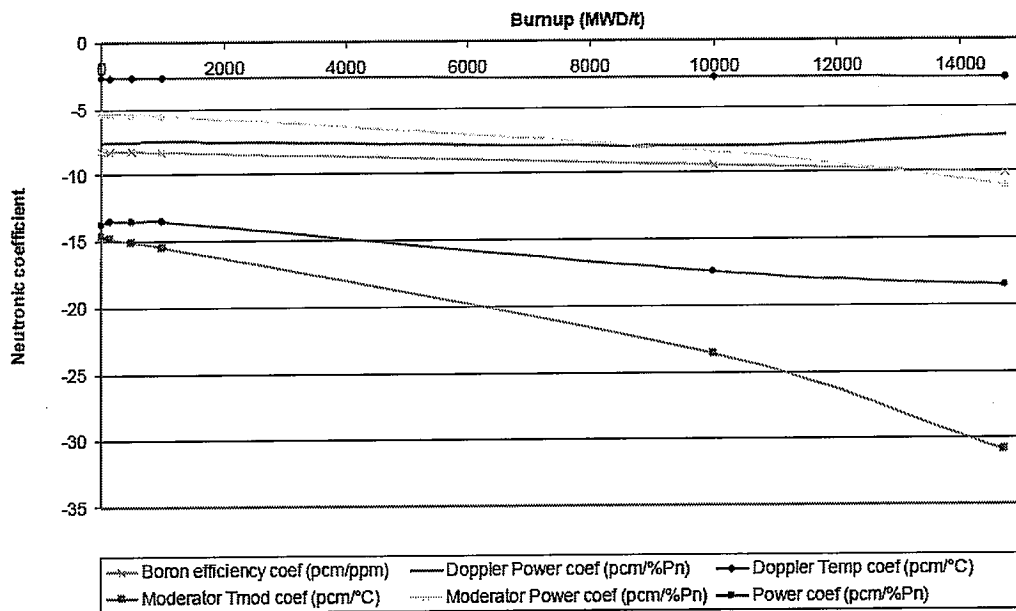


*Figura 18 - Core a 4 cicli: coefficienti neutronici a BOI in assenza di Xe*

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO DI IRRAGGIAMENTO**



*Figura 19 - Core a 4 cicli: coefficienti neutronici a EOI in assenza di Xe*



*Figura 20 - Core a 4 cicli: coefficienti neutronici in funzione del burn-up*



**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

*6.2.5 Margini di shutdown del nocciolo calcolati allo stato hot zero power (HZZP)*

I margini di shutdown devono essere sufficienti a garantire la sottocriticità nella transizione HFP -> HZZP. I calcoli sono stati eseguiti considerando diversi aspetti:

**1. Le condizioni operative del nocciolo**

Un criterio standard utilizzato per i PWRs richiede di raggiungere la sottocriticità nella transizione da HFP a HZZP con un margine di anti-reattività superiore a 1700 pcm dopo che le barre di controllo sono state inserite.

Questo criterio deve essere rispettato considerando ulteriori aspetti. Inanzitutto la barra di controllo a maggior contributo viene considerata bloccata all'esterno del nocciolo, inoltre il valore così calcolato viene ulteriormente diminuito del 10%. Per essere ulteriormente conservativi, viene valutata un'incertezza pari a 1500 pcm come misura cumulativa di tutte le approssimazioni introdotte nel modello di calcolo. Il bilancio tra la reattività negativa introdotta dalle barre di controllo e la reattività positiva inserita nel nocciolo dovuta alla variazione di potenza deve verificare il margine dei 1700 pcm.

**2. Il numero di cluster di barre di controllo.**

L'obiettivo è quello di valutare i margini di shutdown considerando due diverse situazioni. Nel primo caso vengono considerati 36 cluster di barre di controllo che corrisponde ad un controllo del 40% delle assembly nel nocciolo. Nel secondo caso vengono considerati 45 cluster di barre di controllo che corrispondono al controllo del 50% delle assembly del nocciolo. Il motivo di questi due casi risiede nella possibilità di valutare l'opportunità di implementare nel nocciolo un sistema di barre di controllo passivo costituito da 9 RCCA.

**3. Tipi di materiali assorbitori nelle barre di controllo**

I margini di shutdown sono stati valutati con barre di controllo costituite dai seguenti materiali assorbitori:

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

- B<sub>4</sub>C: con B<sub>10</sub> in concentrazione naturale, 20%
- B<sub>4</sub>C: con B<sub>10</sub> in concentrazione 40%
- B<sub>4</sub>C: con B<sub>10</sub> in concentrazione 90% ed afnio nella guaina

Il criterio standard consiste nel calcolare i margini di shutdown considerando la transizione da HFP a HZP a fine ciclo (EOI), quando il valore di concentrazione di boro nel moderatore è praticamente zero (~20 ppm).

Maggiori sono le caratteristiche di assorbimento nel materiale delle barre di controllo maggiore è il guadagno in termini di margini di sicurezza.

Nel caso di 36 RCCA i margini di shutdown sono : 3457, 3706, 4132 pcm rispettivamente nel caso di barre di controllo con:

- B<sub>4</sub>C: con B<sub>10</sub> in concentrazione naturale, 20%
- B<sub>4</sub>C: con B<sub>10</sub> in concentrazione 40%
- B<sub>4</sub>C: con B<sub>10</sub> in concentrazione 90% ed afnio nella guaina

I risultati completi sono riportati in Tab. 20.

Nel caso invece di 45 RCCA i margini di shutdown sono rispettivamente 7090, 7595 e 8518 pcm con la stessa sequenza di materiali assorbitori riportata precedentemente. I risultati completi sono riportati in Tab. 21.

I risultati dimostrano che è possibile ottenere un nocciolo sottocritico nella transizione HFP -> HZP preservando il criterio dei 1700 pcm con margine accettabile.

Tuttavia è stato utilizzato anche un'altro criterio molto più penalizzante che prende in considerazione la transizione HFP -> CZP, a fine ciclo (EOI). Anche in questo caso è possibile ottenere un nocciolo sottocritico ma solo nel caso di utilizzo di 45 RCCA: i margini di shutdown sono in questo caso 1975, 2330 e 2990 pcm rispettivamente. Pur essendo molto più bassi permettono comunque di rispettare il criterio dei 1700 pcm. I risultati sono riportati in Tab 22.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

*Tabella 20 – Core a 4 cicli: margini di shutdown ad HZP con 36 RCCA attive*

Margini di Shutdown / HZP ad EOC	B4C	B4C 40%	B4C 90% + Hf
N (Barre tutte inserite)	8844	9365	10348
Barra estratta	1307	1551	2056
Posizione barra estratta	C3	C3	C3
(N-1)-10%	6783	7032	7458
Power defect	1826	1826	1826
Incertezze	1500	1500	1500
<b>Bilancio (pcm) 214°C</b>	<b>3457</b>	<b>3706</b>	<b>4132</b>

*Tabella 21 - Core a 4 cicli: margini di shutdown ad HZP con 45 RCCA attive*

Margini di Shutdown / HZP ad EOC	B4C	B4C 40%	B4C 90% + Hf
N (Barre tutte inserite)	17093	18893	22595
Barra estratta	5520	6758	9434
Posizione barra estratta	D2	D2	D2
(N-1)-10%	10416	10921	11844
Power defect	1826	1826	1826
Incertezze	1500	1500	1500
<b>Bilancio (pcm) 214°C</b>	<b>7090</b>	<b>7595</b>	<b>8518</b>

*Tabella 22 - Core a 4 cicli: margini di shutdown ad CZP con 45 RCCA attive*

Margini di Shutdown / CZP ad EOC	B4C	B4C 40%	B4C 90% + Hf
N (Barre tutte inserite)	15461	16961	20072
Barra estratta	6020	7126	9504
Posizione barra estratta	D2	D2	D2
(N-1)-10%	8496	8851	9511
Power defect	5021	5021	5021
Incertezze	1500	1500	1500
<b>Bilancio (pcm) 40°C</b>	<b>1975</b>	<b>2330</b>	<b>2990</b>

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

### *6.2.6 Conclusioni*

Il nocciolo a 4 cicli di ricarica del combustibile utilizza esclusivamente un unico tipo di assembly con le seguenti caratteristiche:

- Arricchimento  $UO_2$ : 4.9%
- Numero barre di veleni: 20
- Arricchimento  $UO_2$  nelle barre di veleni: 2.5%
- Frazione di gadolinio: 8%

I calcoli hanno dimostrato che questo modello di nocciolo presenta ottime caratteristiche di efficienza: il burn-up medio allo scarico è pari a circa 60 GWd/t. Ad inizio ciclo la concentrazione di boro critica richiesta è 900 ppm.

Relativamente alla stabilità del nocciolo in termini di feedback a variazioni della potenza, è stato provato che tutti i coefficienti neutronici risultano negativi sia in condizioni isoterme che in condizioni di potenza nominale.

Relativamente ai margini di shutdown a HZP, il criterio di margine di 1700 pcm viene rispettato anche nel caso di utilizzo (come materiale assorbitore per le barre di controllo) di  $B_4C$  con concentrazione di  $B_{10}$  al 20%, sia con 36 che con 45 cluster di barre di controllo. Con materiali assorbitori più efficienti i margini di sicurezza risultano più ampi. Anche considerando un criterio più penalizzante che consiste nel calcolare i margini di reattività nella transizione di potenza da HFP a CZP, si dimostra che utilizzando 45 cluster di barre di controllo è possibile ottenere un nocciolo sottocritico con una riserva di reattività negativa superiore a 1700 pcm.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

**6.3 GESTIONE DEL NOCCIOLO A CICLO UNICO: ANALISI DEL CORE**

La mappa di caricamento del nocciolo con ciclo unico viene riportata in *Fig. 21*. Con questo tipo di soluzione non è previsto alcun tipo di reshuffling delle assembly durante tutta la vita del nocciolo. Nella *Fig. 21* vengono riportate con un'asterisco (\*) le posizioni in cui si inseriscono i cluster di barre di controllo. (RCCA).

	F	E	D	C	B	A	
							0
	C.0	C.0 <sup>*a</sup>					1
	C.0 <sup>*a</sup>	C.0	C.0 <sup>*a</sup>	C.0			2
	C.0	C.0 <sup>*b</sup>	C.0	C.0 <sup>*a</sup>	C.0		3
	C.0 <sup>*a</sup>	C.0	C.0 <sup>*a</sup>	C.0	C.0 <sup>*a</sup>		4
	C.0	C.0 <sup>*b</sup>	C.0	C.0 <sup>*b</sup>	C.0	C.0 <sup>*a</sup>	5
	C.0 <sup>*b</sup>	C.0	C.0 <sup>*a</sup>	C.0	C.0 <sup>*a</sup>	C.0	6

*Figura 21 – Core a ciclo unico di ricarica: mappa di caricamento (\*a RCCA attivi, \*b RCCA passivi)*

Le caratteristiche principali delle assembly di questo modello di nocciolo sono qui brevemente richiamate:

- Arricchimento in UO<sub>2</sub>: 4.9%
- Numero di barre di veleni: 24
- Arricchimento in UO<sub>2</sub> nelle barre di veleni: 2.5%
- Frazione in peso di gadolinio: 8%

*Lo studio di un nocciolo a ciclo unico di ricarica è stato intrapreso perchè con un modello di questo tipo è possibile semplificare al massimo la gestione del combustibile: infatti il*

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

combustibile dopo essere stato caricato nel nocciolo non dovrà più essere spostato fino a fine vita.

Tuttavia questa grande semplificazione in termini di gestione riduce la capacità di sfruttamento del combustibile: con questo modello di nocciolo è possibile infatti raggiungere i 37 GWd/t.

Tuttavia anche se questo modello di nocciolo non presenta un elevato sfruttamento del combustibile, risulta d'altra parte interessante per due aspetti principali:

- il reattore eroga energia senza arresto intermedio per refuelling quindi si ha un maggiore fattore di disponibilità e,
- di conseguenza, il reattore ha caratteristiche intrinseche di non proliferazione.

La metodologia di calcolo è la stessa utilizzata per il nocciolo a 4 cicli di ricarica. Inoltre anche nel modello di nocciolo a ciclo unico è stato scelto di utilizzare un riflettore in acciaio.

### *6.3.1 Distribuzione di potenza radiale a BOI ed EOI*

Nelle Fig. 22 e 23 vengono mostrate le distribuzioni radiali di potenza nel nocciolo ad inizio e fine irraggiamento (BOI, EOI). La posizione dell' assembly dove viene prodotta la massima potenza è la F6 a BOI e B6 a EOI: il valore del fattore di picco radiale ( $F_{xy}$ ) è 1,81 a BOI e 1,14 ad EOI.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

	F	E	D	C	B	A	
							0
	0,46	0,38					1
	0,90	0,82	0,63	0,40			2
	1,28	1,22	1,04	0,76	0,40		3
	1,58	1,52	1,34	1,04	0,63		4
	1,75	1,69	1,52	1,22	0,82	0,38	5
	<u>1,81</u>	1,75	1,58	1,28	0,90	0,46	6

*Figura 22 – Core a ciclo unico: distribuzione radiale di potenza a BOI*

	F	E	D	C	B	A	
							0
	1,00	0,86					1
	<u>1,14</u>	1,11	1,00	0,84			2
	1,04	1,06	1,09	1,10	0,84		3
	0,97	0,98	1,03	1,09	1,00		4
	0,93	0,94	0,98	1,06	1,11	0,86	5
	0,92	0,93	0,97	1,04	<u>1,14</u>	1,00	6

*Figura 23 - Core a ciclo unico: distribuzione radiale di potenza a EOI*

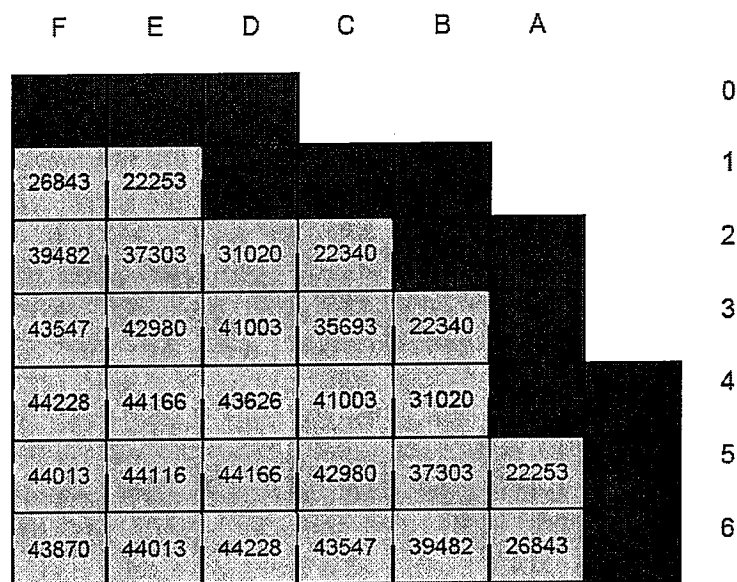
### 6.3.2 Distribuzione radiale del burn-up ad EOI

La distribuzione di burn-up per assembly ad EOI viene mostrata nella Fig. 24 Il valore medio di burn-up allo scarico è circa 37 GWd/t che corrisponde ad una lunghezza di vita di circa 1490

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

EFPD. Nell'analisi parametrica dell'elemento di combustibile per questo modello di calcolo si era ottenuto: circa 30 GWd/t e 1400 EFPD: la differenza è da imputare al differente valore di leakage utilizzato nei due calcoli.

Bisogna notare che il valore del leakage, calcolato nell' analisi del nocciolo con ciclo unico di ricarica, aumenta col burn-up: il suo valore passa da 2500 pcm a 6100 pcm ad EOI. Nell' analisi di assembly invece, ricordiamo che tale valore è stato assunto pari a 4000 pcm. Questa differenza nell'assunzione del leakage è alla base della piccola differenza di burn-up allo scarico, ottenuto nei due studi di assembly e di core.



*Figura 24 - Core a ciclo unico: distribuzione radiale di burn-up ad EOI*

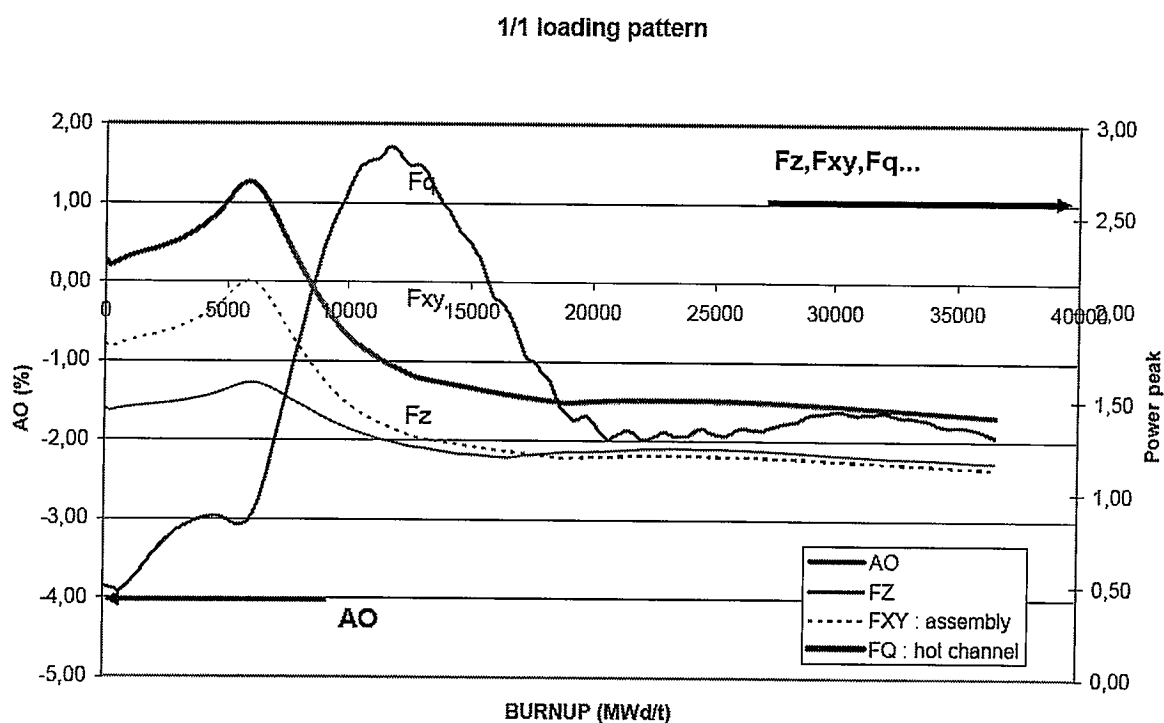
*6.3.3 Fattori di picco  $F_q$ ,  $F_{xy}$  e  $F_z$  ed axial offset (AO) nel nocciolo*

I principali fattori di picco nel nocciolo e l'axial offset vengono mostrati nella Fig. 25. Il fattore di picco nel canale caldo ( $F_q$ ) varia tra 1.42 e 2.67. Il suo minimo viene raggiunto quando il burn-up è ad un valore di circa 6 GWd/t. Al di sopra dei 15 GWd/t, esso diventa abbastanza piatto con valori pari a circa 1,5. Il fattore di picco radiale invece varia tra 1 e 2.



**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO DI IRRAGGIAMENTO**

Il fattore di picco nel canale caldo ( $F_q$ ) viene calcolato come prodotto tra il fattore di picco nell'assembly (che in questo caso è pari a 1,25) ed il massimo  $F_{xy}$ . Durante l'irraggiamento il fattore di picco assiale resta abbastanza contenuto. L'axial offset (AO) varia -4% and +2%.

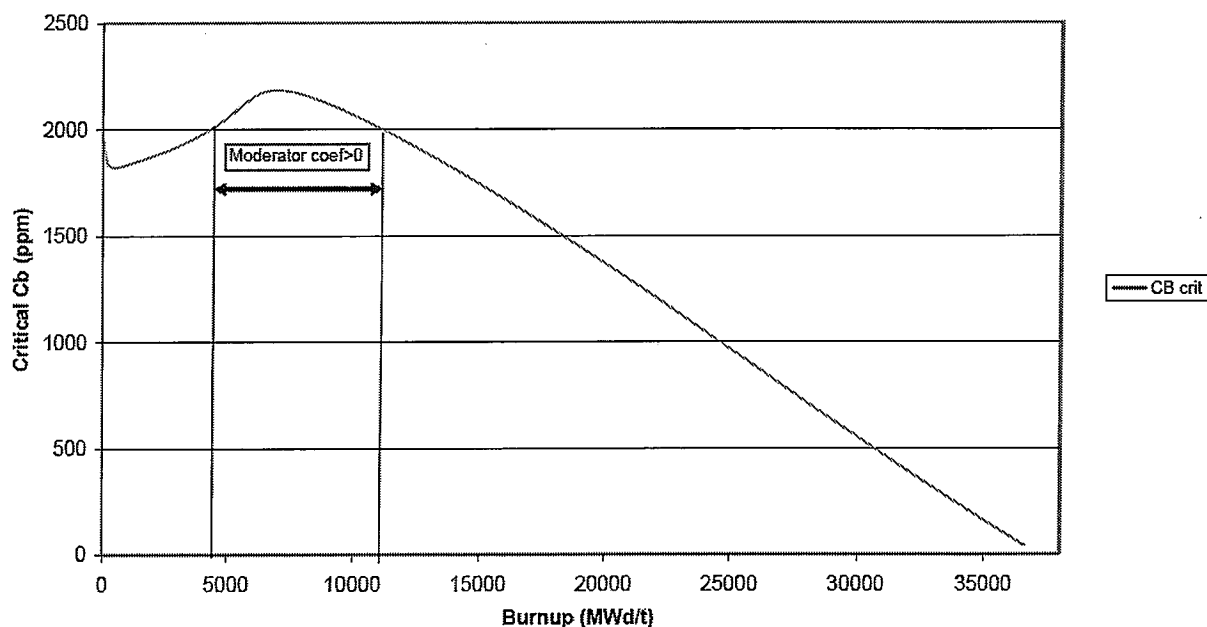


*Figura 25 - Core a ciclo unico:  $F_q$ ,  $F_{xy}$ ,  $F_z$  ed axial offset*

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

*6.3.4 Concentrazione di boro critica*

La variazione della concentrazione critica del boro, durante l'irraggiamento, viene mostrata in Fig. 26. Da questa figura è possibile comprendere come agiscono i veleni bruciabili. Ad inizio irraggiamento la presenza di veleni bruciabili riduce il valore di concentrazione critica di boro richiesta: a burn-up zero essa è pari a 1950 ppm. Tuttavia, per effetto dell'irraggiamento i veleni bruciabili diminuiscono progressivamente richiedendo un contemporaneo aumento della concentrazione critica del boro che raggiunge il suo massimo ad un valore di 2180 ppm (quando il burn-up raggiunge i 7500 MWd/t). Successivamente per effetto del bruciamento del combustibile la reattività globale del nocciolo diminuisce e con essa anche la concentrazione di boro critica.



*Figura 26 - Core a ciclo unico di ricarica: concentrazioni di boro critica*

Come sarà mostrato nella successiva sezione relativa ai coefficienti neutronici, questo modello di nocciolo a ciclo unico presenta dei valori debolmente positivi per il coefficiente di temperatura del moderatore e per il coefficiente di potenza dovuti essenzialmente

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

all'innalzamento di concentrazione critica del boro. Nel caso del coefficiente di temperatura del moderatore il valore massimo raggiunto è dell' ordine dei + 5 pcm/°C.

### 6.3.5 Coefficienti neutronici

Anche per il modello di nocciolo con ciclo unico di ricarica sono stati valutati i coefficienti neutronici in condizioni isoterme ed in condizioni operative di piena potenza in evoluzione di burn-up.

#### 6.3.5.1 Coefficienti neutronici in condizioni isoterme

In *Tab. 23* vengono riportati i coefficienti neutronici calcolati in condizioni isoterme per il nocciolo: la temperatura del combustibile e del moderatore sono pari a 214 °C. I valori dei coefficienti sono tutti negativi sia ad inizio che a fine vita del nocciolo.

*Tabella 23 - Core a ciclo unico di ricarica: coefficienti neutronici in condizioni isoterme*

Coefficienti neutronici	BOC	EOC
$\alpha_{boron}$ (pcm/°C)	-1.39	-24.03
$\alpha_{doppler}$ (pcm/°C)	-3.17	-1.90
$\alpha_{mod}$ (pcm/°C)	-6.20	-9.78

#### 6.3.5.2 Coefficienti neutronici in condizioni operative

I risultati sono presentati nelle Fig. da 27 a 31. Dai grafici si può notare che il coefficiente di temperatura del moderatore ed il coefficiente di potenza sono sensibili alla concentrazione di boro. Questi coefficienti diventano debolmente positivi quando la concentrazione di boro supera i 2000 ppm.

Come mostrato in Fig. 31, i due coefficienti neutronici diventano leggermente positivi nell' intervallo di burn-up che va da 2500 a 14000 MWd/t. Per questo modello di nocciolo, dunque, dovrà essere ottimizzata una strategia di veleni bruciabili tale da permettere di contenere i valori della concentrazione di boro durante l'irraggiamento. Possibili soluzioni per ottenere valori negativi per i coefficienti neutronici sono: aumento del numero di barrette di veleni bruciabili nell' assembly dalle attuali 24 a 32 unità e riduzione dell'arricchimento dell' U<sub>235</sub> presente nelle barrette di gadolinio (riduzione sotto il valore del 2.5%)<sup>14</sup>.

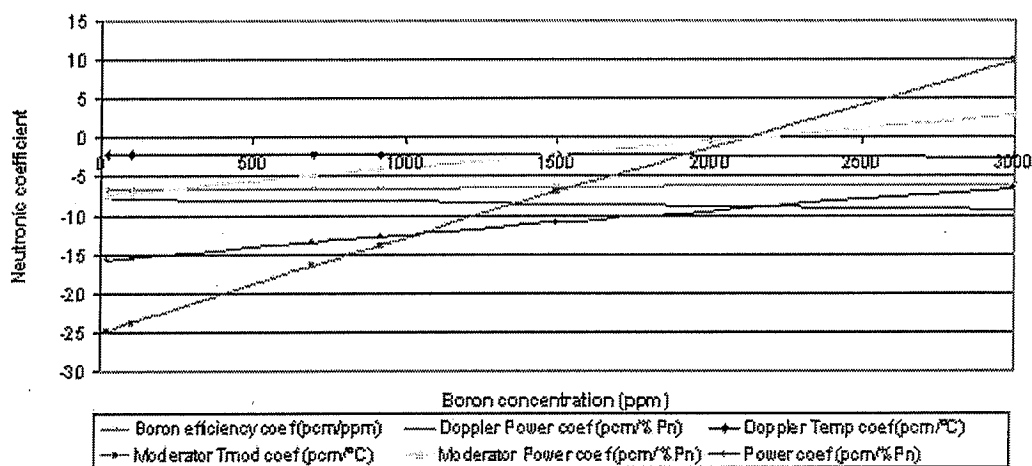
In ogni caso sarà richiesto uno studio successivo di ottimizzazione dei veleni bruciabili per verificare la configurazione dei parametri di assembly tale da assicurare il raggiungimento di

<sup>14</sup> Un'ulteriore soluzione per risolvere il problema dei coefficienti di temperatura positivi possono essere:

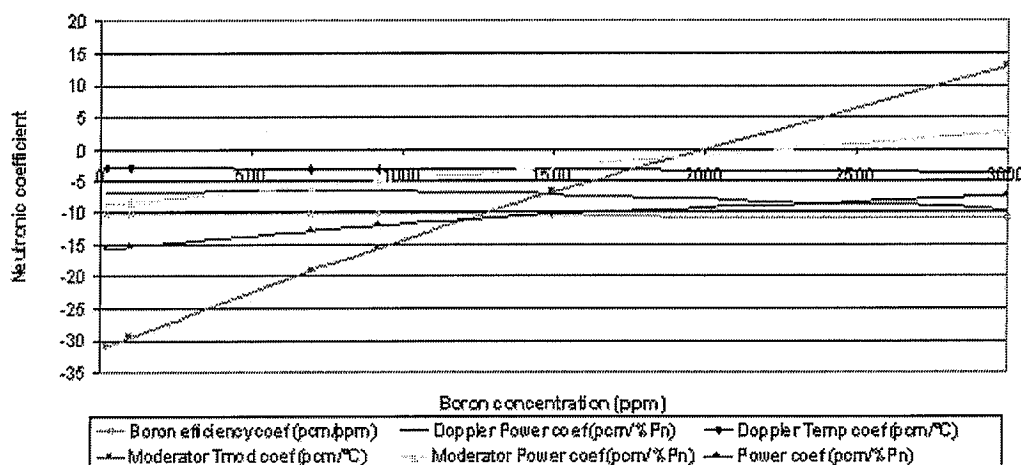
- utilizzo di assembly con doppio arricchimento (arricchimento maggiore nella periferia del nocciolo per privilegiare la componente di leakage)
- riduzione delle dimensioni del nocciolo per aumentare la componente (negativa) di leakage del coefficiente di temperatura del moderatore.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLINO PER REATTORE PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO DI IRRAGGIAMENTO**

tutti i vincoli di sicurezza per i coefficienti neutronici: tale studio di ottimizzazione è richiesto inoltre per verificare i fattori di picco di potenza nel nocciolo.

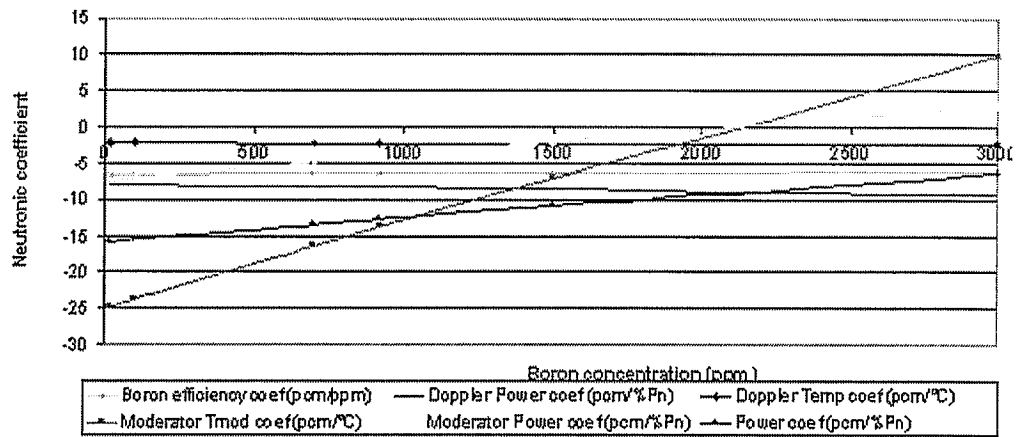


*Figura 27 - Core a ciclo unico: coefficienti neutronici a BOI e Xe all'equilibrio*

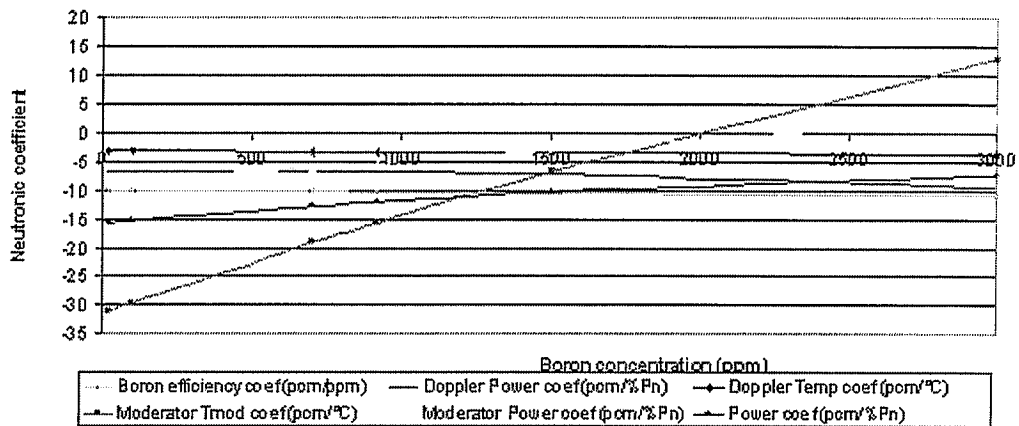


*Figura 28 - Core a ciclo unico: coefficienti neutronici a EOI e Xe all'equilibrio*

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO DI IRRAGGIAMENTO**

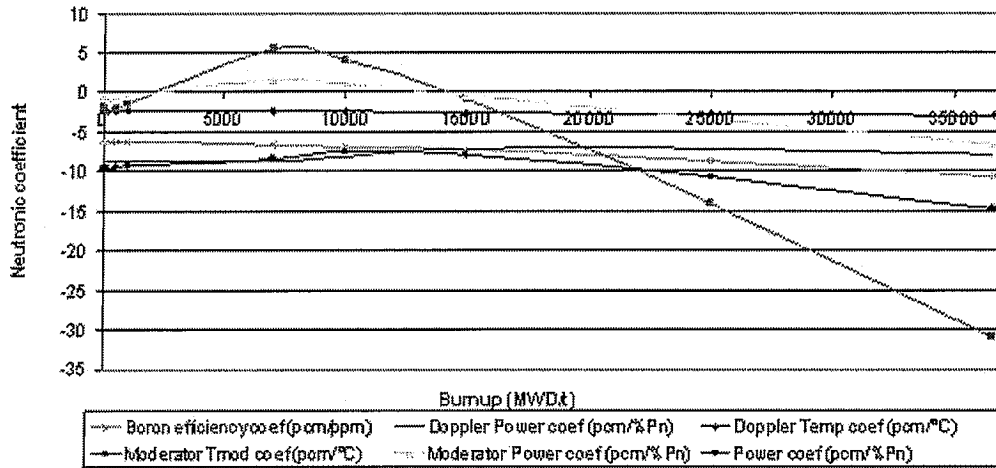


*Figura 29 - Core a ciclo unico: coefficienti neutronici a BOI in assenza di Xe*



*Figura 30 - Core a ciclo unico: coefficienti neutronici a EOI in assenza di Xe*

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**



*Figura 31 - Core a ciclo unico: coefficienti neutronici in funzione del burn-up*

<p style="text-align: center;"><b>VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO DI IRRAGGIAMENTO</b></p>
--

*6.3.6 Margini di shutdown del nocciolo calcolati allo stato hot zero power (HZZP)*

Anche in questo caso, sono stati valutati in due diversi casi i margini di shutdown: un modello di nocciolo a ciclo unico che utilizza tutti i 45 RCCA ed un altro che invece ne utilizza solo 36. I materiali assorbitori presi in considerazione in questo caso sono:

- B<sub>4</sub>C con concentrazione di B<sub>10</sub> al 20%
- B<sub>4</sub>C concentrazione di B<sub>10</sub> al 40%

I risultati dei calcoli vengono riportati nelle nelle Tab. 24 e 25. Nel caso di utilizzo di B<sub>4</sub>C con concentrazione di B<sub>10</sub> pari al 20% si ottiene rispettivamente nel caso di 36 e 45 RCCA: 1987 e 6490 pcm. Nel caso invece di B<sub>4</sub>C con concentrazione di B<sub>10</sub> pari al 40%, gli stessi valori diventano: 2143 e 6937 pcm.

*I risultati confermano che è possibile controllare la reattività del nocciolo nella transizione da HFP ->HZZP utilizzando un sistema di barre di controllo con 36 o con 45 RCCA: in entrambi i casi è dimostrato che è possibile raggiungere la sottocriticità con una riserva di reattività negativa superiore a 1700 pcm.*

Anche in questo caso, oltre al criterio standard è stato preso in considerazione un criterio maggiormente penalizzante che consiste nel valutare i margini di shutdown nella transizione HFP -> CZP ad EOI. In questo caso margini adeguati di anti-reattività possono essere garantiti solo nel caso di utilizzo di tutti i 45 RCCA e con materiali per le barre di controllo con alte caratteristiche di assorbimento. Utilizzando tutte le 45 RCCA e come assorbitore per le barre di controllo B<sub>4</sub>C con concentrazione di B<sub>10</sub> al 40%, si ottiene un margine di anti-reattività di 1930 pcm. I risultati completi sono riportati in *Tab. 26*.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

*Tabella 24 - Nocciolo a ciclo unico: margini di shutdown ad HZP con 36 RCCA attive*

Margini di Shutdown / HZP ad EOC	B4C	B4C 40%
N (Barre tutte inserite)	7385	7868
Barra estratta	1828	2139
Posizione barra estratta	F2	F2
(N-1)-10%	5000	5156
Power defect	1513	1513
Incertezze	1500	1500
<b>Bilancio (pcm) 214°C</b>	1987	2143

*Tabella 25 - Nocciolo a ciclo unico: margini di shutdown ad HZP con 45 RCCA attive*

Margini di Shutdown / HZP ad EOC	B4C	B4C 40%
N (Barre tutte inserite)	10556	17339
Barra estratta	5138	6283
Posizione barra estratta	C3	C3
(N-1)-10%	9501	9950
Power defect	1513	1513
Incertezze	1500	1500
<b>Bilancio (pcm) 214°C</b>	6488	6937

*Tabella 26 - Nocciolo a ciclo unico: margini di shutdown ad CZP con 45 RCCA attive*

Margini di Shutdown / CZP ad EOC	B4C	B4C 40%
N (Barre tutte inserite)	14020	15408
Barra estratta	5283	6293
Posizione barra estratta	C3	C3
(N-1)-10%	7863	8204
Power defect	4775	4775
Incertezze	1500	1500
<b>Bilancio (pcm) 40°C</b>	1588	1929



**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

### *6.3.7 Conclusioni*

Il nocciolo a ciclo unico di ricarica utilizza esclusivamente un unico tipo di assembly con le seguenti caratteristiche:

- Arricchimento  $UO_2$ : 4.9%
- Numero barre di veleni: 24
- Arricchimento  $UO_2$  nelle barre di veleni: 2.5%
- Frazione di gadolinio: 8%

I calcoli sulla lunghezza di ciclo hanno permesso di evidenziare che è possibile raggiungere un tasso di bruciamento pari a 37 GWd/t.

Ad inizio irraggiamento la concentrazione di boro critica richiesta è pari a 1950 ppm: tale valore aumenta durante la vita del reattore e raggiunge il suo massimo a 2180 ppm quando il valore del burn-up è circa 7 GWd/t. In questa fase infatti tutti i veleni bruciabili sono scomparsi ed il controllo di reattività è affidato completamente al boro disciolto nel moderatore.

Questa alta concentrazione di boro porta a focalizzare l'attenzione sui valori dei coefficienti neutronici di temperatura e di potenza del moderatore. L'analisi rivela che tali valori divengono debolmente positivi al di sopra di una concentrazione di boro pari a 2000 ppm. Il modello presenta globalmente buone caratteristiche: tuttavia uno studio successivo dovrà descrivere una procedura (o delle soluzioni) di ottimizzazione tale da aumentare l'effetto di controllo di reattività affidato ai veleni bruciabili: in questo modo sarà possibile ridurre la concentrazione di boro durante l'irraggiamento evitando il raggiungimento di valori positivi per i coefficienti neutronici di temperatura e di potenza del moderatore

Lo studio sui margini di shutdown conferma che è possibile controllare la reattività del nocciolo nella transizione da HFP ->HZP utilizzando un sistema di barre di controllo con 36 o con 45 RCCA: in entrambi i casi è dimostrato che è possibile raggiungere la sottocriticità con una riserva di reattività negativa superiore a 1700 pcm.

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

**7 APPENDICE A: coefficienti neutronici**

**CORE WITH BORON – 700 PPM**

**CORE WITHOUT POISONS**

**VARIATION OF UO<sub>2</sub> ENRICHMENT IN THE FUEL**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.0 %

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	3531	-1,26	30,98	-7,13
EOC	24082	1158	0	-2,63	-22,55	-10,15
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	12039	579	2187	-1,72	13,44	-7,79
EOC	24082	1158	0	-2,63	-22,55	-10,15
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14548	699	1917	-1,84	9,67	-8,05
EOC	24082	1158	0	-2,63	-22,55	-10,15

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.5 %

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	4103	-1,07	33,03	-6,33
EOC	29093	1508	0	-2,66	-23,97	-9,68
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14544	754	2388	-1,68	12,88	-7,19
EOC	29093	1508	0	-2,66	-23,97	-9,68
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17553	910	2059	-1,81	8,65	-7,48
EOC	29093	1508	0	-2,66	-23,97	-9,68

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 %

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	4559	-0,90	34,47	-5,80
EOC	32097	1664	0	-2,67	-24,99	-9,28
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	16045	832	2598	-1,62	13,12	-6,73
EOC	32097	1664	0	-2,67	-24,99	-9,28
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	19305	1001	2235	-1,76	8,75	-7,03
EOC	32097	1664	0	-2,67	-24,99	-9,28

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 5.5 %

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	5240	-0,65	36,34	-5,13
EOC	37105	1783	0	-2,67	-26,21	-8,74
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	18548	892	2876	-1,54	13,11	-6,15
EOC	37105	1783	0	-2,67	-26,21	-8,74
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	22058	1060	2480	-1,69	8,74	-6,45
EOC	37105	1783	0	-2,67	-26,21	-8,74

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 6.0 %

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	5806	-0,42	37,70	-4,67
EOC	41110	1976	0	-2,66	-27,14	-8,39
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	20049	964	3161	-1,44	13,80	-5,72
EOC	41110	1976	0	-2,66	-27,14	-8,39
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	24060	1156	2701	-1,61	9,04	-6,03
EOC	41110	1976	0	-2,66	-27,14	-8,39

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

**CORE WITH POISONS**

**VARIATION OF THE NUMBER OF POISON RODS**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 8GD-8U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	3614	-0,63	22,98	-5,99
EOC	31096	1490	0	-2,69	-24,54	-9,32
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	15545	745	2431	-1,46	12,07	-6,81
EOC	31096	1490	0	-2,69	-24,54	-9,32
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	18805	901	2149	-1,60	8,09	-7,13
EOC	31096	1490	0	-2,69	-24,54	-9,32

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 12GD-8U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	3124	-0,66	16,91	-6,11
EOC	30093	1439	0	-2,68	-24,37	-9,34
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	15044	719	2348	-1,35	11,68	-6,84
EOC	30093	1439	0	-2,68	-24,37	-9,34
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	18304	875	2131	-1,48	8,14	-7,16
EOC	30093	1439	0	-2,68	-24,37	-9,34

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 16GD-8U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	2659	-0,54	10,69	-6,23
EOC	29090	1389	0	-2,67	-24,17	-9,36
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14543	694	2228	-1,26	10,94	-6,87
EOC	29090	1389	0	-2,67	-24,17	-9,36
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17552	838	2133	-1,40	8,52	-7,18
EOC	29090	1389	0	-2,67	-24,17	-9,36

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 16GD-8U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	2165	-0,46	3,93	-6,34
EOC	29091	1386	0	-2,68	-23,92	-9,44
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14543	693	2131	-1,19	10,32	-6,94
EOC	29091	1386	0	-2,68	-23,92	-9,44
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17552	836	2063	-1,34	7,95	-7,27
EOC	29091	1386	0	-2,68	-23,92	-9,44

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-8U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	2165	-0,46	3,93	-6,34
EOC	29091	1386	0	-2,68	-23,92	-9,44
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14543	693	2131	-1,19	10,32	-6,94
EOC	29091	1386	0	-2,68	-23,92	-9,44
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17552	836	2063	-1,34	7,95	-7,27
EOC	29091	1386	0	-2,68	-23,92	-9,44

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 24GD-8U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	1586	-0,57	-4,08	-6,47
EOC	28089	1441	0	-2,69	-23,71	-9,52
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14042	721	2059	-1,06	10,17	-6,99
EOC	28089	1441	0	-2,69	-23,71	-9,52
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17051	875	2037	-1,23	8,02	-7,34
EOC	28089	1441	0	-2,69	-23,71	-9,52

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 32GD-8U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	618	-0,07	-19,51	-6,72
EOC	27087	1284	0	-2,73	-23,09	-9,59
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	13541	642	1771	-0,97	8,18	-7,09
EOC	27087	1284	0	-2,73	-23,09	-9,59
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	16049	761	1974	-1,05	8,13	-7,39
EOC	27087	1284	0	-2,73	-23,09	-9,59



**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

VARIATION OF BORON FRACTION IN POISON RODS

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-6U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	2278	-0,47	6,31	-6,32
EOC	29092	1388	0	-2,71	-23,79	-9,49
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14543	694	2389	-1,33	12,46	-7,04
EOC	29092	1388	0	-2,71	-23,79	-9,49
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17553	838	2070	-1,48	8,30	-7,33
EOC	29092	1388	0	-2,71	-23,79	-9,49

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-7U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	2222	-0,39	4,95	-6,33
EOC	29091	1387	0	-2,73	-23,78	-9,47
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14543	694	2330	-1,27	12,06	-7,00
EOC	29091	1387	0	-2,73	-23,78	-9,47
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17553	837	2071	-1,39	8,18	-7,30
EOC	29091	1387	0	-2,73	-23,78	-9,47

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with  $UO_2$  enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-9U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	2126	-0,23	2,61	-6,35
EOC	29091	1385	0	-2,73	-23,81	-9,43
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14543	693	1895	-1,13	7,38	-6,91
EOC	29091	1385	0	-2,73	-23,81	-9,43
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17552	836	1997	-1,24	7,56	-7,23
EOC	29091	1385	0	-2,73	-23,81	-9,43

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLINO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-10U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	2084	-0,19	1,60	-6,36
EOC	29091	1384	0	-2,72	-23,81	-9,41
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14543	692	1709	-1,05	4,14	-6,91
EOC	29091	1384	0	-2,72	-23,81	-9,41
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17552	835	1813	-1,18	5,97	-7,18
EOC	29091	1384	0	-2,72	-23,81	-9,41

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-11U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	2045	-0,11	0,62	-6,37
EOC	29091	1383	0	-2,73	-23,83	-9,39
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14543	692	1569	-0,98	1,49	-6,91
EOC	29091	1383	0	-2,73	-23,83	-9,39
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17552	835	1607	-1,11	3,16	-7,15
EOC	29091	1383	0	-2,73	-23,83	-9,39

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-12U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	2010	-0,04	-0,24	-6,38
EOC	29091	1382	0	-2,75	-23,81	-9,36
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14543	691	1449	-0,89	-0,90	-6,91
EOC	29091	1382	0	-2,75	-23,81	-9,36
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17552	834	1437	-1,05	0,08	-7,15
EOC	29091	1382	0	-2,75	-23,81	-9,36

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

VARIATION OF UO<sub>2</sub> ENRICHMENT IN POISON RODS SUPPORT

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-8U10

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	2193	-0,47	4,44	-6,31
EOC	29091	1386	0	-2,69	-24,12	-9,36
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14543	693	2146	-1,18	10,22	-6,86
EOC	29091	1386	0	-2,69	-24,12	-9,36
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17552	836	2110	-1,32	8,17	-7,17
EOC	29091	1386	0	-2,69	-24,12	-9,36

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-8U15

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	2220	-0,33	4,62	-6,28
EOC	30094	1434	0	-2,73	-24,12	-9,37
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	15044	717	2175	-1,20	10,28	-6,86
EOC	30094	1434	0	-2,73	-24,12	-9,37
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	18304	872	2075	-1,35	7,47	-7,19
EOC	30094	1434	0	-2,73	-24,12	-9,37

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-8U25

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	2250	-0,43	5,46	-6,24
EOC	41134	1960	0	-2,69	-23,42	-9,88
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	16548	789	2215	-1,25	9,52	-6,90
EOC	41134	1960	0	-2,69	-23,42	-9,88
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	19056	908	2063	-1,37	6,74	-7,15
EOC	41134	1960	0	-2,69	-23,42	-9,88

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLIO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 32GD-8U10

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	662	-0,10	-18,35	-6,66
EOC	28089	1332	0	-2,73	-23,44	-9,50
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14042	666	1857	-0,95	8,46	-7,00
EOC	28089	1332	0	-2,73	-23,44	-9,50
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	16550	785	2014	-1,07	7,92	-7,29
EOC	28089	1332	0	-2,73	-23,44	-9,50

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 32GD-8U15

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	691	-0,09	-17,70	-6,62
EOC	28089	1332	0	-2,72	-23,68	-9,41
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14042	666	1864	-0,97	8,32	-6,91
EOC	28089	1332	0	-2,72	-23,68	-9,41
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17052	808	2028	-1,09	7,55	-7,24
EOC	28089	1332	0	-2,72	-23,68	-9,41

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 32GD-8U25

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	749	-0,09	-16,38	-6,54
EOC	29091	1379	0	-2,74	-24,05	-9,30
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14543	689	1948	-0,97	8,55	-6,80
EOC	29091	1379	0	-2,74	-24,05	-9,30
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17552	832	2077	-1,09	7,45	-7,10
EOC	29091	1379	0	-2,74	-24,05	-9,30



**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

**CORE WITHOUT BORON – 0 PPM**

**CORE WITHOUT POISONS**

**VARIATION OF ENRICHMENT OF U235 IN THE FUEL**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.0 %

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,30	-18,70	0,00
EOC	31059	1493	0	-2,73	-21,16	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	15527	746	0	-2,50	-22,11	0,00
EOC	31059	1493	0	-2,73	-21,16	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	18783	903	0	-2,59	-22,34	0,00
EOC	31059	1493	0	-2,73	-21,16	0,00

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 %

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,26	-19,62	0,00
EOC	39066	1878	0	-2,72	-23,79	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	19530	939	0	-2,51	-24,17	0,00
EOC	39066	1878	0	-2,72	-23,79	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	23036	1107	0	-2,58	-24,57	0,00
EOC	39066	1878	0	-2,72	-23,79	0,00

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 5.5 %

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,26	-20,01	0,00
EOC	43068	2070	0	-2,73	-25,40	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	21030	1011	0	-2,50	-25,01	0,00
EOC	43068	2070	0	-2,73	-25,40	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	26038	1251	0	-2,57	-25,67	0,00
EOC	43068	2070	0	-2,73	-25,40	0,00

**CORE WITH POISONS  
VARIATION OF BORON FRACTION IN POISON RODS**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-6U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,26	-23,72	0,00
EOC	29049	1386	0	-2,72	-23,61	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14523	693	0	-2,47	-22,47	0,00
EOC	29049	1386	0	-2,72	-23,61	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17528	837	0	-2,53	-23,10	0,00
EOC	29049	1386	0	-2,72	-23,61	0,00

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-7U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,26	-24,41	0,00
EOC	29049	1385	0	-2,71	-23,63	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14523	693	0	-2,48	-21,76	0,00
EOC	29049	1385	0	-2,71	-23,63	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17528	836	0	-2,55	-23,09	0,00
EOC	29049	1385	0	-2,71	-23,63	0,00

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-8U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,26	-24,98	0,00
EOC	35061	1671	0	-2,76	-23,00	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17528	835	0	-2,56	-22,98	0,00
EOC	35061	1671	0	-2,76	-23,00	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	21034	1002	0	-2,61	-23,52	0,00
EOC	35061	1671	0	-2,76	-23,00	0,00

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with  $UO_2$  enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-9U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,27	-25,50	0,00
EOC	29049	1383	0	-2,74	-23,65	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14523	692	0	-2,45	-18,63	0,00
EOC	29049	1383	0	-2,74	-23,65	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17528	835	0	-2,55	-22,22	0,00
EOC	29049	1383	0	-2,74	-23,65	0,00

Core with  $UO_2$  enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-10U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,27	-26,02	0,00
EOC	29049	1382	0	-2,73	-23,68	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14523	691	0	-2,44	-19,05	0,00
EOC	29049	1382	0	-2,73	-23,68	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17528	834	0	-2,54	-20,24	0,00
EOC	29049	1382	0	-2,73	-23,68	0,00

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with  $UO_2$  enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-11U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,27	-26,45	0,00
EOC	29049	1381	0	-2,72	-23,69	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14523	691	0	-2,47	-19,59	0,00
EOC	29049	1381	0	-2,72	-23,69	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17528	833	0	-2,54	-19,32	0,00
EOC	29049	1381	0	-2,72	-23,69	0,00

Core with  $UO_2$  enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-12U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,28	-26,85	0,00
EOC	29049	1380	0	-2,74	-23,69	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	14523	690	0	-2,45	-20,13	0,00
EOC	29049	1380	0	-2,74	-23,69	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17528	833	0	-2,53	-19,66	0,00
EOC	29049	1380	0	-2,74	-23,69	0,00

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

VARIATION OF UO<sub>2</sub> ENRICHMENT IN POISON RODS SUPPORT

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-8U10

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,27	-24,75	0,00
EOC	36063	1719	0	-2,77	-23,12	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	18029	859	0	-2,55	-23,26	0,00
EOC	36063	1719	0	-2,77	-23,12	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	21034	1002	0	-2,61	-23,71	0,00
EOC	36063	1719	0	-2,77	-23,12	0,00

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-8U15

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,26	-24,59	0,00
EOC	36063	1719	0	-2,76	-23,31	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	18029	859	0	-2,56	-23,33	0,00
EOC	36063	1719	0	-2,76	-23,31	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	21034	1002	0	-2,61	-23,84	0,00
EOC	36063	1719	0	-2,76	-23,31	0,00

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 20GD-8U25

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,26	-24,30	0,00
EOC	37064	1766	0	-2,76	-23,49	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	18530	883	0	-2,55	-23,58	0,00
EOC	37064	1766	0	-2,76	-23,49	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	22036	1050	0	-2,62	-24,13	0,00
EOC	37064	1766	0	-2,76	-23,49	0,00

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 24GD-8U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,27	-25,57	0,00
EOC	35062	1668	0	-2,77	-22,67	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17529	834	0	-2,56	-22,84	0,00
EOC	35062	1668	0	-2,77	-22,67	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	21035	1001	0	-2,63	-23,28	0,00
EOC	35062	1668	0	-2,77	-22,67	0,00

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 24GD-8U10

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,25	-25,29	0,00
EOC	35062	1668	0	-2,77	-23,01	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17528	834	0	-2,55	-23,03	0,00
EOC	35062	1668	0	-2,77	-23,01	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	21035	1001	0	-2,62	-23,55	0,00
EOC	35062	1668	0	-2,77	-23,01	0,00



**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 24GD-8U15

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,25	-25,10	0,00
EOC	36063	1716	0	-2,77	-23,06	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	18029	858	0	-2,55	-23,27	0,00
EOC	36063	1716	0	-2,77	-23,06	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	21034	1001	0	-2,62	-23,68	0,00
EOC	36063	1716	0	-2,77	-23,06	0,00

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 24GD-8U25

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,25	-24,71	0,00
EOC	37064	1763	0	-2,77	-23,31	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	18530	882	0	-2,56	-23,55	0,00
EOC	37064	1763	0	-2,77	-23,31	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	22036	1048	0	-2,63	-24,02	0,00
EOC	37064	1763	0	-2,77	-23,31	0,00

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 32GD-8U025

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,32	-26,80	0,00
EOC	34061	1615	0	-2,77	-22,22	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17028	807	0	-2,57	-22,37	0,00
EOC	34061	1615	0	-2,77	-22,22	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	20034	950	0	-2,63	-22,83	0,00
EOC	34061	1615	0	-2,77	-22,22	0,00

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCILO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 32GD-8U10

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,26	-26,32	0,00
EOC	34061	1615	0	-2,76	-22,69	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17028	807	0	-2,57	-22,58	0,00
EOC	34061	1615	0	-2,76	-22,69	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	20033	950	0	-2,63	-23,16	0,00
EOC	34061	1615	0	-2,76	-22,69	0,00

**VERIFICHE NEUTRONICHE RELATIVE A DUE MODELLI DI NOCCIOLO PER REATTORE  
PWR CON GESTIONE DEL COMBUSTIBILE A 4 CICLI DI RICARICA ED A CICLO UNICO  
DI IRRAGGIAMENTO**

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 32GD-8U15

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,26	-26,06	0,00
EOC	35062	1662	0	-2,77	-22,80	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	17529	831	0	-2,56	-22,88	0,00
EOC	35062	1662	0	-2,77	-22,80	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	21035	997	0	-2,65	-23,44	0,00
EOC	35062	1662	0	-2,77	-22,80	0,00

Core with UO<sub>2</sub> enrichment in the fuel: 4.9 % - 32GD-8U25

"1/1 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	0	0	0	-2,22	-25,49	0,00
EOC	36063	1710	0	-2,78	-23,19	0,00
"1/3 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	18029	855	0	-2,58	-23,21	0,00
EOC	36063	1710	0	-2,78	-23,19	0,00
"1/4 batch"	Burnup	Time	Boron	$\alpha$ Doppler	$\alpha$ Tmod	$\alpha$ cb
Unit	MWd/t	day	ppm	"pcm/°C"	"pcm/°C"	"pcm/ppm"
BOC	21035	997	0	-2,62	-23,78	0,00
EOC	36063	1710	0	-2,78	-23,19	0,00

## REFERENCES

- [1] M. CUMO, N. AFGAN, *"Nuclear Power Plant"*, Postgraduate Course on Energy Engineering "University of Rome La Sapienza", produced by CATTID
- [2] M. CUMO, *"Co-operation in the development of the small/medium size nuclear power plant"*, received 04/03/2003
- [3] *"Identification of improvements of advanced light water reactors concepts"*, Nuclear Science and Technology, Report EUR 14295, march 1993
- [4] F. SONTHEIMER, H. LANDSKRON, M.R. BILLAUX *"A fuel thermal conductivity correlation based on the latest experimental results"*
- [5] C. M. MILDRUM, M. A. SEGOVIA *"Experience in the use of low concentration gadolinia as a PWR fuel burnable absorber"*
- [6] P. Bellier, M. Coste, C. Magnaud, S. Mengelle, J. Ragusa, R. Sanchez, S. Santandrea, *"APOLLO2: Manuel de reference de la version 2.7"*, SERMA/LENR/RT/04-3425/A
- [7] B. Akherraz, A.M. Baudron, J.J. Lautard, C. Magnaud, F. Moreau, *"CRONOS2.6: Manuel de reference"*, SERMA/LENR/RT/04-3433/A