



Ricerca di Sistema elettrico

Valutazioni, con codici deterministici, dei fenomeni di tilt azimutale in reattori PWR e del loro impatto sui margini di sicurezza del nocciolo

R. Pergreffi, F. Rocchi

VALUTAZIONI, CON CODICI DETERMINISTICI, DEI FENOMENI DI TILT AZIMUTALE IN REATTORI PWR E DEL
LORO IMPATTO SUI MARGINI DI SICUREZZA DEL NOCCIOLO

R. Pergreffi, F. Rocchi - ENEA

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

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

Linea: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Obiettivo: Studi ed analisi di sicurezza e sostenibilità

Responsabile del Progetto: Felice De Rosa, ENEA

Titolo

**Valutazioni, con codici deterministici, dei fenomeni di tilt
azimutale in reattori PWR e del loro impatto sui margini di
sicurezza del nocciolo.**

Descrittori

Tipologia del documento:

Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione

Argomenti trattati: Tilt azimutale, CPT, PWR, Benchmark UAM

Sommario

L'idea del presente lavoro è quella di stimare il tilt azimutale del flusso attraverso misure differenziali del valore di antireattività delle barre di controllo in quei sistemi che non permettono, a bassa potenza, misure dirette di distribuzione di flusso e potenza.

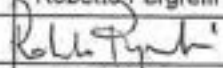
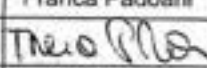
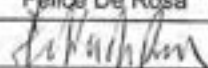
La correlazione tra tilt e variazione del worth delle barre di controllo rispetto al caso pienamente simmetrico, è stata valutata sia numericamente, con riferimento al nocciolo del PWR di terza generazione proposto nel Benchmark UAM, sia teoricamente attraverso la Teoria Classica delle Perturbazioni (CPT).

Note

Autori: R. Pergreffi, F. Rocchi

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	8/9/2011	NOME	Roberto Pergreffi	Franca Padoani	Felice De Rosa
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 – 051	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 2	di 19
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

Sommario

I. Introduzione	3
II. Modello del nocciolo e strategie di calcolo.....	6
III. Risultati.....	8
IV. Interpretazioni tramite la Teoria delle Perturbazioni	13
IV. Conclusioni.....	17
Ringraziamenti.....	18
Abbreviazioni	18
Riferimenti bibliografici	19

I. Introduzione

L'esperienza operativa maturata con i PWR di seconda generazione ha mostrato che ad inizio ciclo – BOC – alcune configurazioni di nocciolo possono essere affette da un disequilibrio azimutale statico della potenza, conosciuto come “power tilt”, la cui origine, pur non essendo ancora precisamente e pienamente compresa, dipende ragionevolmente dalla combinazione casuale di numerosi parametri. In presenza di combustibile fresco e a piena potenza, il power tilt, definito come differenza relativa tra la potenza media di un quadrante e quella calcolata su un quarto di nocciolo, oscilla tra 2,2% e 3,5% per i reattori francesi CPY da 900 MWe (Figura 1) e tra 2,0% e 2,5% per i reattori da 1300 MWe (Figura 2) [1].

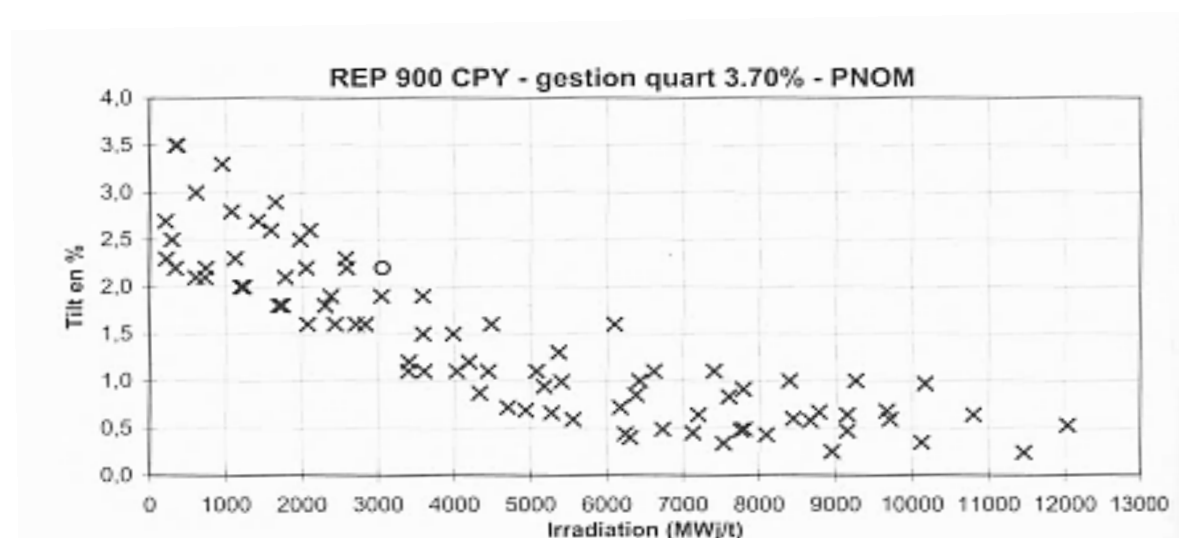


Fig. 1. Tilt in reattori francesi CPY da 900 MWe a potenza nominale al variare del burnup.

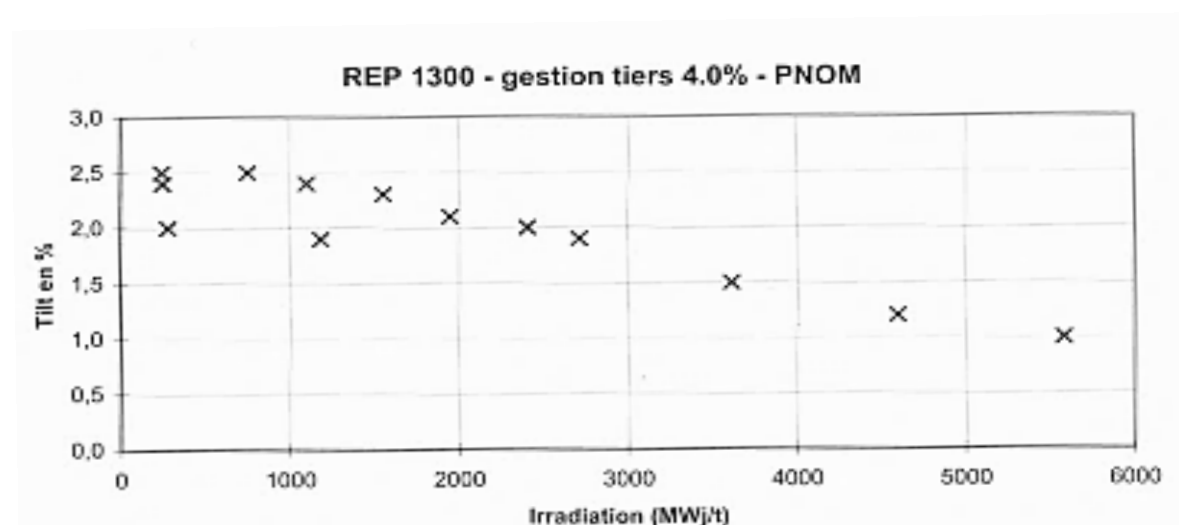


Fig. 2. Tilt in reattori di tipo PWR da 1300 MWe a potenza nominale a variare del burnup.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 – 051	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 4	di 19
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

Studi recenti [2,3] hanno mostrato che un riflettore spesso in acciaio inossidabile, il cosiddetto “riflettore pesante” adottato in alcuni PWR di terza generazione, può contribuire ad amplificare il tilt rispetto al caso dei riflettori convenzionali. A *Hot Zero Power* (HZP) e in presenza di combustibile fresco tale amplificazione può essere superiore a un fattore 3. L'importante distorsione rispetto alla simmetria assiale e radiale del modo fondamentale che, nei reattori ad acqua leggera, è associata ad una data perturbazione, è legata all'accoppiamento neutronico tra le diverse parti del nocciolo e può essere misurata analizzando lo spettro degli autovalori dell'operatore di Boltzmann discretizzato che descrive le proprietà moltiplicative di un dato nocciolo. Le armoniche di ordine superiore, che governano l'instabilità, giocano infatti un ruolo tanto maggiore quanto minore è la separazione numerica degli autovalori corrispondenti nella decomposizione del flusso per autofunzioni [5]. Si può dimostrare piuttosto facilmente che noccioli di grandi dimensioni hanno una bassa separazione in autovalori e perciò le loro forme di flusso e potenza sono ancor più dipendenti dalle armoniche di ordine superiore [5].

E' altrettanto semplice comprendere che c'è anche un effetto della forma del nocciolo sull'importanza relativa delle autofunzioni di ordine superiore assiali o azimutali; è stato mostrato che in un PWR da 1000 MWe, se il rapporto altezza/diametro nel nocciolo H/D è compreso tra 1,1 e 1,3, il flusso può essere soggetto a distorsione dovuta alle prime autofunzioni assiali e azimutali, essendo l'azimutale di ordine superiore a quella assiale [6]. Tuttavia se il rapporto H/D decresce, la separazione degli autovalori azimutali decresce mentre cresce quella degli autovalori assiali [6]. Si potrebbe perciò sostenere che l'introduzione del riflettore pesante in un nocciolo con un dato diametro attivo può generare un'amplificazione del tilt azimutale. Il risparmio in temini di Δk (reflector saving) del riflettore pesante rispetto a quello convenzionale, calcolato per il nocciolo di terza Generazione specificato nel Benchmark UAM della OECD/NEA, è di circa +830 pcm in condizioni di combustibile fresco a HZP [2]. Questo guadagno può essere visto come un effetto “equivalente” all'estensione del diametro attivo D. In questo modo, qualsiasi guadagno dovuto al riflettore sin dalla fase di progettazione può essere reso “equivalente” a una variazione del rapporto H/D e quindi può essere collegato alla crescente importanza della prima autofunzione azimutale (riduzione nella separazione in autovalori). E' probabile che questo risultato dipenda anche dallo spettro dei neutroni riflessi; nel riflettore pesante, infatti, l'up-scattering potrebbe non essere trascurabile per cui, conseguentemente, si avrebbe un aumento netto di neutroni veloci negli assembly periferici attigui al riflettore.

La presenza di una distorsione del flusso (power tilt) genera anche una variazione nel valore di antireattività (worth) delle barre di controllo. Sulla base di questa evidenza, il presente lavoro suggerisce di utilizzare misure differenziali del worth delle barre di controllo come modo indiretto per stimare il tilt a bassa potenza (< 8%, si veda il diagramma di flusso di Figura 3 riferito ai reattori PWR EDF da 1300MWe) per quei sistemi che non permettono misure dirette di flusso e potenza (ad esempio attraverso l'utilizzo di camere mobili). E' infatti possibile correlare il tilt azimutale del flusso alla variazione del worth delle barre di controllo rispetto al caso pienamente simmetrico. Questo non solo può essere valutato numericamente, ma anche supportato teoricamente attraverso la Teoria delle Perturbazioni. Come esempio è stato considerato il nocciolo proposto dal Benchmark UAM che verrà descritto nel prossimo paragrafo.

Una distorsione di potenza comporta una riduzione del *Departure from Nucleate Boiling Ratio* (DNBR) e dunque una riduzione dei margini di sicurezza termoidraulica sul combustibile [4]. A seconda dell'entità della distorsione a vari livelli di potenza, l'Autorità di Sicurezza Nucleare (ASN) francese, ad esempio, impone l'adozione di vincoli operazionali sul reattore (come dettagliato nel diagramma di flusso di Figura 3). In particolare, per poter procedere ad un'ulteriore salita in potenza, l'ASN impone una stima sperimentale del tilt all'8% della potenza nominale. L'idea di stimare il tilt attraverso misure differenziali del valore di antireattività delle barre di controllo nasce dal fatto che in un reattore come l'EPR non è attualmente possibile effettuare misure di distribuzione di flusso a potenza inferiore al 25% circa.

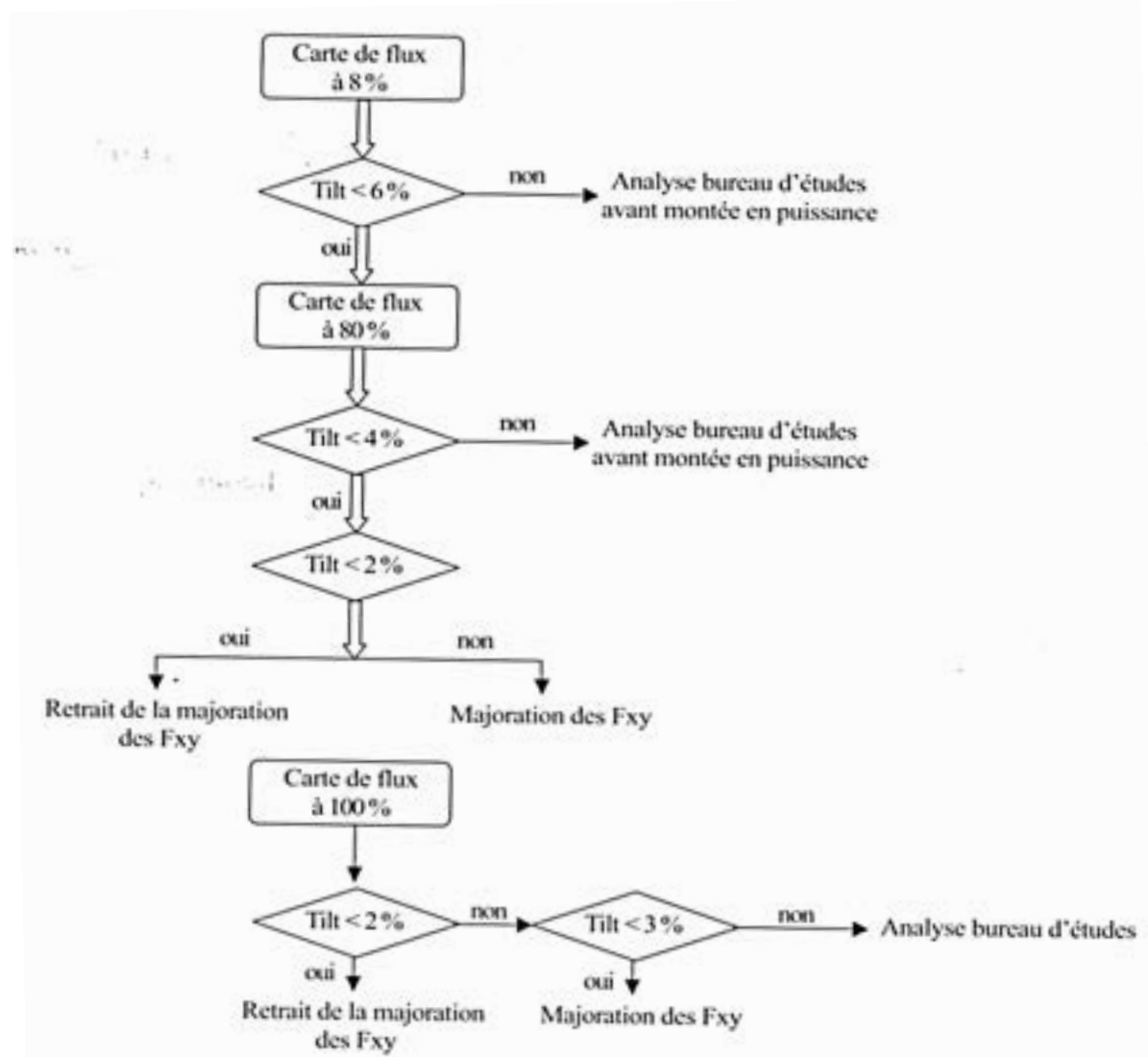


Fig. 3. Diagramma di flusso sul monitoraggio del tilt in fase di avviamento del reattore.

II. Modello del nocciolo e strategie di calcolo

Il nocciolo del PWR di terza generazione proposto dal Benchmark UAM è composto da quattro tipi di assembly standard 17x17 con differenti arricchimenti e/o differente contenuto in Gd_2O_3 : (a) 3,2% + 20 barrette gadolinate, (b) 2,1% senza barrette gadolinate, (c) 4,2% + 12 barrette gadolinate e (d) 4,2% senza barrette gadolinate. Nel layout del nocciolo riportato in Figura 4 sono stati rappresentati in verde gli assembly di tipo (a), in bianco quelli di tipo (b), in giallo quelli di tipo (c), in rosso quelli di tipo (d) e in grigio il riflettore pesante [7]. Inoltre poiché nel Benchmark UAM non sono previste barre di controllo, si è scelto di adottare tipo e posizionamento di quelle del nocciolo EPR (Figura 5). In particolare tutte le barre sono di tipo nero in argento-indio-cadmio. Il nocciolo è in condizioni di HZP, cioè isoterma a 296.9 °C, con il moderatore a 155 bar e con una densità dell'acqua di 0.73272 g/cm³. I calcoli di nocciolo sono stati eseguiti con il codice di diffusione 3D CRONOS2 a burnup zero (cioè in assenza di xeno e samario) e con sezioni d'urto efficaci a due gruppi prodotte con il codice di trasporto 2D APOLLO2 utilizzando una libreria a 281 gruppi con una struttura di tipo SHEM basata su dati nucleari JEFF 3.1.1. La concentrazione di boro che rende critico il sistema è stata calcolata pari a 1513,6 ppm.

La perturbazione azimutale è stata introdotta generando, tramite APOLLO2, due nuovi set di sezioni d'urto efficaci ottenuti modificando leggermente il rapporto di moderazione attraverso una variazione artificiale dello spessore della lamina d'acqua tra assembly: in un caso questo valore è stato azzerato in modo da ridurre, nei soli assembly interessati, il tasso di fissione, nell'altro, al contrario, è stato raddoppiato così da aumentare la termalizzazione e, con essa, il tasso di fissione.

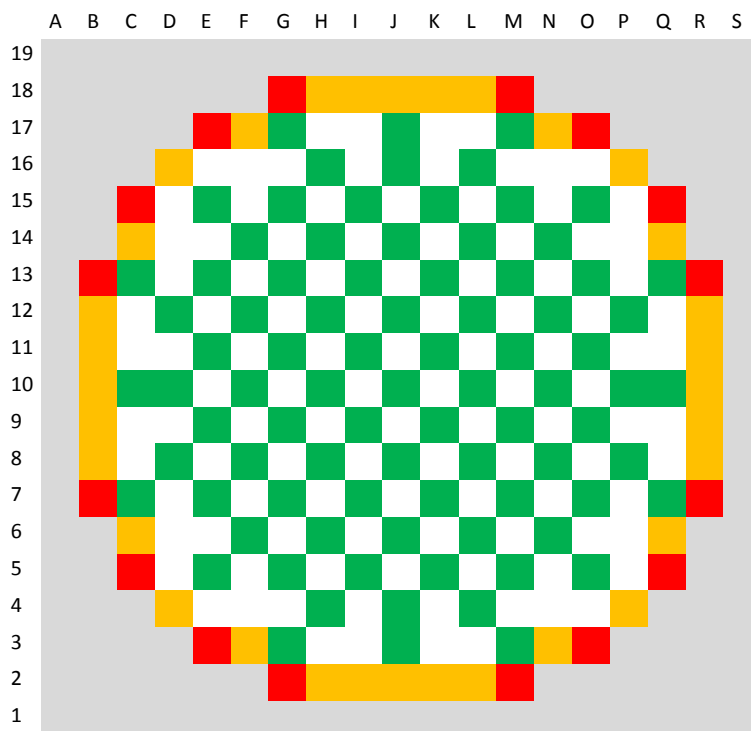


Fig. 4. Layout del nocciolo.

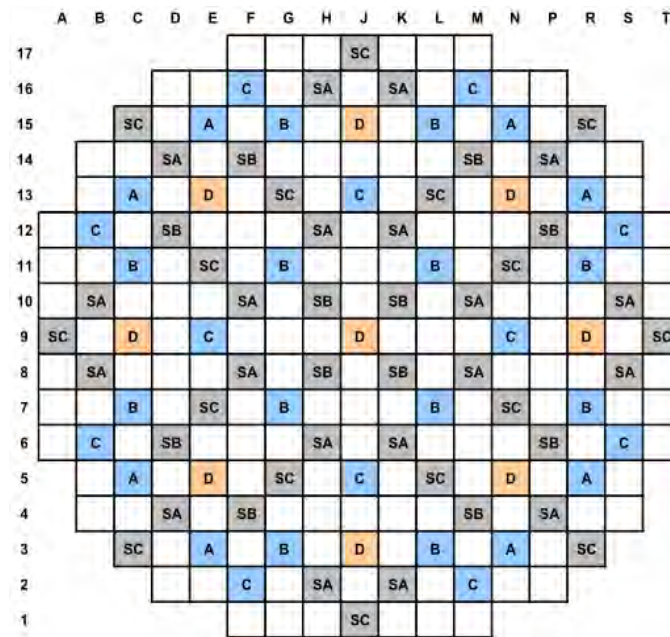


Fig. 5. Localizzazione e tipologia delle barre di controllo del nocciolo EPR.

In accordo con quanto suggerito da studi precedenti [2] e come riportato in Figura 6, la simulazione del tilt azimutale è stata ottenuta disponendo simmetricamente alla periferia del nocciolo gli assembly con le sezioni d'urto efficaci modificate. Gli assembly colorati in blu hanno sezioni d'urto efficaci calcolate con lamina d'acqua nulla, mentre quelli in rosso hanno sezioni d'urto calcolate con lamina d'acqua doppia.

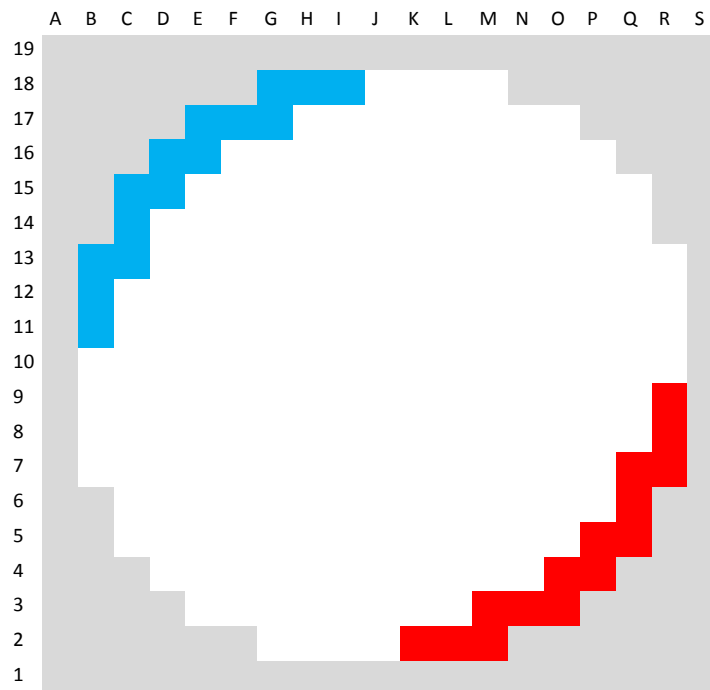


Fig. 6. Layout degli assembly tiltati modificati.

III. Risultati

L'effetto della perturbazione introdotta può essere osservato in Figura 7 dove si è graficato la differenza relativa tra la distribuzione di potenza condensata assialmente del nocciolo tiltato e quella del nocciolo non tiltato.

La differenza massima (a cui corrisponde in Figura 7 il rosso più scuro) è pari a 5,9%, mentre la minima (rappresentata con il blu più scuro) è di -6,8%. Come atteso, non ci sono differenze lungo la diagonale NE-SO. In Tabella I è stato riportato il valore del tilt per ciascuno dei quattro quadranti. Come si vede questo valore è compreso tra 2,8% e 3,1% in caso di riflettore pesante e tra 1,4% e 1,6% in caso di riflettore convenzionale. Rispetto al caso convenzionale quindi il riflettore pesante determina un'amplificazione dell'effetto della perturbazione di un fattore 2.

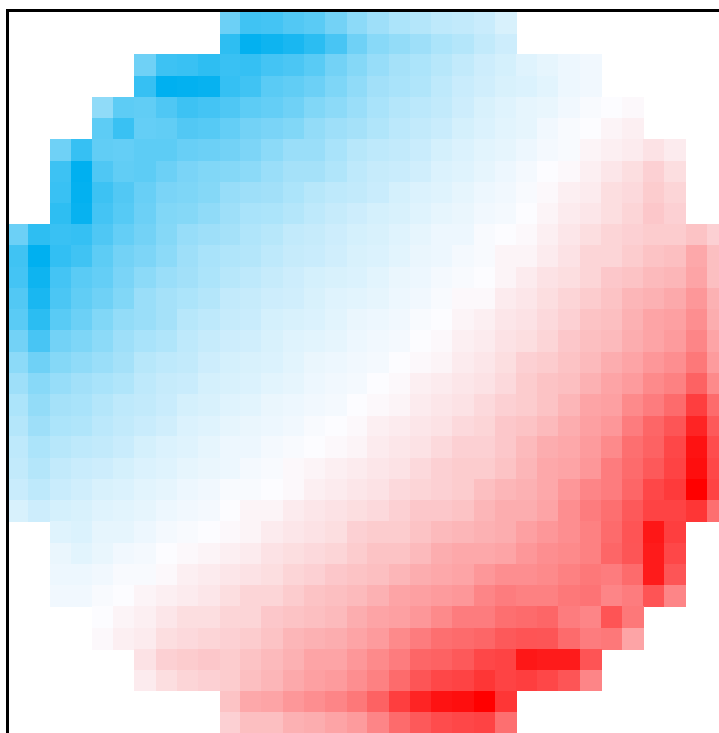


Fig. 7. Differenza relativa della distribuzione di potenza condensata assialmente del nocciolo tiltato rispetto a quella del nocciolo non tiltato.

TABELLA I

Valori del tilt nei quattro quadranti con riflettore standard e riflettore pesante.

Tilt con riflettore pesante		Tilt con riflettore standard	
0.969	1.002	0.984	1.001
1.002	1.028	1.001	1.014
2.8 % – 3.1 %		1.4 % – 1.6 %	

In Figura 8 è graficato l'andamento lungo la diagonale NO-SE (dall'angolo esterno al centro del nocciolo) del profilo di potenza collassata assialmente da cui emerge chiaramente l'effetto dovuto al tilt. Si noti che la potenza collassata assialmente è qui una quantità adimensionale definita come rapporto tra la potenza rilasciata da uno specifico elemento di combustibile e quella dell'elemento medio nel nocciolo.

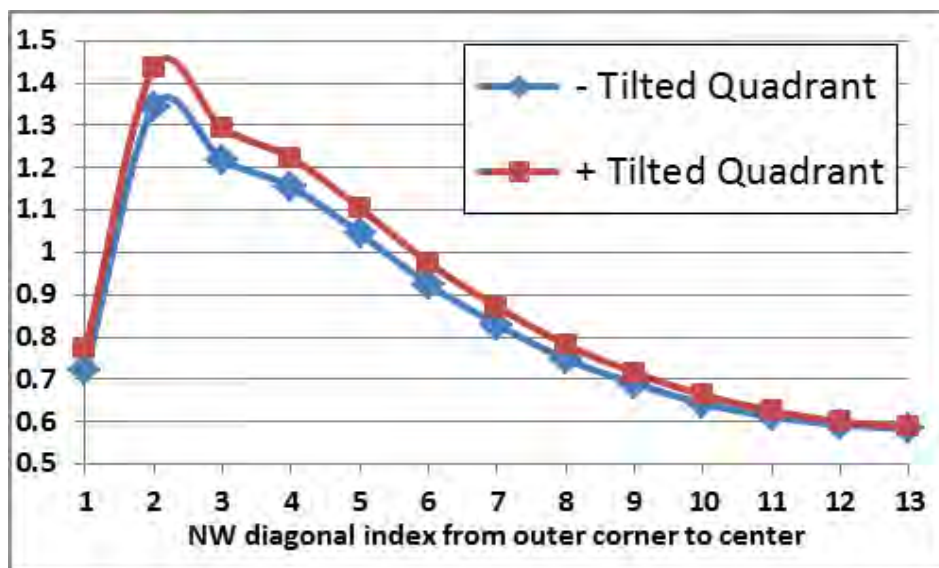


Fig. 8. Profili di potenza collassata assialmente lungo la diagonale NO-SE.

Come già anticipato nell'introduzione, analizzando l'effetto della distorsione del flusso sul valore di antireattività delle barre di controllo si è cercata una misurazione indiretta del tilt. Per i soli assembly di tipo (a), i risultati sono presentati in Tabella II dove le posizioni delle barre di controllo si riferiscono allo schema di Figura 4. Le barre di controllo sono inserite una alla volta. Si noti come due barre di controllo simmetriche abbiano differenti valori di antireattività (quarta colonna in Tabella II); inoltre nell'ultima colonna della stessa tabella è riportata la differenza di potenza (collassata assialmente) tra due assembly simmetrici, senza barre di controllo, del nocciolo tiltato. Come si vede, lungo la diagonale del nocciolo NE-SO una barra di controllo (per esempio nell'assembly O15) ha lo stesso worth della sua simmetrica (E5) e questo poiché, come mostrato in Figura 7, non ci sono effetti dovuti al tilt in questa direzione. Lo stesso dicasi, a fortiori, per la posizione nel centro del nocciolo (J10). Ancor più importante appare la correlazione lineare che emerge dai dati di Tabella II; in particolare se si grafica Δp al variare di ΔP_0 si ottiene il grafico di Figura 9 dove l'interpolazione lineare è riportata in rosso.

TABELLA II

Differenze nella distribuzione di potenza degli assembly e nel valore di antireattività delle barre di controllo.

Posizione delle barre di controllo	Valore di antireattività (pcm)	Valore di antireattività della barre simmetriche (pcm)	Δp (pcm)	ΔP_0 (-)
D10	39.58	44.74	5.16	0.042
D12	41.73	49.16	7.43	0.066
E13	40.45	47.79	7.34	0.059
E15	44.97	53.57	8.60	0.071
F10	29.02	31.92	2.90	0.024
F12	31.52	36.28	4.76	0.038
F14	39.38	46.49	7.11	0.055
G11	25.01	27.66	2.65	0.023
G15	40.46	47.79	7.33	0.059
H12	23.72	26.28	2.56	0.023
H14	31.52	36.28	4.76	0.038
H16	41.73	49.16	7.43	0.066
I11	20.18	21.29	1.11	0.011
I13	25.00	27.66	2.66	0.023
J10	19.39	19.39	0	0
J14	29.02	31.92	2.90	0.024
J16	39.58	44.74	5.16	0.042
M17	45.06	47.84	2.78	0.024
O15	49.46	49.47	0.01	0

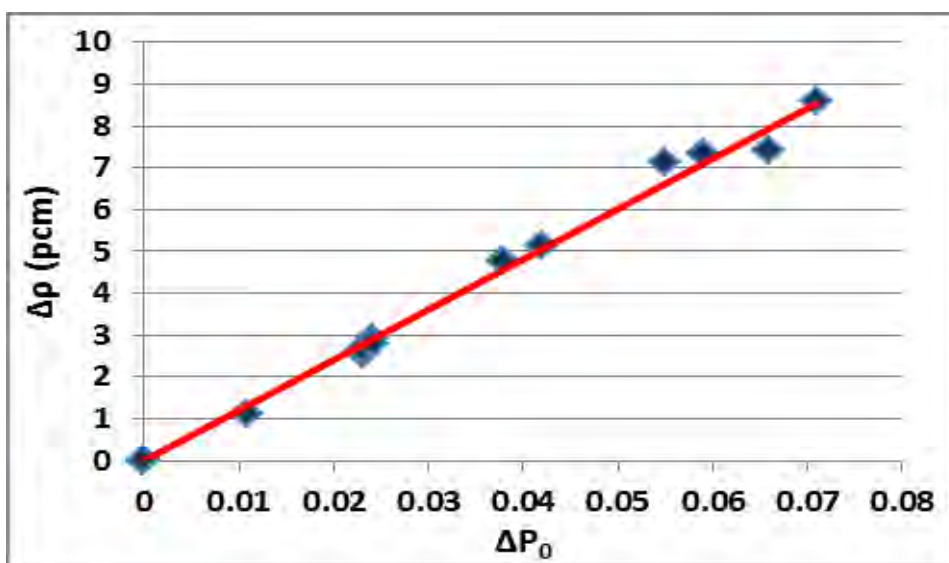


Fig. 9. Differenza del valore di antireattività al variare di ΔP_0 .

L'equazione della retta interpolante è:

$$\Delta p \cong 120.3 \cdot \Delta P_0 \quad (1)$$

dove il valore del coefficiente di determinazione R^2 è pari a 0.9914. In accordo con questo importante risultato, si può ritenere che la distribuzione sull'intero nocciolo delle differenze dei valori di antireattività delle barre di controllo simmetriche possa essere usata per generare una mappa di distribuzione della potenza e perciò per inferire la presenza, l'ampiezza e la distribuzione del fenomeno del tilt azimutale in un nocciolo avente tutte le barre estratte.

La dimostrazione di quanto sin qui detto è stato fatta per i soli assembly di tipo (a) che ospitano barre di controllo, data la loro abbondanza nel nocciolo di Figura 4. Anche per gli assembly di tipo (b) e (c) è possibile, in linea di principio, determinare una correlazione; tuttavia, dal momento che per questa tipologia di assembly solo poche posizioni che ospitano barre di controllo possono essere studiate, l'eventuale correlazione avrebbe un significato statistico minore. Per questi tipologie di assembly si riportano comunque, in Tabella III, la differenza dei valori di antireattività di barre di controllo simmetriche (terza colonna) e la differenza di potenza (collassata assialmente) tra assembly simmetrici, senza barre di controllo, del nocciolo tiltato (quarta colonna). L'indicazione di WG ("Water Gap") denota un assembly in cui le sezioni d'urto efficaci, per indurre il fenomeno del tilt, sono state artificialmente alterate attraverso una variazione della lamina d'acqua tra gli assembly, come descritto nel Paragrafo II. In Figura 10 le Δp sono graficate in funzione della posizione lungo la diagonale del nocciolo NO-SE.

TABELLA III

Differenze del worth tra barre controllo simmetriche e della distribuzione di potenza per le tipologie di assembly meno presenti.

Posizione della barra di controllo	Tipo di assembly	Δp (pcm)	ΔP_0 (-)
C11	b	7.94	0.071
D14	b	9.84	0.084
F16	b	9.84	0.084
I17	b	7.94	0.071
B10	c	5.47	0.060
J18	c	5.48	0.060
C13	a & WG	7.75	0.095
G17	a & WG	7.75	0.095
D16	c & WG	6.42	0.072

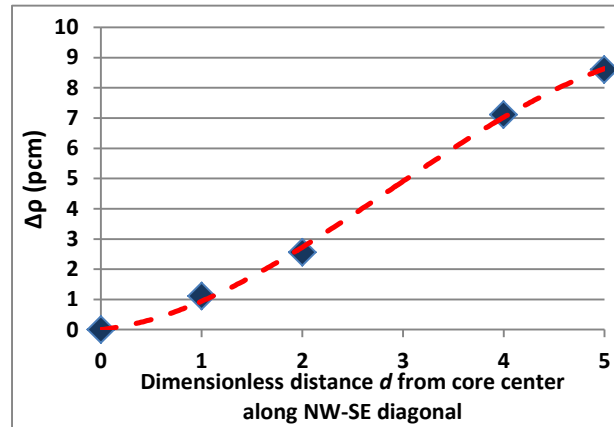


Fig. 10. Differenze di worth tra barre di controllo simmetriche come funzione della loro posizione nel nocciolo.

Nella stessa figura una correlazione cubica è graficata in rosso:

$$\Delta p(d) \cong 0.369d + 0.6482d^2 - 0.0753d^3$$

con $R^2 = 0.9989$. La distanza adimensionale d è definita come $d = r/\sqrt{2}p$, essendo p il pitch tra assembly e r la distanza fisica lungo la diagonale.

Considerando gli assembly più esterni del set di Tabella II, è possibile scrivere una funzione dipendente dall'azimut:

$$\Delta p(\vartheta) \cong 5.034 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} - \vartheta\right) + 2.344 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \vartheta\right)$$

che è una combinazione lineare della funzione seno e della funzione lineare dell'azimut. L'angolo azimutale è definito in senso orario, essendo zero sull'asse y del nocciolo. La regressione ha un R^2 di 0.9962 ed è graficata in Figura 11.

Combinando assieme tutte le correlazioni ottenute e dopo un'opportuna normalizzazione, si ottiene:

$$\Delta P_0(d, \vartheta) \cong \frac{(0.369d + 0.6482d^2 - 0.0753d^3)}{120.3 \cdot (8.6)^2} \cdot \left(5.034 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} - \vartheta\right) + 2.344 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \vartheta\right)\right) \cdot \Delta p_{max}$$

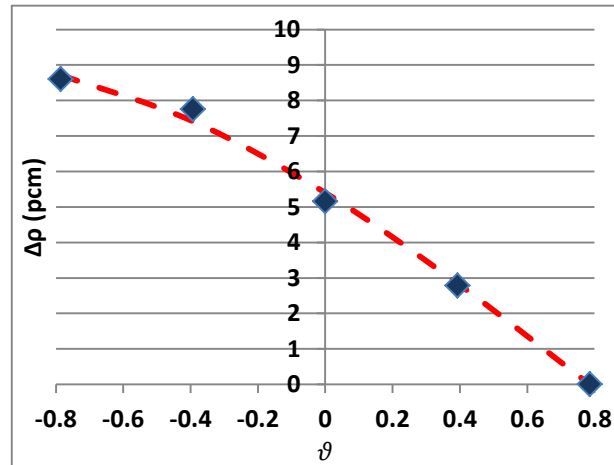


Fig. 11. Differenza di worth tra barre di controllo esterne simmetriche come funzione dell'azimut.

A dispetto di alcune differenze secondarie che comunque possono essere facilmente spiegate ricorrendo all'approccio teorico descritto di seguito e ad una precisione statistica limitata dalla ridotta dimensione del campione, si può quindi concludere che, in generale, per un nocciolo con riflettore pesante a inizio ciclo e a potenza zero, esiste una chiara correlazione tra il power tilt e il valore di antireattività differenziale delle barre di controllo.

Resta evidente che questa correlazione deve essere generalizzata e confermata per ogni altra configurazione di interesse.

IV. Interpretazioni tramite la Teoria delle Perturbazioni

La teoria della perturbazioni fornisce un riferimento teorico che aiuta a comprendere e spiegare i risultati sin qui ottenuti. Se indichiamo con "0" lo stato critico iniziale del nocciolo tiltato, con "1" lo stato perturbato caratterizzato dall'inserzione di una barra di controllo e con "2" un secondo stato perturbato caratterizzato dall'inserzione della barra simmetrica alla precedente, si possono scrivere le seguenti equazioni:

$$(\hat{A}_0 - \hat{P}_0)\varphi_0 = 0 \quad (2)$$

$$(\hat{A}_1 - \lambda_1 \hat{P}_1)\varphi_1 = 0 \quad (3)$$

$$(\hat{A}_2 - \lambda_2 \hat{P}_2)\varphi_2 = 0 \quad (4)$$

dove $\hat{A}_i - \lambda_i \hat{P}_i = \hat{H}_i$ per $i=0,1,2$ esprime, nella forma usuale degli operatori, il bilancio tra produzione e rimozione della popolazione neutronica del sistema. Adottando il

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 – 051	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 14	di 19
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

formalismo convenzionale della Teoria Classica delle Perturbazioni – CPT [8] -, i valori di antireattività delle barre di controllo ($i=1,2$) sono espressi come:

$$\rho_i = 1 - \lambda_i = - \frac{\langle \varphi_0^* | \Delta \hat{H}_i \varphi_i \rangle}{\langle \varphi_0^* | \hat{P}_i \varphi_i \rangle} \quad (5)$$

dove $\Delta \hat{H}_i = \hat{H}_i - \hat{H}_0$.

Da cui si ottiene:

$$\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1 = - \frac{\langle \varphi_0^* | \Delta \hat{H}_2 \varphi_2 \rangle}{\langle \varphi_0^* | \hat{P}_2 \varphi_2 \rangle} + \frac{\langle \varphi_0^* | \Delta \hat{H}_1 \varphi_1 \rangle}{\langle \varphi_0^* | \hat{P}_1 \varphi_1 \rangle} \quad (6)$$

Sotto le seguenti ipotesi:

$$\begin{aligned} \langle \varphi_0^* | \hat{P}_1 \varphi_1 \rangle &\cong \langle \varphi_0^* | \hat{P}_2 \varphi_2 \rangle = F \\ \langle \varphi_0^* | \Delta \hat{H}_1 \varphi_1 \rangle - \langle \varphi_0^* | \Delta \hat{H}_2 \varphi_2 \rangle &\cong \langle \varphi_0^* | \Delta \hat{H} (\varphi_1 - \varphi_2) \rangle \end{aligned} \quad (7)$$

l'equazione (6) diventa:

$$\Delta \rho \cong F^{-1} \langle \varphi_0^* | \Delta \hat{H} (\varphi_1 - \varphi_2) \rangle \quad (8)$$

Tale equazione mostra che se esiste una variazione di flusso, da cui un tilt, questa è proporzionale alla variazione del valore di antireattività della barra di controllo. La validità dell'assunzione (7) è stata verificata numericamente.

Il passo successivo consiste nell'introdurre una forma esplicita, sebbene semplice, per $\Delta \hat{H}_i$:

$$\Delta \hat{H}_i = H_i \delta(x - x_i)$$

dove x_i è la posizione nel piano del nocciolo dell'inserzione della barra di controllo, δ è la distribuzione delta di Dirac, and H_i è un coefficiente che esprime la variazione locale delle sezioni d'urto efficaci per effetto della barra di controllo. Una volta inserita in (5), insieme con la prima delle ipotesi (6) ed usando la forma classica

$$\langle f | \hat{M} g \rangle = \int dy dx f(y) M(x, y) g(x)$$

per la doppia integrazione (l'integrazione sulla variabile energia non è esplicitamente indicata), si ha che

$$\rho_i = - \frac{H_i}{F} \varphi_i(x_i) \int dy \varphi_0^*(y)$$

per cui, se consideriamo che con barre di controllo simmetriche $H_1 = H_2$, l'equazione (6) diviene:

$$\Delta \rho \cong \alpha (\varphi_2(x_2) - \varphi_1(x_1)) = \beta_1 (P_2(x_2) - P_1(x_1)) \quad (9)$$

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 – 051	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 15	di 19
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

dove $P_i(x)$ è il valore della distribuzione di potenza collassata assialmente nella posizione x con barra i -esima inserita, e α e β sono coefficienti di proporzionalità. Per un nocciolo simmetrico non tiltato si ha che $P_2(x_2) = P_1(x_1)$, da cui $\Delta\rho = 0$.

L'equazione (9) può quindi essere riscritta:

$$\Delta\rho \cong \beta_1[(P_2(x_2) - P_0(x_2)) - (P_1(x_1) - P_0(x_1)) + (P_0(x_2) - P_0(x_1))] \quad (10)$$

dove l'ultimo termine differenziale nella parte destra dell'equazione è una misura del tilt di potenza locale nel nocciolo originale tiltato senza barre di controllo inserite (si veda a tal proposito la Figura 8). Usando la teoria delle perturbazioni al primo ordine, l'equazione (8) si semplifica direttamente in

$$\Delta\rho \cong \beta_0(P_0(x_2) - P_0(x_1)) \quad (11)$$

che può essere utilizzata, se confrontata con la (10), per introdurre una relazione tra β_1 e β_0 :

$$\frac{(P_2(x_2) - P_0(x_2)) - (P_1(x_1) - P_0(x_1))}{(P_0(x_2) - P_0(x_1))} + 1 = \frac{\beta_0}{\beta_1} = m. \quad (12)$$

L'equazione (11) è fondamentalmente un'espressione della regressione trovata con i dati di Tabella II, ossia l'equazione (1).

Si può perciò concludere che la teoria delle perturbazioni al primo ordine, assieme alle approssimazioni introdotte in questo paragrafo, è in grado di spiegare i risultati per gli assembly di Tabella II.

Anche l'equazione (9) è stata verificata numericamente; tuttavia le incertezze dei calcoli associate ad una distribuzione di potenza fortemente distorta dall'inserzione di una singola barra di controllo, col suo elevato gradiente spaziale, impedisce di associare un robusto significato statistico alla regressione lineare ottenuta.

In Figura 11 sono stati graficati i risultati numerici sin qui ottenuti usando il flusso perturbato (punti blu) e quello imperturbato (punti rossi). I punti rossi sono quelli riportati in Figura 9. Per raggruppare punti di dati simili sono state usate delle ellissi. Che la dispersione dei punti blu attorno alla loro regressione lineare ($\Delta\rho \cong 253.1 \cdot (P_2 - P_1)$ con $R^2=0.8644$) sia distribuita casualmente è un'indicazione del fatto che i dati della distribuzione di potenza sono affetti da errori di tipo numerico. Il valore medio del rapporto m nell'equazione (12) è pari a -0.47.

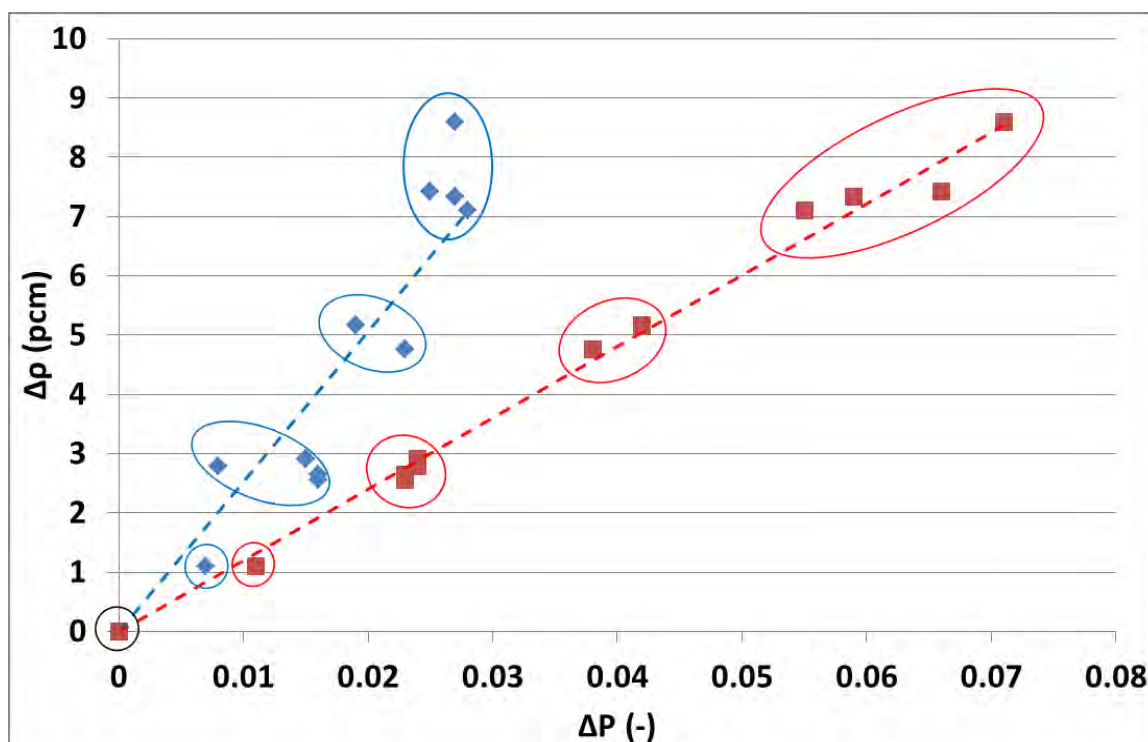


Fig. 11. Confronto delle regressioni lineari eq. (11) in rosso ed equazione (9) in blu.

Infine si noti che l'equazione (8) è valida, in principio, anche a potenza, e non solo quindi in condizioni di HZP, e questo perché il feedback termico è già incluso in φ_1 e φ_2 e il suo effetto su $\Delta \hat{H}$ dovrebbe essere abbastanza modesto.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 – 051	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 17	di 19
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

IV. Conclusioni

Il feedback maturato dall'esperienza operativa dei PWR di seconda generazione ha mostrato che, soprattutto a inizio ciclo, alcune configurazioni di nocciolo possono essere affette da un disequilibrio di potenza azimutale in condizioni statiche, noto come "tilt di potenza", la cui origine, pur non essendo ancora precisamente e pienamente compresa, dipende dalla combinazione casuale di molti parametri.

Il presente lavoro mostra che, nonostante alcune approssimazioni minori e le difficoltà dovute alla dimensione abbastanza piccola del campione di misura, la CPT può fornire un supporto teorico efficace per analizzare il problema della misura dei tilt di potenza attraverso, eventualmente, misure differenziali dell'antireattività delle barre di controllo.

La metodologia può essere adottata:

- nei casi di assenza e/o indisponibilità di sistemi di misura appropriati in alcuni progetti e/o in alcune circostanze operative;
- nei casi in cui le tecniche di misura convenzionali possono presentarsi insufficienti o non abbastanza precise.

È evidente che prima di un qualsiasi utilizzo per scopi pratici, questa metodologia deve essere generalizzata e confermata per tutte le configurazioni di nocciolo di interesse. Inoltre, accurate strategie di misura dovrebbero essere adottate per far fronte a piccole differenze di reattività in caso di tilt piccoli; per esempio potrebbe essere prevista la compensazione del valore di antireattività di una barra con il contenuto di boro nel moderatore in modo da avere misure di reattività estremamente precise.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 – 051	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 18	di 19
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il CEA per il supporto fornito al presente studio attraverso il codice CRONOS2.

Il codice APOLLO2 è sviluppato dal CEA ed è di proprietà di CEA, EDF e AREVA NP.

Il codice CRONOS2 è sviluppato ed è di proprietà del CEA.

Abbreviazioni

ARO: All Rods Out –Barre di controllo estratte

BOC: Beginning of Cycle – Inizio ciclo

CPT: Classical Perturbation Theory – Teoria delle perturbazioni classica

H/D: height-to-diameter ratio – Rapporto altezza su diametro

HZP: Hot Zero Power – Reattore caldo a potenza zero

NE-SW: North-East South-West – Nord-Est Sud-Ovest

NW-SE: North-West South-East – Nord-Ovest Sud-Est

pcm: per cent mille – per centomila

SIC: silicium-indium-cadmium – silicio-indio-cadmio

WG: Water Gap – Intervallo d’acqua

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 – 051	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 19	di 19
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

Riferimenti bibliografici

1. N. KERKAR e P. Paulin, Exploitation des cœurs REP, chapters 6.1.6 and 7.2.2.5, EDP Sciences, Les Ulis (2008).
2. A. SARGENI, K. W. Burn e G. B. Bruna, “Coupling effects in large reactor cores: the impact of heavy and conventional reflectors on power distribution perturbations,” Proc. of the PHYSOR 2014 International Conference, Tokyo, Japan (2014).
3. K. W. BURN, G. B. Bruna e B. Normand, “Impact of the heavy steel reflector of a current large PWR design on some safety features,” Trans. of the TOPSAFE 2012 International Conference, Helsinki, Finland (2012).
4. D. MATTIOLI, R. PERGREFFI, F. ROCCHI, Acquisizione del Codice FLICA: Metodi di calcolo utilizzati nei codici francesi per l'analisi termoidraulica di nocciolo dei PWR, ENEA, ADPFISS – LP1 – 011, Bologna (2013).
5. W. M. STACEY, Nuclear Reactor Physics, chapter 16, John Wiley & Sons, New York (2001).
6. K. OBAIDURRAHMAN e O. P. Singh, “Spatial neutronic coupling aspects in nuclear reactors,” Nuclear Engineering and Design, 240, 2755 (2010).
7. K. IVANOV, M. Avramova, S. Kamerow I. Kodeli, E. Sartori, E. Ivanov e O. Cabellos, OECD/NEA, Benchmarks for uncertainty analysis in modelling (UAM) for the design, operation and safety analysis of LWRs. Volume I: Specification and Support Data for Neutronics Cases (Phase I), NEA/NSC/DOC(2013)7 (2013).
8. A. GANDINI, “Generalized perturbation theory (GPT) methods. A heuristic approach”. In: Lewins, J., Becker, M. (eds.), Advances in Nuclear Science and Technology, vol. 19. Plenum Publishing Corporation (1987).