



Ricerca di Sistema elettrico

# Valutazione della Rappresentatività di Esperienze di Trasporto Neutronico in Piombo in una Facility Collocata nel Vano Colonna Termica del Reattore TAPIRO

*A. Gandini, Luca Ricci, Nunzio Burgio*



## Valutazione della Rappresentatività di Esperienze di Trasporto Neutronico in Piombo in una Facility Collocata nel Vano Colonna Termica del Reattore TAPIRO

Augusto Gandini, Luca Ricci - CIRTEN UNIROMA1, Nunzio Burgio ENEA

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

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

Obiettivo: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Responsabile del Progetto: Mariano Tarantino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione"

Responsabile scientifico ENEA: Mariano Tarantino

Responsabile scientifico CIRTEN: Giuseppe Forasassi

**Titolo**
**VALUTAZIONE DELLA RAPPRESENTATIVITA' DI ESPERIENZE DI TRASPORTO NEUTRONICO IN PIOMBO  
IN UNA FACILITY COLLOCATA NEL VANO COLONNA TERMICA DEL REATTORE TAPIRO**
**Descrittori**

**Tipologia del documento:** Rapporto Tecnico  
**Collocazione contrattuale:** Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione  
**Argomenti trattati:** Neutronica  
 Reattori Nucleari veloci  
 Generation IV Reactors

**Sommario**

Il TAPIRO è un reattore sorgente di neutroni veloci con potenza di 5kW operante presso il Centro Ricerche dell'ENEA/CASACCIA dal 1971. Il reattore è costituito da un nocciolo ad alto arricchimento in lega uranio-molibdeno raffreddato a elio e circondato da un riflettore di rame e un grande schermo biologico in calcestruzzo. Dei canali di varie dimensioni e con differenti spettri di neutroni sono distribuiti intorno al nocciolo. Un grande cavità sperimentale, denominata colonna termica (parallelepipedo di circa 2 m<sup>3</sup>), è utilizzabile per l'installazione di facilities sperimentali a scopo di ricerca. Lo scopo di questo lavoro è quello di descrivere le caratteristiche principali del TAPIRO come reattore di ricerca a neutroni veloci ed analizzare, mediante codici di simulazione di tipo deterministico (ERANOS) e probabilistico (MCNP), la fattibilità di una campagna sperimentale di propagazione dei neutroni in piombo, utilizzando la colonna termica del reattore. Delle misure di tassi di reazione a soglia, rappresentativi dello spettro neutronico e quindi ben correlati ai parametri integrali di reattori di riferimento refrigerati a piombo, possono rappresentare una valida base di dati per contribuire alla progettazione della prossima generazione di LFR. A questo riguardo, un fattore chiave è rappresentato dall'utilizzo del coefficiente di correlazione tra i parametri integrali, per esempio l'effetto di vuoto del refrigerante e l'effetto Doppler, e i tassi di reazione a soglia considerati.

**Note**
**Contributori**

Augusto Gandini CIRTEN- Sapienza Università di Roma  
 Luca Ricci CIRTEN- Sapienza Università di Roma  
 Nunzio Burgio ENEA


**Copia n.**
**In carico a:**

|      |             |          |       |               |              |              |
|------|-------------|----------|-------|---------------|--------------|--------------|
| 2    |             |          | NOME  |               |              |              |
|      |             |          | FIRMA |               |              |              |
| 1    |             |          | NOME  |               |              |              |
|      |             |          | FIRMA |               |              |              |
| 0    | EMISSIONE   | 19/09/14 | NOME  | Nunzio Burgio | M. Tarantino | M. Tarantino |
|      |             |          | FIRMA |               |              |              |
| REV. | DESCRIZIONE | DATA     |       | REDAZIONE     | CONVALIDA    | APPROVAZIONE |

|                                                                                                                    |                                                        |                  |                      |                  |                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------|----------------------|------------------|-----------------|
|  <b>Ricerca Sistema Elettrico</b> | <b>Sigla di identificazione</b><br>ADPFISS – LP2 - 048 | <b>Rev.</b><br>0 | <b>Distrib.</b><br>L | <b>Pag.</b><br>2 | <b>di</b><br>18 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------|----------------------|------------------|-----------------|

## Sommario

|    |                                               |    |
|----|-----------------------------------------------|----|
| A. | Introduzione.....                             | 3  |
| B. | dati integrali. analisi di correlazione ..... | 4  |
| C. | Descrizione dell’impianto TAPIRO.....         | 6  |
| D. | Il reattore di riferimento ELSY .....         | 7  |
| E. | Specifiche dei calcoli.....                   | 8  |
| F. | Risultati.....                                | 12 |
| G. | Conclusioni .....                             | 15 |
| H. | Bibliografia.....                             | 17 |

|                                                                                                                    |                                                       |                  |                      |                  |                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|----------------------|------------------|-----------------|
|  <b>Ricerca Sistema Elettrico</b> | <b>Sigla di identificazione</b><br>ADPFIS – LP2 - 048 | <b>Rev.</b><br>0 | <b>Distrib.</b><br>L | <b>Pag.</b><br>3 | <b>di</b><br>18 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|----------------------|------------------|-----------------|

## A. Introduzione

Durante gli anni settanta presso il Centro di Ricerche ENEA/Casaccia c'è stato un forte impegno nello sviluppo ed utilizzo di metodi per l'utilizzo di dati sperimentali relativi a quantità integrali misurate in facilities critiche, le cosiddette informazioni 'a posteriori' secondo la terminologia Bayesiana, con l'obiettivo di 'aggiustare' i dati di sezioni d'urto neutroniche a gruppi, la cosiddetta informazione 'a priori', mediante l'adozione di metodi di inferenza probabilistica. Tale impegno si basava sulla possibilità di calcolare rapidamente i coefficienti di sensitività necessari al suddetto metodo avvalendosi della metodologia perturbativa generalizzata (GPT), in sviluppo nello stesso periodo [1, 2]. Tale approccio per l'aggiustamento dei dati differenziali venne proposto in alcuni casi anche per sfruttare dei dati sperimentali misurati in campagne di misure benchmark di schermaggio [3]. Come già accennato, il metodo di aggiustamento è basato su metodi di inferenza statistica e venne proposto per la prima volta da Linnik [4]. Questa metodologia, adattata al campo nucleare, è illustrata in Ref [5] e [6]. Secondo quanto indicato nella referenza [5], i dati nucleari da aggiustare vengono assunti in forma multi-gruppo, il che, a quel tempo, venne considerato come un'inevitabile limitazione. Un consistente impegno per l'applicazione della suddetta metodologia per la definizione di librerie ottimali di set di sezioni d'urto multi-gruppo, così come per la valutazione delle relative matrici di varianza/covarianza, sulla base di esperimenti integrali, è stato in ogni caso perseguito presso diversi laboratori (vedi commenti su questa ed equivalenti metodologie in Ref. [7]). In particolare, negli anni '70 e '80 presso il CEA venne deciso di utilizzare esperimenti integrali per valutare le incertezze associate alle sezioni d'urto multi-gruppo mediante procedure di aggiustamento. La libreria ERALIB1 [8] usato con il codice ERANOS [9] è il risultato di questa metodologia.

L'interesse per la qualità dei dati integrali di riferimento è in aumento, così come stanno crescendo gli sforzi per quantificare e ridurre le incertezze dei dati nucleari al fine di soddisfare le esigenze di precisione dei calcoli dei reattori di nuova generazione. L'International Reactor Physics Experiment Evaluation Project (IRPhEP) e l'International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project (ICSBEP) continuano ad espandere i loro sforzi e ampliare il loro campo di applicazione per identificare, valutare e fornire dati integrali di riferimento per la convalida di metodi e dati. Le specifiche dei modelli benchmark forniti da questi due progetti sono intensamente utilizzate dalle comunità scientifiche internazionali nei campi della fisica del reattore, dei dati nucleari e della sicurezza sulla criticità [10]. Da notare che nella base di dati integrali IRPhEP sono inclusi anche esperimenti relativi al reattore TAPIRO come descritto nella Ref [11].

|                                                                                                                    |                                                       |                  |                      |                  |                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|----------------------|------------------|-----------------|
|  <b>Ricerca Sistema Elettrico</b> | <b>Sigla di identificazione</b><br>ADPFIS – LP2 - 048 | <b>Rev.</b><br>0 | <b>Distrib.</b><br>L | <b>Pag.</b><br>4 | <b>di</b><br>18 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|----------------------|------------------|-----------------|

Le attività più significative svolte sul reattore TAPIRO e connesse al presente lavoro sono state effettuate nei primi anni '70 per studiare la propagazione dei neutroni lungo l'asse di un grande serbatoio di sodio inserito al posto della colonna grafite. Venne allora effettuata una campagna di misure in collaborazione con il CEA di Cadarache, all'interno del programma sui reattori veloci. Tale campagna aveva uno scopo simile a quello dell'attività proposta in questo lavoro, cioè, quella di testare, e aiutare a migliorare la capacità dei codici neutronici a riprodurre le grandezze misurate [12].

Il presente lavoro è focalizzato ad una analisi preliminare di misure relative ad esperienze di propagazione neutronica in un blocco di piombo posto nella colonna termica del reattore TAPIRO. In particolare, la metodologia GPT su menzionata è stata applicata per studiare potenziali correlazioni tra i valori misurati in queste esperienze e delle quantità integrali significative di un sistema di riferimento, rappresentato per questi studi dal reattore ELSY. Per questa analisi sono stati utilizzati i codici MCNPX [13] ed ERANOS [9].

## B. dati integrali. analisi di correlazione

Si assuma che le informazioni sperimentali disponibili sia contenuta nelle misure di quantità integrali  $Q_{A,\ell}$  ( $\ell = 1, 2, \dots, L$ ) ottenute su una facility sperimentale (sistema A). Questa informazione deve essere trasferita a un insieme di quantità  $Q_{B,m}$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) relativo a un sistema di riferimento (sistema B). Definiamo le matrici di sensitività il  $(L \times J)$  e  $(M \times J)$  sensitività le matrici  $S_A$  e  $S_B$ , con elementi rispettivamente,

$$s_{A,\ell j} = \frac{p_{o,j}}{Q_{A,\ell}^{cal}} \frac{\partial Q_{A,\ell}}{\partial p_j} \quad (2.1)$$

$$s_{B,mj} = \frac{p_{o,j}}{Q_{B,\ell}^{cal}} \frac{\partial Q_{B,m}}{\partial p_j} \quad (2.2)$$

che può essere calcolato con metodi GPT [1,2].

La trasposizione delle informazioni sperimentali al set delle quantità  $Q_{B,m}$  può essere effettuata utilizzando diversi metodi di inferenza probabilistica, per esempio, quello dei moltiplicatori di Lagrange [13]. Come risultato si possono ottenere delle stime aggiustate delle quantità  $Q_{B,m}$  o, in una forma più conveniente, le stime delle quantità relative

$$y_{B,m} = \frac{Q_{B,m} - Q_{B,m}^{cal}}{Q_{B,m}^{cal}} \quad (2.3)$$

dove  $Q_{B,m}^{cal}$  rappresenta le stesse quantità calcolate con l'informazione differenziale 'a priori'.

Il vettore  $\tilde{y}_B$  delle nuove stime, definito come

$$\tilde{y}_{B,m} = \frac{\tilde{Q}_{B,m} - Q_{B,m}^{cal}}{Q_{B,m}^{cal}}, \quad (2.4)$$

risulta [13]

$$\tilde{y}_B = S_B C_p S_A^T (C_A + S C_p S_A^T)^{-1} y_A^{ex} \quad (2.5)$$

dove  $C_A$  è la matrice di dispersione dei dati sperimentali integrali e dove  $y_A^{ex}$  è un vettore di elementi

$$y_{A,\ell}^{ex} = \frac{Q_{A,\ell}^{ex} - Q_{A,\ell}^{cal}}{Q_{A,\ell}^{cal}} \quad (2.6)$$

Consideriamo ora il caso estremo in cui si voglia valutare una singola quantità  $Q_B$  rispetto al sistema di riferimento, sulla base delle informazioni contenute in una singola misura,  $Q_{A,1}^{ex}$ , più o meno correlata con  $Q_B$ . Seguendo la procedura su indicata si ottiene la stima della sua correzione relativa,

$$\frac{\tilde{y}_B}{\epsilon_B} = r_{B,1} \frac{y_{A,1}^{ex}}{\epsilon_{A,1}}, \quad (2.7)$$

dove  $r_{B,1}$  è il coefficiente di correlazione

$$r_{A,1} = \frac{S_{A,1}^T D S_B}{\sqrt{(S_{A,1}^T D S_{A,1})(S_B^T D S_B)}} \quad (2.8)$$

mentre  $\epsilon_{A,1}$  e  $\epsilon_B$  sono errori a priori associati a  $Q_{A,1}^{cal}$  e  $Q_B^{cal}$ , rispettivamente. Da questa equazione possiamo chiaramente osservare che, come prevedibile, la correzione relativa  $\tilde{y}_B$

|                                                                                                                    |                                                       |                  |                      |                  |                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|----------------------|------------------|-----------------|
|  <b>Ricerca Sistema Elettrico</b> | <b>Sigla di identificazione</b><br>ADPFIS – LP2 - 048 | <b>Rev.</b><br>0 | <b>Distrib.</b><br>L | <b>Pag.</b><br>6 | <b>di</b><br>18 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|----------------------|------------------|-----------------|

aumenta proporzionalmente con il coefficiente di correlazione  $r_{B,1}$ , con l'errore a priori  $\varepsilon_B$  e con il rapporto  $y_{A,1}^{ex}/\varepsilon_{A,1}$ .

Da notare che il valore  $r_{A,1}$  è compreso tra 0 e 1. Più ci si avvicina all'unità, tanto più l'informazione inerente all'esperimento in A è significativo rispetto alla quantità integrale considerata nel sistema di riferimento. Il coefficiente di correlazione espresso dall'Eq. (2.8) può essere definito come 'relativo' in quanto viene assegnato un peso maggiore ai gruppi energetici in cui le sezioni d'urto sono affette da errori relativi più grandi. Un coefficiente di correlazione 'assoluto', cioè indipendente dagli errori dei dati nucleari, può essere analogamente definito con la stessa espressione (2.8) in cui la matrice di dispersione D sia sostituita da una matrice unitaria.

### C. Descrizione dell'impianto TAPIRO

TAPIRO (TAratura Pila Rapida a Potenza 0) è un reattore veloce sorgente di neutroni entrato in operazione nel 1971 con una potenza termica massima di 5 kW. Il progetto, interamente sviluppato dallo staff di ENEA, si basava sul concetto generale del reattore AFSR (Argonne Fast Source Reactor - Idaho Falls). Dal 1971 è stato utilizzato per varie esperienze riguardanti, in particolare, lo schermaggio dei reattori veloci, gli effetti biologici, il danneggiamento dei componenti elettronici.

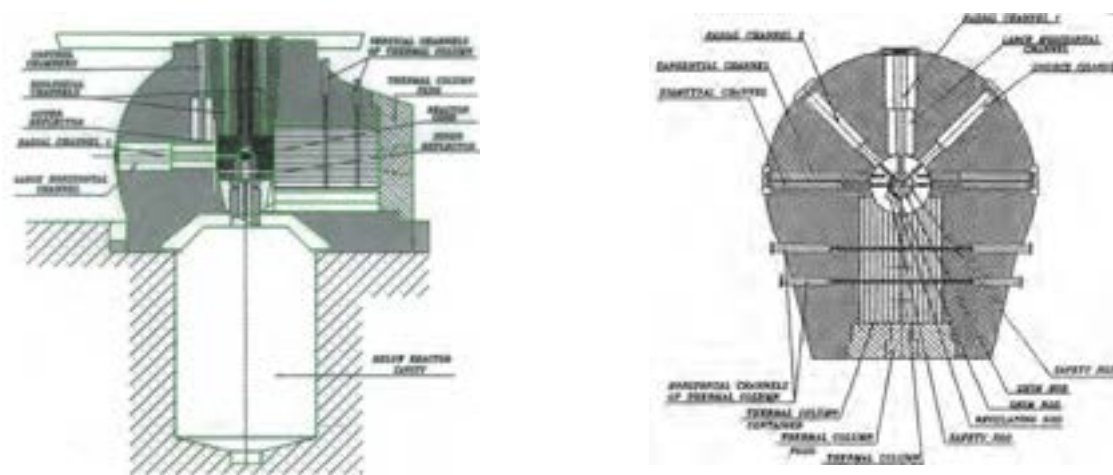
Il reattore ha un nocciolo cilindrico, di circa 6 cm di raggio e 11 cm di altezza, composto da una lega omogenea di uranio altamente arricchito e molibdeno (98,5% U, 1,5% Mo in peso). Il nocciolo è diviso in due parti: quella superiore è fissata alla struttura del reattore mentre quella inferiore è mobile e può essere fatta cadere per un arresto rapido del sistema. Per una potenza termica maggiore di 50 W il nocciolo è raffreddato per mezzo di circolazione forzata di elio. Il nocciolo è completamente circondato da un riflettore di rame di forma cilindrica di circa 30 cm di spessore. Il riflettore è diviso in due blocchi concentrici: un blocco interno dello spessore di 10 cm, contenuto all'interno del sistema di raffreddamento primario, e un blocco esterno di spessore di circa 20 cm. Infine, il reattore è circondato da schermatura calcestruzzo borato dello spessore di circa 170 cm.

Il reattore è controllato da 5 barre di controllo, in rame, posizionate in 5 cavità realizzate nel riflettore interno in cui le barre possono essere spostate controllando in tal modo il leakage, e quindi il numero di fissioni nucleari all'interno del nucleo.

Inoltre, un rapido arresto del sistema può essere realizzato facendo cadere la parte mobile del nocciolo. Per consentire le misure di irraggiamento il reattore ha 6 principali canali sperimentali (4 orizzontali e 2 verticali) e una grande cavità, denominata colonna termica (un parallelepipedo di  $110 \times 110 \times 160 \text{ cm}^3$ ). Un canale mediano che attraversa il nocciolo consente irraggiamenti di piccoli

campioni) in uno spettro quasi di fissione. Nella colonna termica è possibile ottenere uno spettro di neutroni più energetici rimuovendo dal riflettore esterno un settore di 60°. Alla massima potenza termica, l'intensità totale della sorgente neutronica integrata nel nocciolo è di circa  $3 \times 10^{14}$  n/s cui corrisponde un flusso neutronico totale di circa  $4 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>/s al centro del nocciolo ed un flusso neutronico totale di circa  $1.5 \times 10^{10}$  n/cm<sup>2</sup>/s all'ingresso della colonna termica.

Le sezioni verticale ed orizzontale del reattore sono illustrate nella Figura 1.



**Fig. 1. TAPIRO: sezione verticale (a sinistra) e sezione orizzontale (a destra)**

## D. Il reattore di riferimento ELSY

Il progetto ELSY - European Lead Fast Reactor - è stato sviluppato dal settembre 2006 al febbraio del 2010, nell'ambito del Sesto programma quadro dell'Euratom [14]. Il progetto di riferimento ELSY è un reattore di 600 MWe a piscina refrigerato a piombo. Il progetto ELSY dimostra la possibilità di progettare un reattore critico veloce competitivo e sicuro utilizzando caratteristiche tecniche di ingegneria semplici, pienamente conformi con l'obiettivo della Generation IV della sostenibilità e capacità di incenerimento degli attinidi minori (MA). Attualmente il progetto ELSY prevede due possibili configurazioni geometriche: la prima prevede elementi rettangolari, la seconda elementi esagonali. La Tabella 1 riporta i dati di riferimento relativi alla configurazione con elementi rettangolari sulla quale è basato il modello utilizzato per i calcoli di simulazione illustrati nel paragrafo seguente.

**Tabella 1. Le caratteristiche principali di ELSY**

| CONFIGURAZIONE DI RIFERIMENTO                              |                     | UNITA' |
|------------------------------------------------------------|---------------------|--------|
| POTENZA TERMICA                                            | 1530                | MW     |
| NUMERO DI ELEMENTI DI COMBUSTIBILE                         | 272                 |        |
| DIAMETRO DEL NOCCIOLO (D)                                  | 5,24                | m      |
| ALTEZZA TOTALE (H)                                         | 3,63                | m      |
| ALTEZZA ATTIVA                                             | 1,11                | m      |
| PINS PER ELEMENTO DI COMBUSTIBILE (FA)                     | 17x17- 5 pins (284) |        |
| NUMERO DI FAs INTERNE/INTERMEDIE/ESTERNE                   | 132/72/68           |        |
| ARRICCHIM. IN Pu NELLE FAs INTERNE/INTERMEDIE/ESTERNE (VF) | 13,4/15/18,5        | %      |
| POTENZA LINEARE MEDIA                                      | 220                 | W/cm   |
| TEMPERATURA D'INGRESSO DEL REFRIGERANTE                    | 400                 | °C     |
| TEMPERATURA IN USCITA DEL REFRIGERANTE                     | 480                 | °C     |
| TEMPERATURA MASSIMA DEL CLAD                               | 540                 | °C     |

## E. Specifiche dei calcoli

### 1. Il modello del TAPIRO utilizzato per MCNPX e il calcolo della sorgente

L'indagine della propagazione dei neutroni nella colonna di piombo del TAPIRO per l'analisi di correlazione con il 'reattore di riferimento' ELSY richiede, come si è detto in precedenza, l'utilizzo di metodi di calcolo GPT. Il codice ERANOS, diversamente da MCNPX, consente di eseguire questi calcoli. Tuttavia realizzare un modello affidabile dell'impianto sperimentale TAPIRO per i calcoli con ERANOS presenta delle difficoltà a causa delle sue dimensioni particolarmente ridotte (a differenza del reattore ELSY). Per affrontare questo problema, nel presente lavoro si è deciso di caratterizzare lo spettro neutronico della sorgente all'ingresso della colonna utilizzando il modello del TAPIRO su MCNPX sviluppato presso il Centro di Ricerche ENEA/Casaccia [15]. Successivamente la sorgente di neutroni così stimata è stata implementata in un modello 'semplificato' della colonna di piombo per i calcoli con il codice ERANOS, come illustrato nella sezione successiva. Il modello di input MCNPX TAPIRO è stato opportunamente definito nel corso dell'attività parallela di progettazione della facility in Pb tenuta in questa linea progettuale [16]. Per ERANOS le caratteristiche di emissione della sorgente sono un dato di input che viene fornito attraverso una simulazione MCNPX e l'uso di una tally F1 che misura la corrente di particelle attraverso una superficie definita dall'utente, suddividendo il risultato per gruppi energetici e gruppi angolari definiti rispetto ad una direzione preferenziale. Nel modello MCNPX, la colonna termica è stata riempita con piombo puro e il settore rimovibile del riflettore esterno di rame è stato eliminato (vedi Fig.2). Applicando la tally F1 ad una superficie piana tangente al cilindro del riflettore esterno e indicando come direzione il verso negativo dell'asse X del sistema di riferimento di MCNPX è stato ottenuto lo spettro neutronico e la

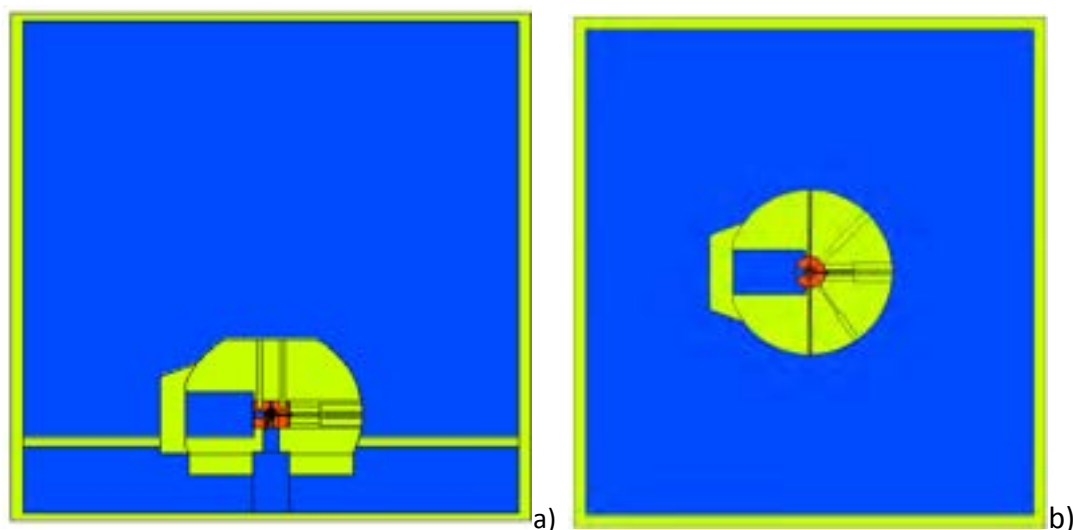
distribuzione della corrente rispetto alla direzione indicata. Il risultato è riportato in forma riassuntiva nella Tabella 2.

**Tabella 2. Suddivisione della stima MCNPX della corrente neutronica all'imbocco del VCT per gruppi energetici ed angolari (caso del VCT in Aria).**

| Gruppo Angolare [gradi] | 180-150 |        | 150-120 |        | 120-90 |        | 90-60  |        | 60- 30 |        | 30-0   |        |
|-------------------------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Gruppo energia [MeV]    | n       | E%     | n       | E%     | n      | E%     | n      | E%     | n      | E%     | n      | E%     |
| 1.0E-7                  | 5.4E-7  | 6.4E-2 | 1.3E-6  | 4.2E-2 | 7.1E-7 | 5.5E-2 | 4.6E-7 | 6.6E-2 | 5.3E-7 | 5.9E-2 | 2.2E-7 | 9.1E-2 |
| 5.0E-3                  | 1.3E-4  | 4.3E-3 | 3.2E-4  | 2.7E-3 | 2.0E-4 | 3.4E-3 | 4.7E-4 | 2.0E-3 | 1.3E-3 | 1.2E-3 | 7.8E-4 | 1.5E-3 |
| 1.0E+0                  | 1.4E-4  | 4.4E-3 | 3.7E-4  | 2.7E-3 | 2.0E-4 | 3.7E-3 | 4.1E-3 | 8.0E-4 | 1.8E-2 | 4.0E-4 | 1.8E-2 | 4.0E-4 |
| 1.0E+1                  | 7.1E-6  | 2.1E-2 | 1.2E-5  | 1.7E-2 | 3.2E-6 | 3.2E-2 | 1.5E-4 | 4.6E-3 | 1.1E-3 | 1.8E-3 | 3.1E-3 | 1.0E-3 |
| 2.0E+1                  | 0.0E+0  | 0.0E+0 | 0.0E+0  | 0.0E+0 | 0.0E+0 | 0.0E+0 | 3.4E-8 | 2.9E-1 | 4.4E-7 | 8.2E-2 | 5.2E-6 | 2.5E-2 |
| total                   | 2.8E-4  | 3.0E-3 | 7.1E-4  | 1.9E-3 | 4.0E-4 | 2.5E-3 | 4.7E-3 | 7.0E-4 | 2.1E-2 | 3.0E-4 | 2.2E-2 | 3.0E-4 |

## 2. Il modello del TAPIRO utilizzato per ERANOS con la sorgente implementata con MCNPX

Poichè il codice ERANOS è in grado di eseguire analisi perturbative e di sensitività solo in dimensione 2D, la facility 'colonna di piombo' del TAPIRO (TLF) è stato modellata come un lastra XY. Il modello, illustrato in Fig.3, consiste in una colonna di piombo circondata da uno schermo biologico di calcestruzzo. All'interno del primo mesh della colonna è stata definita la sorgente esterna di neutroni stimata dal codice MCNPX, come detto prima. Successivamente la propagazione dei neutroni è stata calcolata in approssimazione del trasporto mediante il modulo 2D BISTRO contenuto in ERANOS.



**Fig 2. Sezione laterale (a) e in pianta (b) della geometria di TAPIRO dopo le modifiche.. Sono stati rimossi il blocco di calcestruzzo nel VCT e il settore di riflettore esterno di rame adiacente al vano.**

Lo spettro del flusso neutronico è stato calcolato mediante 3 rivelatori di neutroni collocati in tre diverse posizioni (DET1 a 40 cm, DET2 a 80 cm, DET3 a 140 cm) lungo l'asse centrale della colonna di piombo come illustrato in Fig.3.

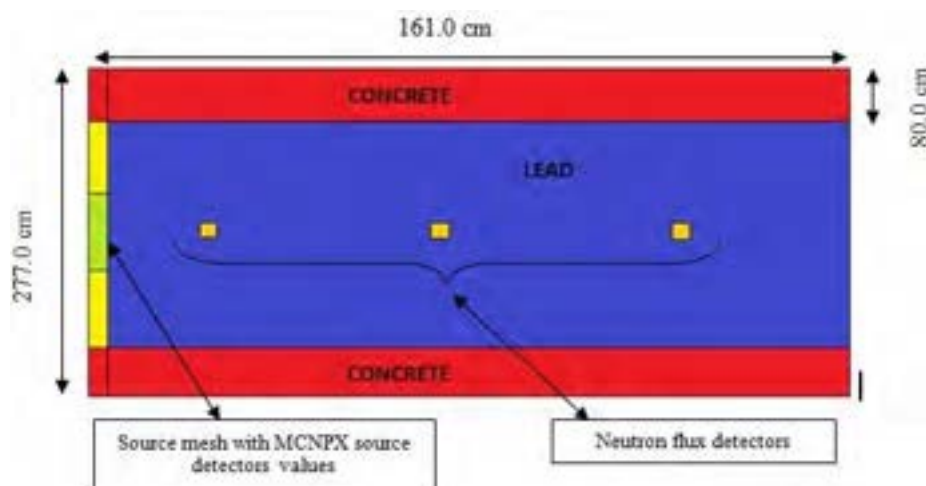


Fig.3. Modello XY della colonna di piombo del TAPIRO

Un controllo di affidabilità delle procedure dei calcoli è stata eseguita confrontando lo spettro neutronico stimato nelle stesse posizioni con il codice di simulazione MCNPX KCODE. Il buon accordo del confronto, in relazione alla prima posizione del rivelatore, può essere osservato in Fig.6.

### 3. Modello RZ ERANOS del reattore di riferimento ELSY

Nel modello ERANOS ELSY è stata assunta una geometria cilindrica RZ con una struttura eterogenea rettangolare della cella dell'elemento di combustibile. Il modello di layout di base utilizzato per i calcoli perturbativi è riportato in Fig.4.

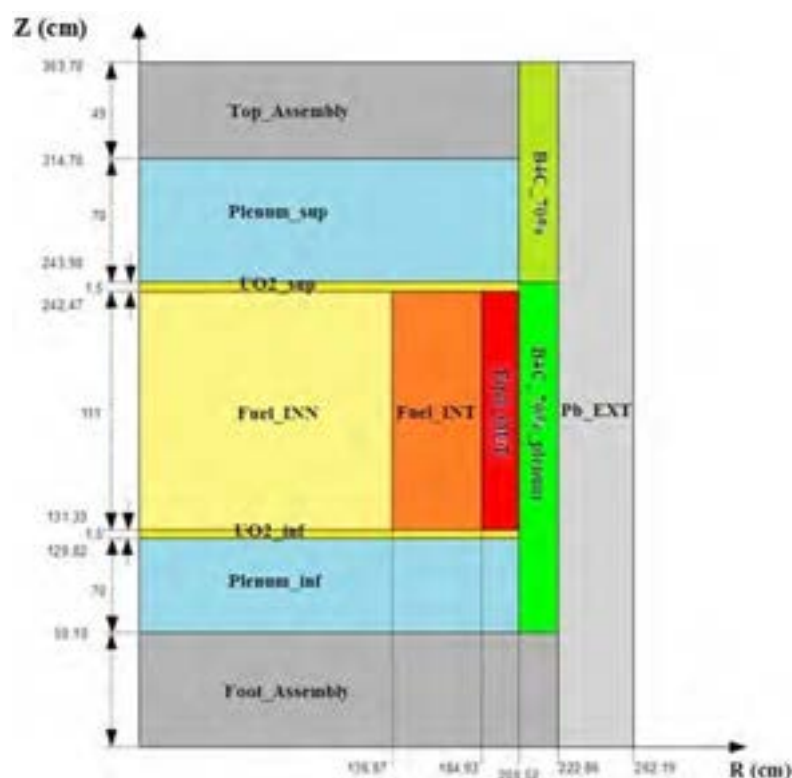


Fig 4. (R-Z) Modello ERANOS ELSY – sezione assiale

Il modello del nocciolo prevede la presenza di tre zone attive a diverso arricchimento (indicate come Fuel\_INN, Fuel\_INT e Fuel\_OUT), circondate radialmente da una zona di barre di controllo (con la 'zona attiva' formata da carburo di boro  $B_4C$  arricchito al 90% in  $B^{10}$ ) e un riflettore esterno di piombo (Pb\_EXT nella figura). L'intera zona di combustibile è circondata assialmente in alto ed in basso da due zone fertili di  $UO_2$  e da due zone entrambi consistenti in un plenum contenente acciaio e piombo, oltre a spazi vuoti, il tutto omogeneizzato in una regione unica. Due zone in acciaio in alto e in basso sono poste a delimitare assialmente il sistema.

#### 4. Calcoli GPT

I calcoli GPT eseguiti con il codice neutronico ERANOS hanno consentito di ottenere i coefficienti di correlazione (Eq. 2.8) tra quantità integrali di interesse relative al reattore ELSY e grandezze misurabili nella facility TAPIRO, più precisamente: tra l'effetto di vuoto del refrigerante (riduzione della densità del piombo del 10%), in ELSY, e gli indici spettrali rappresentati dai tassi di reazione  $f_{U238}/f_{U235}$  e  $f_{Np237}/f_{U235}$ , nel TAPIRO. Tutti i calcoli sono stati effettuati a 33 gruppi energetici, in approssimazione del trasporto  $P_0$  e utilizzando la libreria di dati nucleari JEFF 3.1.

Le procedure di calcolo GPT implicano:

1) Calcolo delle funzioni importanza in relazione ai due indici spettrali considerati e all'effetto di vuoto del refrigerante, per i sistemi TAPIRO ed ELSY, rispettivamente.

2 ) Calcolo dei coefficienti di sensitività (Eq. 2.1, 2.2) per entrambi i sistemi e l'indice spettri.

3) Calcolo del coefficiente di correlazione utilizzando come matrice di dispersione la matrice di varianza-covarianza a 15 gruppi energetici BOLNA [17], sia una matrice unitaria a 33 gruppi energetici, come indicato nella sezione 2.

La funzione importanza è stata calcolata definendo i funzionali relativi agli indici spettrali in una zona di 2x2 mesh quadrati intorno ai seguenti punti:

- TAPIRO: X = 40.0 cm Y = 138.5 cm
- ELSY : R = 68.3 cm Z = 181.85 cm

La scelta di questi punti di calcolo è dovuto alla notevole somiglianza degli spettri neutronici tra i due sistemi, come illustrato nel seguito in Fig. 6.

## F. Risultati

La Fig.5 mostra la stima della sorgente neutronica all'ingresso della colonna di piombo ottenuta con calcoli MCNPX. Si può notare che a partire da un spettro prossimo a quello di fissione nel nocciolo, all'ingresso colonna abbiamo uno spettro di neutroni concentrato attorno ai 300-400 keV.

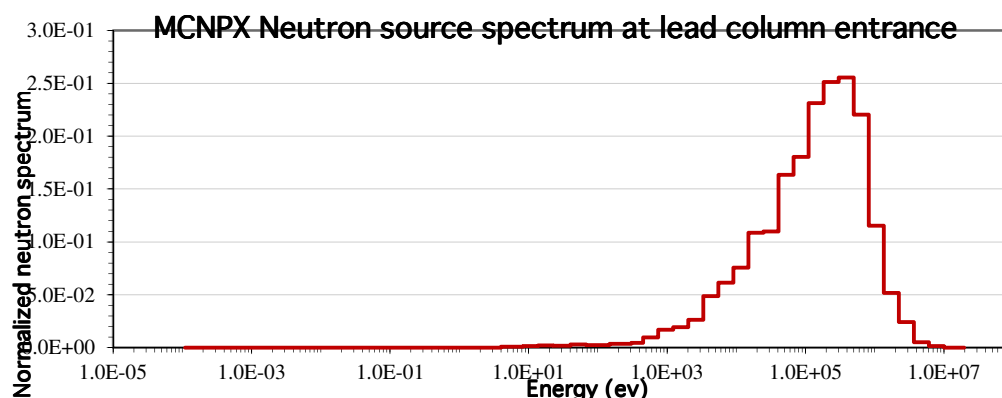


Fig. 5. Spettro della sorgente neutronica calcolata con MCNPX.

La Fig. 6 mostra il confronto ERANOS vs. MCNPX in relazione alla stima del flusso neutronico nella posizione del primo rivelatore. Si possono notare importanti differenze nella zona al di sotto di circa

300 keV. Tali differenze possono incidere sui risultati relativi all'indice spettrale  $f_{\text{Np237}}/f_{\text{U235}}$  tenendo conto della soglia.

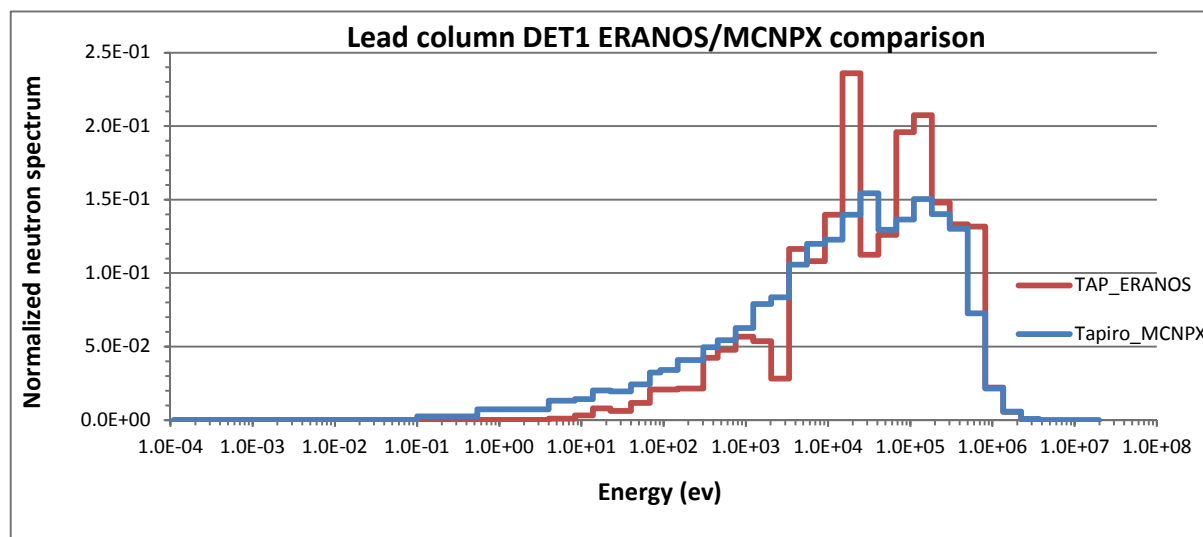


Fig. 6. Spettri neutronici ottenuti da calcoli con i codici ERANOS/MCNPX nella posizione del rivelatore 1.

La Fig.7 mostra l'attenuazione del flusso neutronico lungo l'asse centrale della colonna di piombo del TAPIRO.

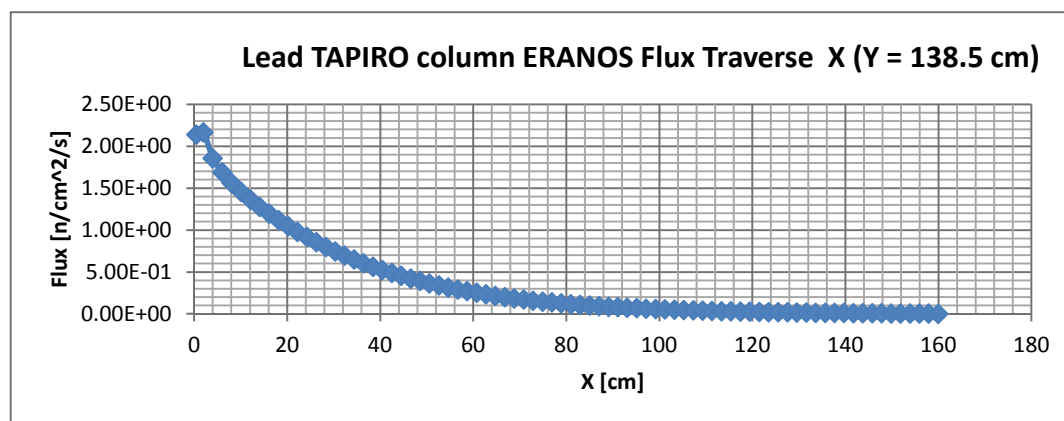


Figure 7. Profilo di flusso lungo la colonna di piombo del TAPIRO.

Nella Fig.8 è riportata la traversa del flusso neutronico nel reattore ELSY lungo direzione radiale.

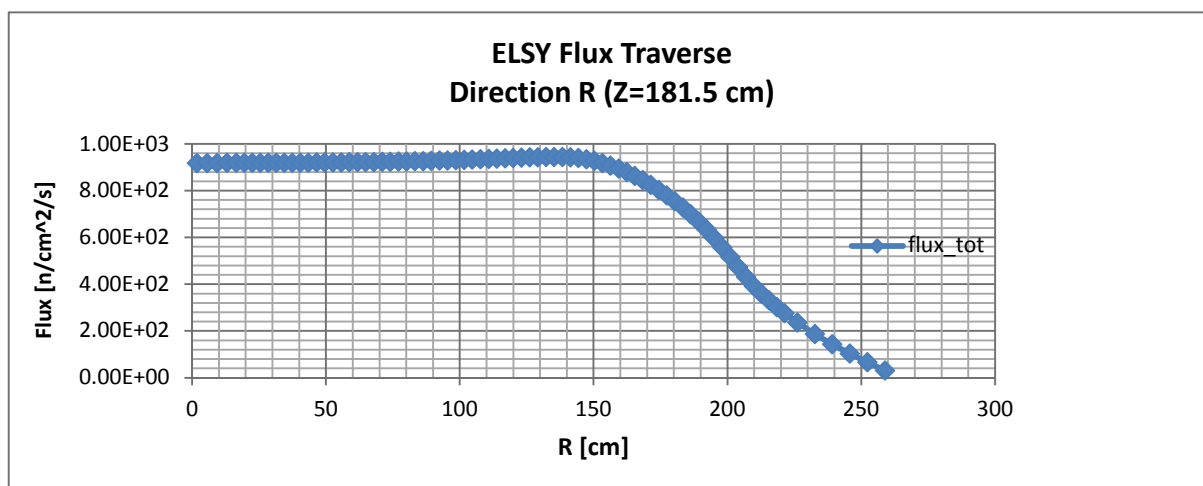


Figure 8. Traversa di flusso lungo la direzione radiale nel reattore ELSY.

La Fig.9 mostra lo spettro neutronico nella zona di combustibile interna del reattore ELSY.

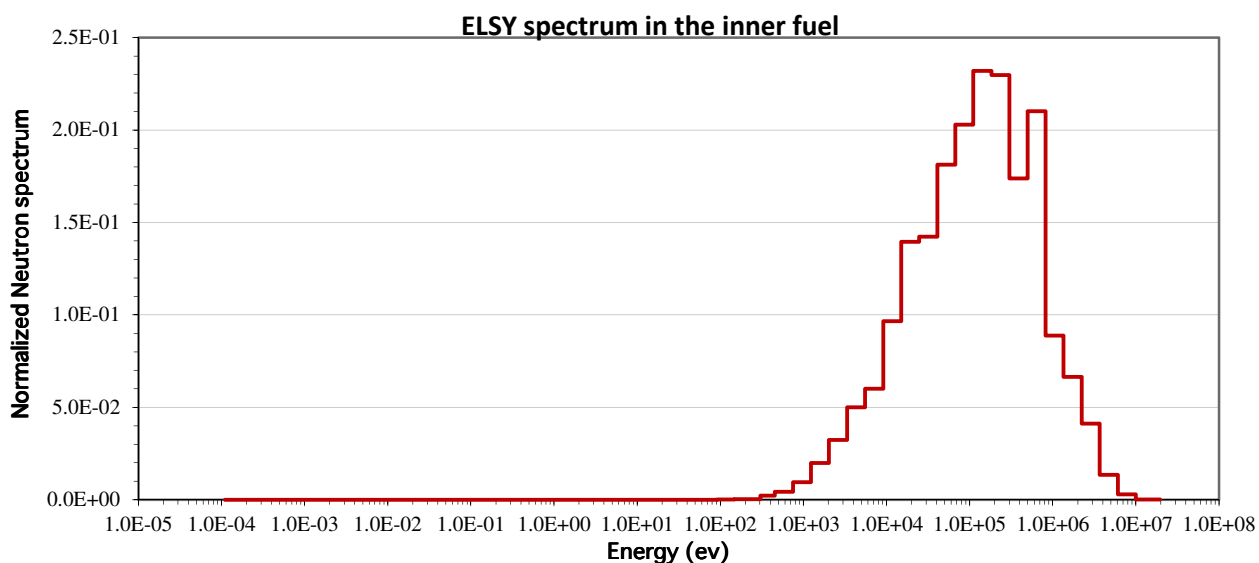
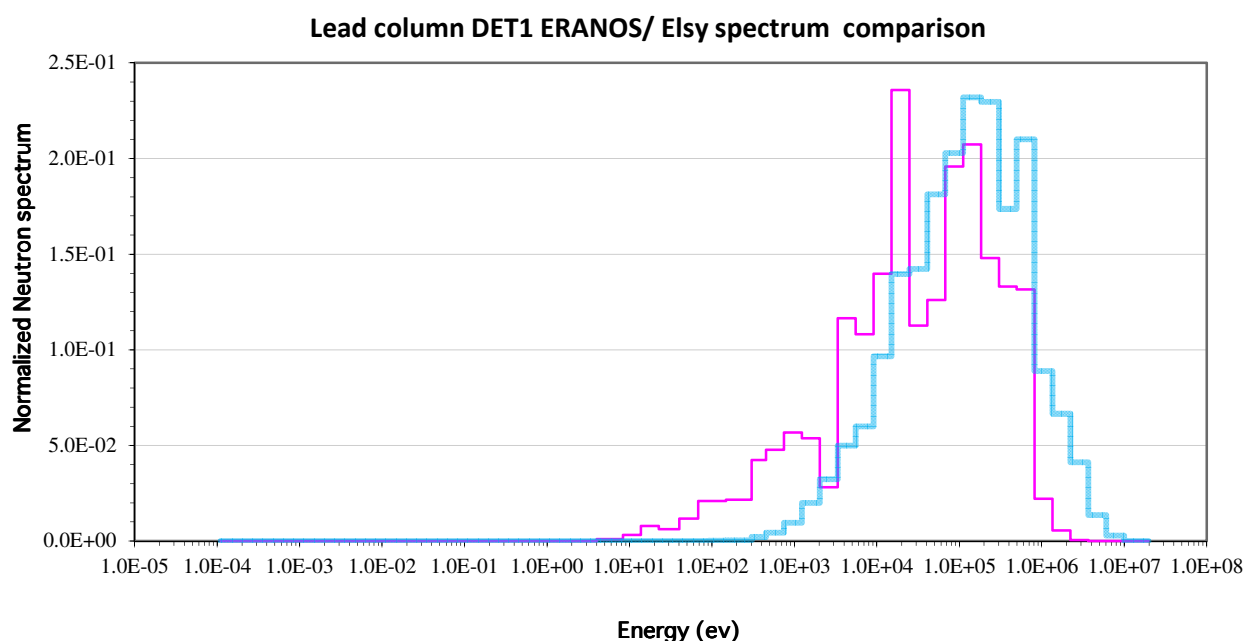


Fig.9. Spettro neutronico nella zona di combustibile interna di ELSY.

La Fig. 10 mostra il confronto tra gli spettri neutronici nei sistemi TAPIRO (DET1) ed ELSY in corrispondenza delle posizioni considerate per il calcolo dei coefficienti di correlazione. Si possono notare notevoli differenze tra i due profili, anche se nella zona veloce si riscontrano delle analogie.



**Fig. 10. Confronto degli spettri neutronici in TAPIRO (DET1) ed ELSY**

I coefficienti di correlazione calcolati mostrano una buona correlazione tra le quantità integrali considerate nella facility TAPIRO e nel sistema di riferimento considerato (ELSY), come mostrato nella Tabella 3.

**Tabella 3. Coefficienti di correlazione**

| Tassi di reazione in TAPIRO da correlare con l'effetto di vuoto del 10% in ELSY | Matrice di dispersione BOLNA | Matrice di dispersione unitaria |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| fiss_U238 / fiss_U235                                                           | 0.775                        | 0.623                           |
| fiss_Np237 / fiss_U235                                                          | 0.509                        | 0.564                           |

Da notare come la correlazione rispetto all'indice spettrale  $f_{U238}/f_{U235}$  sia più elevata allorchè si prendono in considerazione gli errori di dati nucleari utilizzando la matrice di dispersione BOLNA. Viceversa la correlazione assoluta (colonna di destra della tabella 3), definita dalla stessa espressione (2.8) in cui la matrice di dispersione  $D$  è sostituita da una matrice unitaria (non dipendente quindi dagli errori dei dati nucleari), risulta relativamente maggiore per l'indice spettrale  $f_{Np237}/f_{U235}$ .

## G. Conclusioni

|                                                                                                                    |                                                        |                  |                      |                   |                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------|----------------------|-------------------|-----------------|
|  <b>Ricerca Sistema Elettrico</b> | <b>Sigla di identificazione</b><br>ADPFISS – LP2 - 048 | <b>Rev.</b><br>0 | <b>Distrib.</b><br>L | <b>Pag.</b><br>16 | <b>di</b><br>18 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------|----------------------|-------------------|-----------------|

Il presente lavoro è stato incentrato sull'analisi di sensitività e correlazione effettuata secondo le procedure di calcolo ERANOS GPT in relazione al reattore di riferimento LFR ELSY ed all'impianto sperimentale (colonna di piombo) del TAPIRO (TLF).

I risultati ottenuti in questo studio preliminare sono incoraggianti poiché indicano un significativo grado di correlazione tra le quantità integrali considerate in questi due sistemi.

Da notare che i coefficienti di correlazione delle grandezze integrali (rapporti di tassi di fissione) pertinenti alla struttura TLF rispetto all'effetto di vuoto del piombo in ELSY risultano maggiori del valore della correlazione (0.38) risultante in uno studio simile di confronto tra il reattore GUINEVERE [18] e ELSY in cui la quantità integrale considerata per entrambi era l'effetto di vuoto del refrigerante piombo. In uno studio più recente [18], i coefficienti di correlazione considerati per entrambi questi sistemi erano relativi ai rapporti di tassi di fissione ( $F_{Pu239}/F_{235}$ ,  $Fiss_{238}/Fiss_{235}$  e  $F_{Np237}/F_{U235}$ ) in condizioni sia imperturbate che perturbate (per riduzione della densità del piombo). In questo caso i coefficienti di correlazione superavano il valore di 0.9.

Lo scarso valore della correlazione tra gli effetti di vuoto su riportata tra i reattori GUINEVERE e ELSY è da attribuirsi al diverso rapporto tra la componente spettrale e quella di leakage nei due sistemi, meno elevato nel caso del reattore GUINEVERE date le dimensioni ridotte di questo sistema.

Ulteriori diverse configurazioni sperimentali nella facility TLF saranno oggetto di studio in una fase successiva di analisi di simulazione. Verrà in particolare studiata la possibilità di interporre materiali atti a filtrare/modificare lo spettro neutronico (per esempio, ferro, grafite, ecc.) allo scopo di ottenere correlazioni tra le quantità integrali considerate tra i sistemi in esame ancora maggiori.

In conclusione, questi primi risultati dello studio sembrano confermare il ruolo importante che una facility sperimentale realizzata sul TAPIRO può rivestire come strumento utile per la progettazione della prossima generazione di LFR.

|                                                                                                                    |                                                       |                  |                      |                   |                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|----------------------|-------------------|-----------------|
|  <b>Ricerca Sistema Elettrico</b> | <b>Sigla di identificazione</b><br>ADPFIS – LP2 - 048 | <b>Rev.</b><br>0 | <b>Distrib.</b><br>L | <b>Pag.</b><br>17 | <b>di</b><br>18 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|----------------------|-------------------|-----------------|

## H. Bibliografia

- [1] A. Gandini, "Generalized Perturbation Theory (GPT) Methods. A Heuristic Approach", Advances Nucl.Sci.Tech., Vol 19, Plenum Press, 1987
- [2] A. Gandini et al, "Analysis and Correlation of Integral Experiments in Fast Reactors with Nuclear Parameters", Int. Conf. Physics Fast Reactors, London 1969
- [3] A.K. McCracken, NEA Specialist Meeting on Sensitivity Studies and Shielding Benchmarks. Paris, 22 November 1977.
- [4] Y.V. Linnik, "Method of Least Squares and Principles of the Theory of Observation", Pergamon Press, London, 1961 [transl. from Russian, original edition 1958]
- [5] A. Gandini, "Nuclear Data and Integral Measurements Correlation for Fast Reactors. Part 1: Statistical Formulation", CNEN Re. RT/FI(73)5 (1973).
- [6] A. Gandini, M. Salvatores, "Nuclear data and Integral Measurements Correlation for Fast reactors. Part 3: The Consistent Method", CNEN Rep. RT/FI(74)3 (1974).
- [7] "Assessment of Existing Nuclear Data Adjustment Methodologies", Document NEA/NSC/WPEC/DOC/(2010)429.
- [8] E. Fort, et al., "Improved Performances of the Fast Reactor Calculation System ERANOS-ERALIB1", Annals of Nuclear Energy, vol. 30 (2003).
- [9] G. Rimpault, et al., "The ERANOS Code and Data System for Fast Reactor Neutronic Analyses," Proceed. Physor 2002 Conference, Seoul (Korea), October 2002.
- [10] J. Blair Briggs, Lori Scott, Enrico Sartori, Yolanda Rugama, "Integral Benchmarks available through the International Reactor Physics Experiment Evaluation Project and the International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project", Int. Conference on Reactor Physics, Nuclear Power: A Sustainable Resource, Casino-Kursaal Conf. Center, Interlaken, Switzerland, Sept. 14-19, 2008.
- [11] NEA-1764 IRPhE-TAPIRO-ARCHIVE [see webpage: <http://www.oecd-neo.org/tools/abstract/detail/nea-1764>]
- [12] D. Calamand, A. Despretis, H. Rancurel, R. Vienot, J.C. Estiot, J.P. Trapp, M.L. Bargellini, L. Bozzi, M. Martini, P. Moiola, D. Antonini, A. De Carli, V. Rado, "Results of Neutron Propagation in Steel Sodium Mixtures with Various Source Spectra on HARMONIE and TAPIRO", 5th International Conference on Shielding, Knoxville, USA, 18-22 April 1977.
- [13] A. Gandini, "Uncertainty Analysis and Experimental Data Transposition Methods Based on Perturbation Theory" in Handbook of Uncertainty Analysis, Y. Ronen Ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, 1988.
- [14] V. Sobolev, E., H. Ait Abderrahim "Preliminary Fuel Pin, Hexagonal Assembly and Core design for ELSY-600", ANS/826/07-15 (SCK-CEN)

|                                                                                                                    |                                                       |                  |                      |                   |                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|----------------------|-------------------|-----------------|
|  <b>Ricerca Sistema Elettrico</b> | <b>Sigla di identificazione</b><br>ADPFIS – LP2 - 048 | <b>Rev.</b><br>0 | <b>Distrib.</b><br>L | <b>Pag.</b><br>18 | <b>di</b><br>18 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|----------------------|-------------------|-----------------|

- [15] N. Burgio , L. Cretara , M. Frullini , A. Gandini , V. Peluso , A. Santagata ,“ Monte Carlo simulation analysis of 8integral data measured in the SCK-CEN/ENEA experimental campaign on the TAPIRO fast reactor. Experimental and calculated data comparison” Nuclear Engineering and Design 273 (2014) 350–35
- [16] N. Burgio, M. Frullini “Progettazione di una facility in Pb per misure di trasporto neutronico nel reattore TAPIRO”, Attività LP2.A2, Azione 1-2 (2014)
- [17] M. Salvatores, G. Aliberti, G. Palmiotti, “Nuclear data needs for advanced reactor systems. A NEA nuclear science committee initiative”, in: ND 2007: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Nice, April 23 2007.
- [18] M. Carta, A. Gandini, V. Fabrizio, V. Peluso, G. Bianchini. "Sensitivity analyses by Generalized Perturbation Theory (GPT) methods applied to GUINEVERE and MYRRHA lead fast reactors",International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13) , March 2013 Paris.