



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Caratterizzazione del flusso neutronico in uscita del collimatore del  
canale tangenziale del reattore TRIGA RC-1 Enea-Casaccia  
mediante il codice di calcolo MCNP

*R. Remetti, V. Costantini*



CARATTERIZZAZIONE DEL FLUSSO NEUTRONICO IN USCITA DAL COLLIMATORE DEL CANALE TANGENZIALE DEL REATTORE TRIGA RC-1 ENEA-CASACCIA MEDIANTE IL CODICE DI CALCOLO MCNP

R. Remetti, V. Costantini – CIRTEN UNIROMA

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, Gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Nuovo nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in materia nucleare

Responsabile Progetto: Paride Meloni, ENEA



**CIRTEN**

**Consorzio Interuniversitario per la Ricerca TEcnologica Nucleare**

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA**

**“LA SAPIENZA”**

**Sviluppo di procedure sperimentali innovative per test di materiali per irraggiamento da neutroni:  
Caratterizzazione del flusso neutronico in uscita dal collimatore del canale tangenziale del reattore TRIGA RC-1 Enea-Casaccia mediante il codice di calcolo MCNP**

**Autori**

**Prof. Romolo Remetti**

**Ing. Valerio Costantini**

**CERSE-UNIRM RL 1173/2011**

**ROMA, SETTEMBRE 2011**

Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP5 punto B2  
AdP MSE - ENEA “Ricerca di Sistema Elettrico” - PAR2008-09  
Progetto 1.3 – “Nuovo Nucleare da Fissione”.

## INDICE

2.	PREMESSA .....	3
3.	INTRODUZIONE .....	3
3.1	Descrizione del reattore TRIGA.....	3
3.2	Il codice MCNP .....	6
3.3	Input MCNP del reattore TRIGA .....	7
4.	MODIFICHE ALL'INPUT MCNP DEL TRIGA .....	8
4.1	introduzione del collimatore nel canale tangenziale dell'input del TRIGA .....	9
5.	TECNICHE DI RIDUZIONE DELLA VARIANZA IN MCNP.....	10
5.1	Roulette russa.....	11
5.2	Geometry splitting .....	12
6.	SIMULAZIONI E RISULTATI .....	12
6.1	Individuazione di una configurazione critica del reattore .....	12
6.2	Determinazione delle importanze delle celle del collimatore .....	13
6.3	Risultati delle simulazioni MCNP per la caratterizzazione del flusso all'uscita del collimatore .....	14

## **1. PREMESSA**

Il presente documento costituisce il rapporto finale della attività di ricerca CIRTEN LP5\_B.2 "Sviluppo di procedure sperimentali innovative per test di materiali per irraggiamento da neutroni". L'oggetto dell'attività è stata la caratterizzazione del flusso neutronico alla sezione di uscita del collimatore posto all'interno del canale tangenziale passante del reattore TRIGA RC-1, sito nel C.R. ENEA Cassaccia di Roma, mediante delle simulazioni con il codice MCNP – Monte Carlo N-Particle. L'obiettivo è stato quello di ottenere un modello utile al supporto dei test sperimentali di irraggiamento neutronico all'uscita del collimatore suddetto.

La caratterizzazione del fascio neutronico collimato si è conseguita mediante calcoli Monte Carlo finalizzati ad ottenere la distribuzione spaziale trasversale, la distribuzione energetica e la divergenza del fascio all'uscita del canale del reattore.

## **2. INTRODUZIONE**

### **2.1 Descrizione del reattore TRIGA**

Il reattore TRIGA RC-1 (Training, Research, Isotopes, General Atomics - Reattore Casaccia 1) è un reattore termico di ricerca da 1 MW con un nocciolo costituito da elementi cilindrici formati da una lega di zirconio, idrogeno ed uranio arricchito a circa il 20%. La moderazione, oltre che all'acqua di refrigerazione, è pertanto affidata all'idruro di zirconio della lega. Il reattore presenta uno schermo biologico realizzato in calcestruzzo di cemento che circonda il contenitore d'alluminio del reattore.

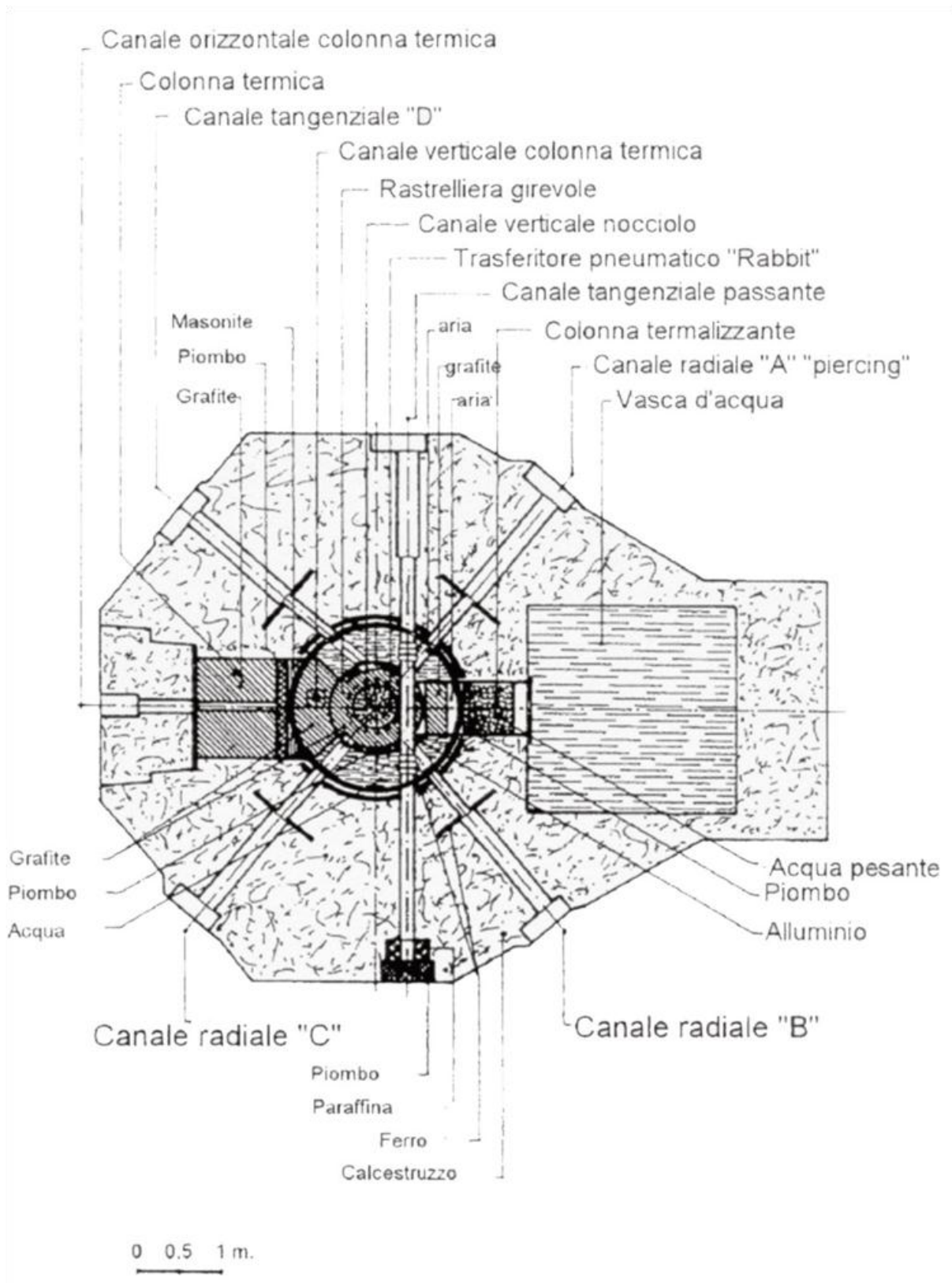
Il nocciolo è quindi costituito da un insieme cilindrico che comprende gli elementi di combustibile, le barre di controllo e la sorgenti di start-up di americio-berillio. L'acqua che circonda questi componenti occupa circa un terzo del volume del nocciolo. I componenti del nocciolo sono alloggiati tra due griglie di alluminio, le quali sono circondate e sorrette dalla struttura del riflettore. Gli elementi di combustibile hanno le

estremità superiori ed inferiori in grafite in modo da costituire il riflettore superiore ed inferiore del nocciolo. Il controllo del reattore è garantito attraverso tre barre di controllo e una bara di regolazione rivestite in acciaio inossidabile.

Il riflettore che circonda il nocciolo è costituito da un anello di grafite di dimensioni diametro – spessore – altezza di 54.3 – 21.4 – 70.8 cm. L'anello di grafite è forato orizzontalmente in corrispondenza dei tre canali radiali e del canale tangenziale passante. All'esterno dell'anello di grafite è sistemato uno schermo termico di piombo dello spessore di 0.051 m che ha la funzione di ridurre i gradienti termici nello schermo biologico dovuti all'assorbimento dei raggi gamma.

Gli elementi di combustibile, ciascuno di circa 3.4 kg, presentano una lunghezza attiva di 38.1 cm ed un diametro di 36.3 mm. La camicia di rivestimento in acciaio presenta uno spessore di 0.5 mm. La caratteristica fondamentale degli elementi è il coefficiente pronto di temperatura negativo che conferisce al reattore un alto grado di sicurezza intrinseca: qualora si verificasse una escursione di potenza, questa ritornerebbe automaticamente a valori normali.

La barra di regolazione fine è formata da un elemento assorbitore al carburo di boro. Tale barra, collocata nella posizione fissa F-1, ha un diametro esterno di 31.7 mm e scorre entro un tubo guida a pareti forate. Le tre barre di controllo, due di regolazione grossolana ed una di sicurezza, comprendono una porzione di assorbitore al carburo di boro che continua inferiormente in un elemento di combustibile. Le barre sono incamiciate in tubi di acciaio inossidabile eguali a quelli degli elementi di combustibile e sono collocate nei fori C-4, C-7 e C-10. La movimentazione delle barre di controllo è garantita da motori fissati ad una piastra metallica posizionata sul ponte trasversale del reattore. Ciascun gruppo di movimento consiste di un motore, un accoppiatore a magneti, uno smorzatore idraulico e un sistema pignone-cremagliera. Quando l'elettromagnete è eccitato, l'asta di connessione della barra si solleva e la barra viene pertanto rimossa dal nocciolo. Per effettuare lo scram basta che l'elettromagnete venga diseccitato: le barre cadono così per gravità, reintroducendo lì assorbitore neutronico nel nocciolo.



**Figura 1 - Sezione orizzontale del reattore TRIGA RC-1**

Il reattore dispone di numerosi canali per misure sperimentali di irraggiamento, tra cui:

- 40 postazioni in una rastrelliera girevole alloggiata in un vano circolare del riflettore;
- 1 canale centrale verticale per l'irraggiamento in una zona di flusso neutronico elevato;
- 5 canali orizzontali di estrazione di neutroni, di cui 4 canali radiali e 1 canale tangenziale;
- 1 colonna termica in grafite che può impiegarsi come fonte di neutroni ben termalizzati.

I cinque canali orizzontali attraversano lo schermo di calcestruzzo del reattore. La parte interna dei canali è realizzata con un tubo di alluminio del diametro interno di 15.2 cm, rivestito esternamente di materiale plastico per prevenire possibili corrosioni derivanti dal contatto con il calcestruzzo.

Il canale tangenziale passante, oggetto delle simulazioni del presente rapporto, è un canale che attraversa tutta la larghezza dello schermo biologico. Esso è tangente alla superficie interna del riflettore e si trova ad una quota di 11.3 cm al di sopra del piano mediano del nocciolo. La parte verso la sala controllo, costituita dal tubo di alluminio del diametro interno di 15.2 cm, termina all'esterno con un tamburo ruotante per l'introduzione di campioni e tappi schermanti. La parte opposta è costituita all'interno da un tubo uguale al precedente e all'esterno dal tubo di acciaio inossidabile del diametro di 25.4 cm. La parte centrale del canale, che ha pure il diametro di 15.2 cm, è ricavata nel riflettore e si accoppia per mezzo di flange e soffietto al contenitore di alluminio del reattore.

Potenza massima	1 MW
Flusso neutronico massimo	$2.7 \cdot 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
Arricchimento	19.9 %
Refrigerante	acqua (circolazione naturale)

**Tabella 1 – Caratteristiche principali del reattore TRIGA RC-1**

## **2.2 Il codice MCNP**



Il codice MCNP (Monte Carlo N-Particle) è un codice di trasporto Monte Carlo di neutroni, fotoni ed elettroni, sviluppato presso i laboratori LANL (Los Alamos National Laboratories, USA). Esso viene utilizzato per calcoli di trasporto delle radiazioni, analisi di criticità e di fisica del reattore. Il codice MCNP legge le informazioni da un file di input che permette all'utilizzatore di specificare la geometria e i materiali, la posizione e le caratteristiche della sorgente, di selezionare le sezioni d'urto ed il tipo di particelle da trasportare e di definire il tipo di informazioni richieste in output (le tallies). Il codice MCNP consente di risolvere problemi di trasporto di neutroni, fotoni ed elettroni, caratterizzati da dipendenza continua dall'energia e con configurazioni geometriche arbitrariamente complesse. Per i calcoli neutronici vengono utilizzate sezioni d'urto i cui dati sono contenuti in librerie che tengono conto di tutte le reazioni ed è ammesso un intervallo di energia compreso tra  $10^{-11}$  e 20 MeV.

Il codice MCNP è strutturato in modo che nel file di input vi sia la descrizione della geometria del problema, la specificazione dei materiali e delle caratteristiche della sorgente e la definizione delle informazioni che si desidera ottenere in uscita. La geometria viene realizzata mediante la definizione di celle circondate da una o più superfici. Le celle possono essere riempite con un materiale ovvero essere vuote. Un file di input MCNP presenta tre grosse sezioni: cell cards, surface cards, e data cards. Con card si intende la singola linea di un input: una sezione è costituita da una o più cards. Nella sezione cell cards viene definita la forma ed i materiali contenuti nello spazio fisico mentre nella sezione data card vengono definiti i materiali, con le relative sezioni d'urto, che costituiscono le diverse celle e vengono introdotte le tallies, ovvero i comandi con cui si specificano le informazioni che si desidera ottenere nell'output.

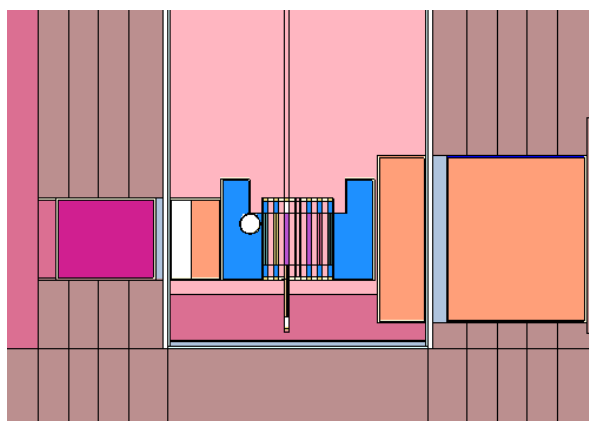
Mediante MCNP si possono elaborare configurazioni geometriche arbitrariamente complesse che devono essere descritte dall'utente come insieme di celle geometriche tridimensionali. Ogni cella ha una assegnata composizione e massa volumica del materiale ed è formata da una o più superfici di delimitazione. Se la cella è costituita da più superfici l'accoppiamento tra queste si realizza attraverso opportuni operatori booleani (intersezione, unione, negazione).

### **2.3 Input MCNP del reattore TRIGA**

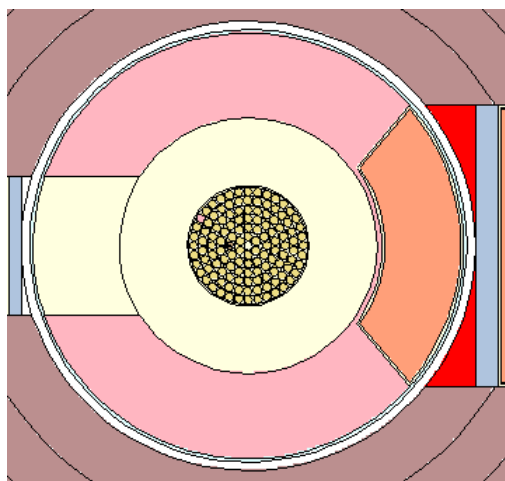
L'input in MCNP del reattore TRIGA RC-1 è stato realizzato presso il C.R. ENEA Casaccia da K. W. Burn, N. Burgio e A. Santagata.

L'obiettivo della modellizzazione del TRIGA in MCNP è stato originariamente quello di disporre di un valido strumento per le valutazioni del rischio connesso con le attività sperimentali di irraggiamento neutronico.

Nelle figure sottostanti vengono mostrate la sezione verticale e quella orizzontale del plot dell'input MCNP del reattore.



**Figura 2 – Sezione verticale del plot MCNP del TRIGA**



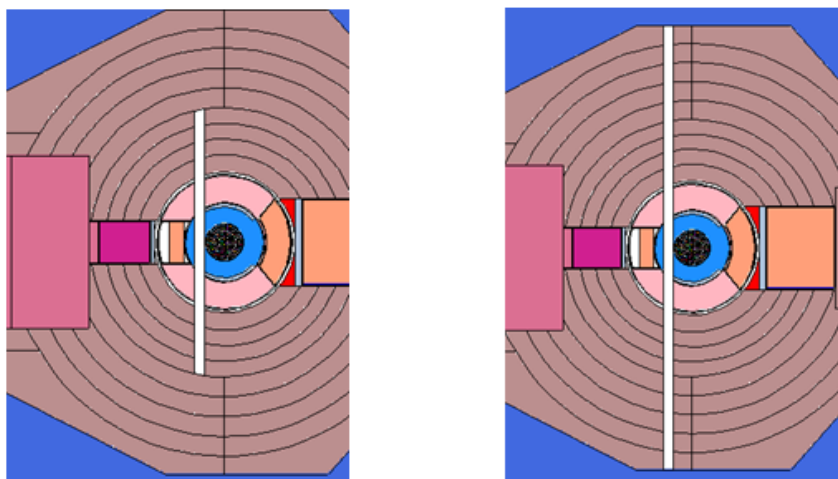
**Figura 3 – Sezione orizzontale del plot MCNP del TRIGA**

### **3. MODIFICHE ALL'INPUT MCNP DEL TRIGA**

La prima fase dell'attività di ricerca descritta nel presente documento è stata la messa a punto dell'input MCNP del TRIGA. In tale fase è stata aggiornata la geometria dell'input MCNP del reattore ed è stato introdotto il modello del collimatore all'interno del canale tangenziale passante.

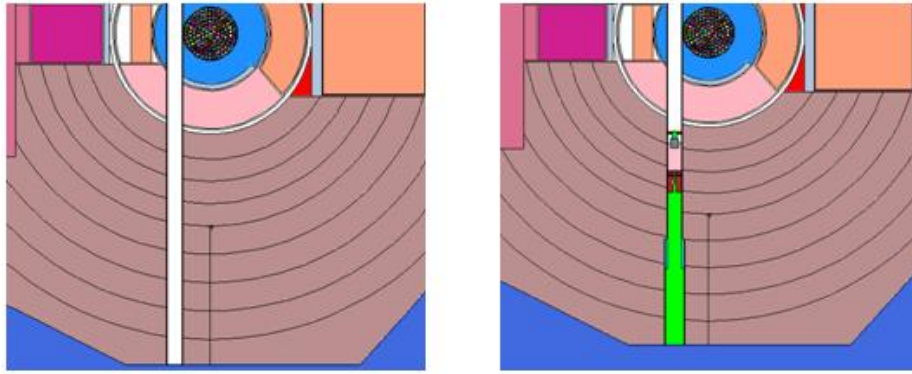
### 3.1 introduzione del collimatore nel canale tangenziale dell'input del TRIGA

Nell'input MCNP del reattore è stato introdotto il modello del collimatore, elaborato da A. Grossi, all'interno del canale tangenziale passante. Il canale è stato in primo luogo esteso fino alle estremità dello schermo biologico, come mostrato nella figura 6.



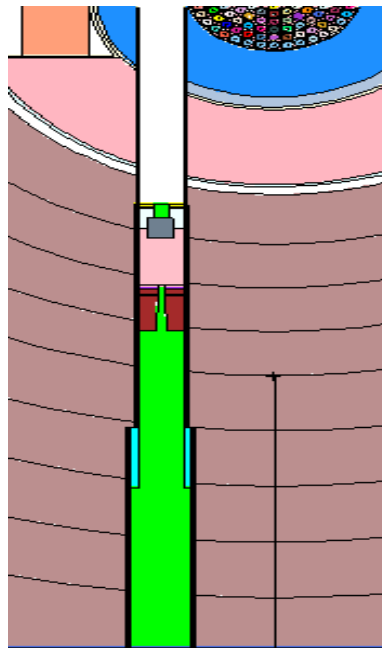
**Figura 4 – Estensione delle estremità del canale tangenziale fino alla fine dello schermo**

Successivamente si è passati alla introduzione del modello del collimatore, opportunamente modificato rispetto all'originale in maniera da essere congruente con l'input del TRIGA, all'interno del canale tangenziale.



**Figura 5 – Introduzione del modello del collimatore nel canale tangenziale del TRIGA**

Nella figura 8 viene mostrato il plot MCNP del particolare del collimatore all'interno del canale tangenziale passante.



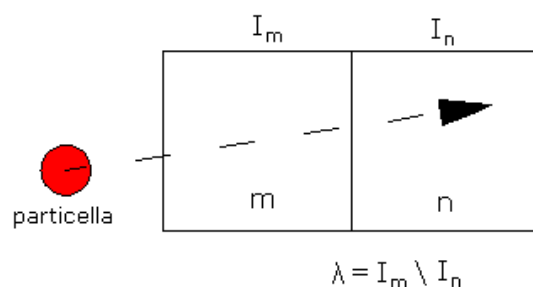
**Figura 6 – Particolare del collimatore all'interno del canale tangenziale**

#### **4. TECNICHE DI RIDUZIONE DELLA VARIANZA IN MCNP**

La caratterizzazione del fascio neutronico all'uscita del collimatore ha reso necessario, data la rilevante distanza spaziale tra la sezione di uscita del canale e il nocciolo, ossia della sede della sorgente di particelle dei calcoli di trasporto Monte Carlo, l'impiego di tecniche di riduzione della varianza. Si è deciso, a seguito di numerosi tentativi di impiego di altre tecniche, di optare per l'utilizzo delle due tecniche conosciute come roulette russa e geometry splitting. Tali tecniche fanno parte dei metodi detti di 'campionamento ad importanza': ad ogni cella della geometria viene assegnato un certo parametro chiamato 'importanza' di modo da favorire il processamento delle particelle dirette verso le regioni di spazio ad importanza crescente.

Le tecniche roulette russa e geometry splitting sono complementari; esse consistono in:

1. una divisione della regione di spazio in celle;
2. un assegnazione della importanza  $I_j$  alle varie  $j$  celle;
3. quando una particella si sposta da una cella  $m$  ad una cella  $n$ , un calcolo del rapporto  $\lambda = I_n/I_m$ . Se
  - a.  $\lambda = 1$ , il trasporto continua senza cambiamenti;
  - b.  $\lambda < 1$ , viene eseguita la roulette russa;
  - c.  $\lambda > 1$ , viene eseguito il geometry splitting.



**Figura 7 – Schematizzazione di una particella che passa da una cella a importanza  $m$  ad una cella ad importanza  $n$**

#### 4.1 Roulette russa

Se il rapporto tra le importanze di due celle contigue  $\lambda = I_n/I_m$  risulta  $\lambda < 1$ , la particella sta passando da una zona più 'importante' ad una zona meno 'importante' ovvero la

particella si sta dirigendo verso una zona di spazio che non si ha interesse a campionare. La particella è pertanto sottoposta al gioco della roulette russa:

1. con una probabilità pari a  $\lambda$  la particella sopravvive ed il suo peso è diviso per  $\lambda$ ,
2. con probabilità  $1 - \lambda$  la particella viene uccisa.

## **4.2 Geometry splitting**

Se il rapporto tra le importanze di due celle contigue  $\lambda = I_n/I_m$  risulta  $\lambda > 1$ , la particella si sta dirigendo verso una regione di spazio più 'importante' e pertanto viene splittata in  $\lambda$  sottoparticelle ciascuna con peso pari al peso della particella originaria diviso per  $\lambda$ .

## **5. SIMULAZIONI E RISULTATI**

La fase conclusiva dell'attività, costituita dalle simulazioni Monte Carlo finalizzate alla caratterizzazione del fascio neutronico collimato all'uscita del canale tangenziale passante, si è articolata in:

1. individuazione di una configurazione critica del modello MCNP del reattore;
2. determinazione di valori opportuni del parametro 'importanza' da assegnare alle varie celle del collimatore;
3. simulazioni MCNP per la determinazione della distribuzione spaziale, dello spettro e della divergenza angolare del fascio all'uscita del collimatore.

### **5.1 Individuazione di una configurazione critica del reattore**

Una possibile configurazione critica del modello del reattore è stata individuata variando la posizione delle barre di controllo nell'input ed eseguendo alcuni run di Kcode. Nella ricerca delle condizioni di criticità si è cercato di posizionare le barre di

controllo quanto più possibilmente alla stessa altezza in maniera tale da ottenere un profilo uniforme del flusso neutronico nel nocciolo.

Si sono pertanto individuate le seguenti posizioni delle barre di controllo e regolazione:

- Barra C4 totalmente estratta;
- Barra C7 alzata di 13,59 cm rispetto a fine corsa inferiore;
- Barra C10 alzata di 13,59 cm rispetto a fine corsa inferiore;
- Barra F1 (barra di regolazione) alzata di 12 cm rispetto a fine corsa inferiore.

In tale configurazione del modello del reattore, il valore del fattore di moltiplicazione effettivo, calcolato attraverso un run di Kcode di 3005 cicli e 100000 particelle per ciclo, risulta di:

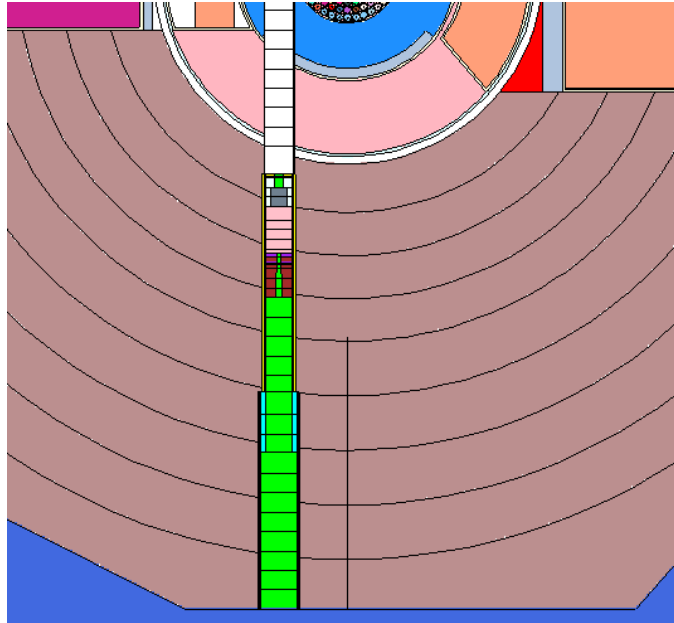
$$K_{\text{eff}} = 1.00015 \pm 0.00004$$

## **5.2 Determinazione delle importanze delle celle del collimatore**

Per l'applicazione delle tecniche di roulette russa e geometry splitting, il cui impiego si è reso necessario data la distanza rilevante tra la sezione di uscita del collimatore e la sorgente di particelle, ovvero il nocciolo, si è dovuto suddividere il collimatore in numerose celle a cui sono stati successivamente assegnati dei valori di importanza.

L'individuazione di valori opportuni di importanza è avvenuta mediante un procedimento basato sulla valutazione della importanza della j-esima celletta come il rapporto fra la popolazione nella prima celletta di suddivisione del collimatore, ovvero quella più vicino al nocciolo, e la popolazione nella generica cella j.

Attraverso ripetuti calcoli di trasporto si sono così determinate le importanze da assegnare alle varie celle del collimatore con valori compresi tra 1, per la cella più vicina al nocciolo, a 34000, per la cella in corrispondenza della sezione di uscita del collimatore.



**Figura 8 – Suddivisione del collimatore in cellette per l'applicazione delle tecniche di roulette russa e geometry splitting**

### **5.3 Risultati delle simulazioni MCNP per la caratterizzazione del flusso all'uscita del collimatore**

I parametri di interesse ai fini della caratterizzazione del flusso neutronico all'uscita del collimatore, ovvero la distribuzione spaziale ed energetica e la divergenza del fascio, sono stati determinati attraverso l'impiego delle seguenti tallies:

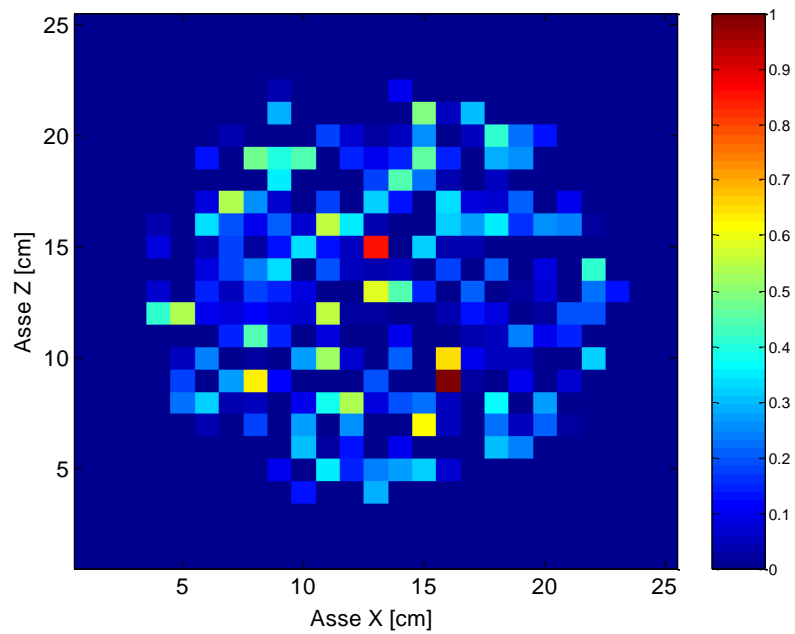
- a. tally RMESH per la meshatura geometrica in corrispondenza della sezione verticale di uscita del collimatore e di una sezione ad essa parallela distante 10 cm lungo l'asse del collimatore;
- b. tally F4, abbinata alla E4, per la determinazione dello spettro neutronico.

I risultati seguenti si sono ottenuti mediante calcoli di Kcode, eseguendo 3005 cicli e processando 100000 particelle per ciascun ciclo.

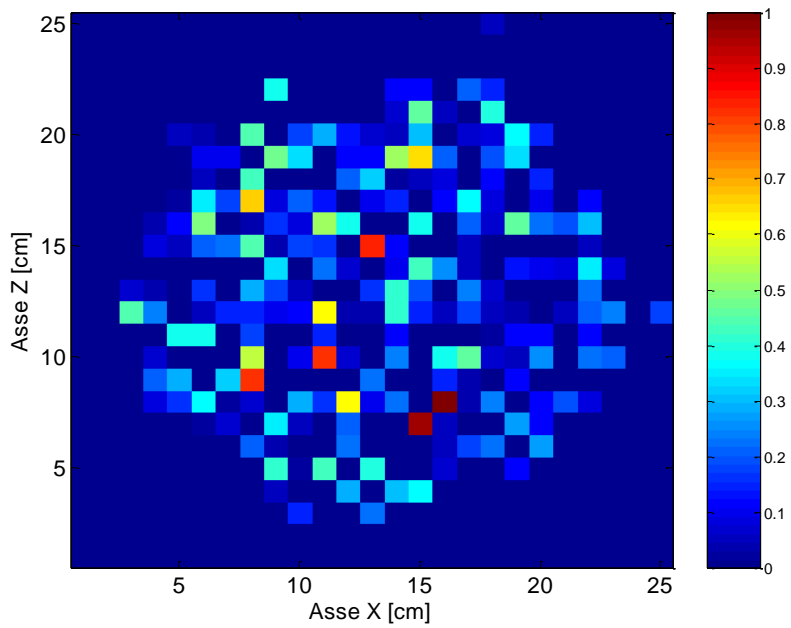
Attraverso la RMESH si è determinata sia la distribuzione spaziale del flusso sia la divergenza del fascio collimato; quest'ultima è stata individuata ponendo in relazione i risultati della meshatura all'uscita del collimatore ed a 10 cm da essa.



Entrambe le meshes sono a geometria rettangolare 25X25 con larghezza di bin pari a 1 cm. Nelle due figure seguenti sono mostrati i risultati ottenuti, normalizzati per i valori massimi di flusso nelle rispettive sezioni di valutazione.

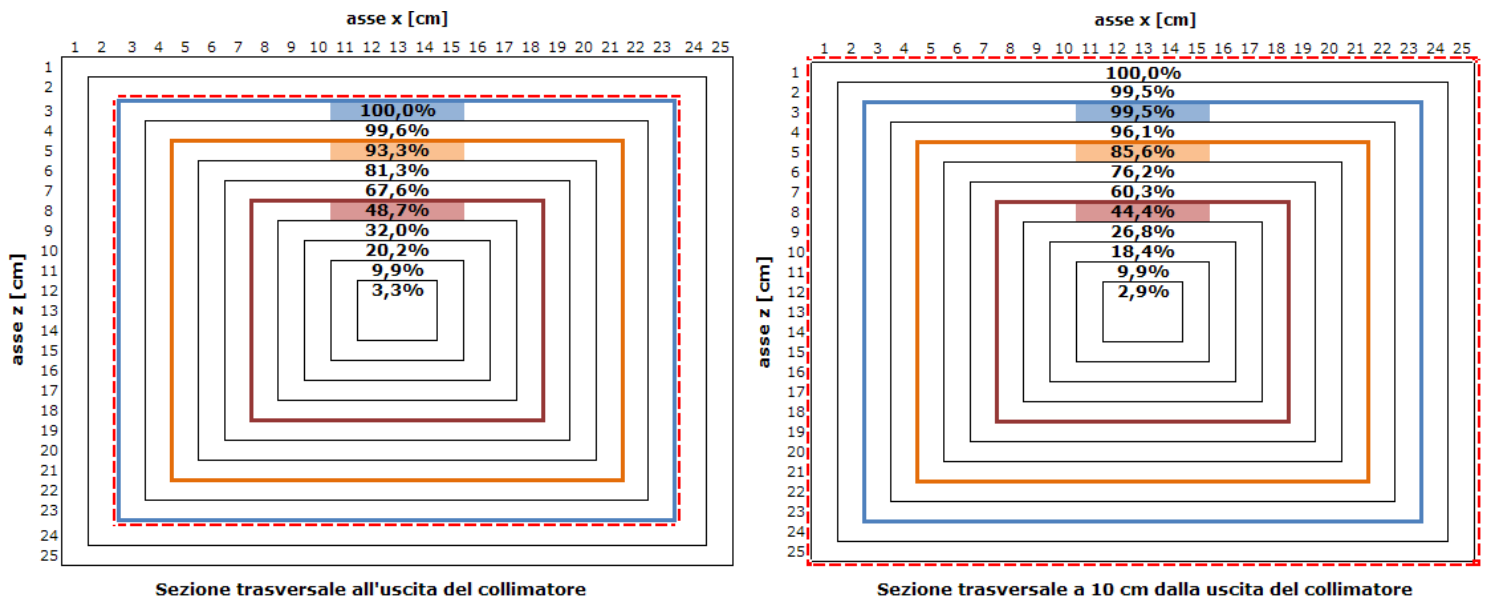


**Figura 9 – Distribuzione spaziale del flusso neutronico nella sezione verticale di uscita del collimatore**



**Figura 10 – Distribuzione spaziale del flusso neutronico nella sezione distante 10 cm dalla sezione di uscita del collimatore**

Nella figura 11 sono mostrate le percentuali di flusso nelle diverse aree rettangolari interne alle due meshes.



**Figura 11 – Indicazioni delle percentuali di flusso nelle regioni rettangolari interne alle meshes**

Nella figura 11 la linea rossa tratteggiata delimita l'area entro cui è contenuto il 100% del flusso neutronico. Dalla figura si evince che le percentuali di flusso entro le regioni rettangolari delle due sezioni considerate sono le seguenti:

Superficie sezione rettangolare	Sezione uscita collimatore	Sezione distante 10 cm da uscita collimatore
11x11 cm <sup>2</sup> (delimitato da linea bordeaux)	48,7%	44,4%
17x17 cm <sup>2</sup> (delimitato da linea arancione)	93,3%	85,6%
21x21 cm <sup>2</sup> (delimitato da linea azzurra)	100%	99,5%

**Tabella 2 – Percentuali di flusso contenute entro regioni rettangolari delle meshes**

Nella sezione di uscita del collimatore il 100% del flusso è dunque confinato all'interno di una regione quadrata 21x21 cm<sup>2</sup> mentre in quella distante 10 cm dal collimatore la totalità del flusso è racchiuso in un'area 25x25 cm<sup>2</sup>.

Mettendo in relazione la differenza di lato dell'area contenente il 100% del flusso e la distanza tra le due sezioni si può valutare l'angolo  $\theta$  di divergenza del fascio collimato come:

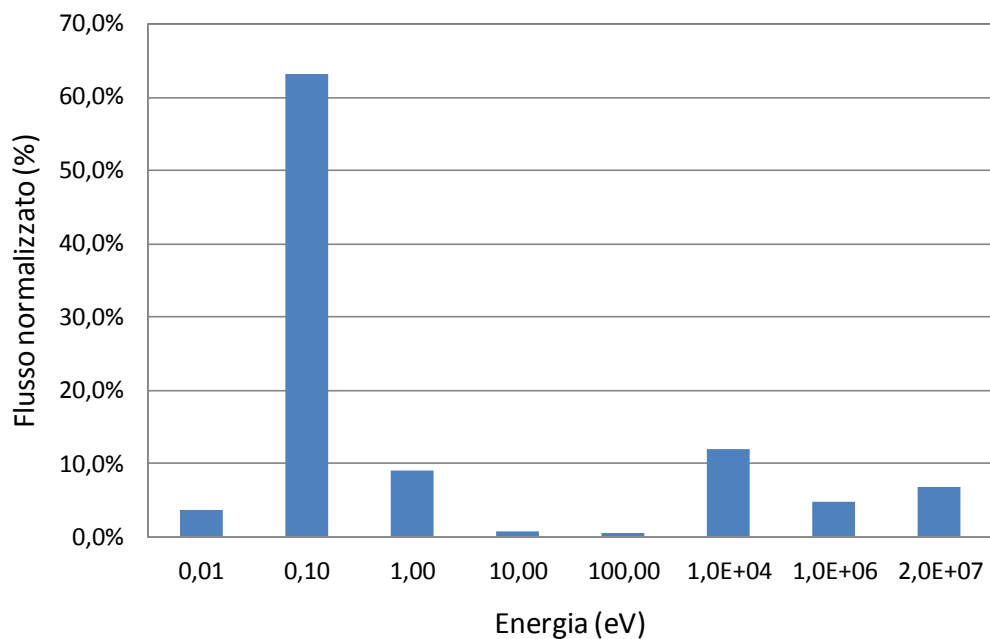
$$\text{tg } \theta = (25-21) \cdot 2^{-1} \cdot 10^{-1}$$

pertanto l'angolo di divergenza risulta approssimativamente di:

$$\theta = 11.3^\circ$$

Lo spettro neutronico in corrispondenza dell'uscita del collimatore è stato determinato attraverso la tally di flusso F4 e la tally E4 per la definizione dei bin energetici.

Nella figura e nella tabella seguenti sono mostrati la distribuzione energetica del fascio collimato e le percentuali di flusso neutronico, rispetto al flusso complessivamente uscente dal collimatore, all'interno degli intervalli energetici stabiliti.



**Figura 12 – Spettro del fascio neutronico all’uscita del collimatore**

<b>Intervalli energetici (eV)</b>	<b>Flusso normalizzato (%)</b>
0,00 – 0,01	3,6%
0,01 – 0,10	63,1%
0,10 – 1,00	8,9%
1,00 – 10,00	0,6%
10,00 – 100,00	0,4%
100,00 – 1,0E+04	11,8%
1,0E+04 – 1,0E+06	4,7%
1,0E+06 – 2,0E+07	6,8%

**Tabella 3 – Percentuali di flusso neutronico all’uscita del collimatore nei vari intervalli energetici**