



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Il modello dinamico del reattore nucleare TRIGA RC-I dell'ENEA

Carlo Innarella

IL MODELLO DINAMICO DEL REATTORE NUCLEARE TRIGA RC-I DELL'ENEA

Carlo Innarella ENEA

Settembre 2012

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 del Progetto: Massimo Sepielli, ENEA

Titolo

Il modello dinamico del reattore nucleare TRIGA RC-1 dell'ENEA

Descrittori :

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico

Collocazione contrattuale:

Accordo di programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico. Piano annuale di realizzazione 2011 Progetto 1.3.1. Energia nucleare: Nuovo Nucleare da Fissione: Collaborazioni Internazionali ee Sviluppo Competenze in Materia Nucleare, PAR 2011.

Sommario

Il laboratorio SIMING dell'unità UT-FISST dell' ENEA, nell'ambito delle proprie attività di modellistica e di simulazione, ha sviluppato il modello dinamico del Reattore Nucleare TRIGA RC-1 dell' ENEA.

Nella prima parte del rapporto vengono riportati le caratteristiche principali del reattore e gli aspetti teorici del modello , gli obiettivi, la struttura, le variabili di ingresso e di uscita, le ipotesi di base. Particolare spessore viene dato alle ipotesi di base della parte neutronica e termica del nocciolo che mettono in evidenza le potenzialità del modello.

Nella seconda parte del rapporto vengono riportate le simulazioni delle prove sperimentali del reattore. Queste dimostrano che il modello è in grado di simulare il funzionamento dell'impianto nelle molteplici e tipiche condizioni di lavoro del Triga.

Note

Autore : **C.Innarella**

Copia n.			In carico a:			
2			Nome			
			Firma			
1			Nome			
			Firma			
0	EMISSIONE	14/09/2012	Nome	C.Innarella	E. Negrenti	M. SEPIELLI
			Firma	<i>C. Innarella</i>	<i>E. Negrenti</i>	<i>M. Sepielli</i>
REV.	Descrizione	Data		Redazione	Convalida	Approvazione

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 2 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	-------------

Sommario

Introduzione	5
1. Il reattore nucleare TRIGA RC-1 dell'ENEA	7
1.1. Le caratteristiche principali del reattore	7
1.2. Il combustibile e il nocciolo	8
1.3. L'impianto di raffreddamento del reattore	8
1.4. La sala di controllo	9
2. Il modello del reattore nucleare TRIGA RC-1	14
2.1. Gli obiettivi del modello	14
2.2. La struttura del modello	14
2.2.1. Il Modello del Reattore Nucleare TRIGA RC-1	15
2.3. Le ipotesi di base per il Modello del Reattore Nucleare TRIGA RC-1	18
2.3.1. Assunzioni per la parte neutronica del nocciolo	18
2.3.2. Assunzioni per la parte termica del nocciolo	21
2.3.3. Assunzioni per l'impianto di raffreddamento del reattore	24
2.4. Le variabili di ingresso, di uscita e le condizioni iniziali del modello	25
2.4.1. L'interfaccia operatore-modello per l'input nell'ambiente MATLAB	26
3. Simulazione delle prove sperimentali del reattore nucleare TRIGA RC-1	29
3.1. Funzionamento Triga in Condizioni Nominali : da R.S.T.	29
3.2. Prova Sperimentale a Potenza con Scram Automatico del 19 Ottobre 2010	36
3.3. Prove Sperimentali a Potenza di Perdita di Reattività per Avvelenamento da Xenon	39
3.3.1. Prove da 7 a 11 Luglio 2003	39
3.3.2. Prove da 1 a 4 Luglio 2003	48
3.4. Prove a Potenza zero (Regime Pulito) : Zona di Instabilità	54
3.5. Salita a Potenza e Controllo della Reattività di Barra	57
3.6. Calcolo del Periodo Stabile e confronto con i valori della curva In-hour del reattore Triga	61
3.7. Prove Incidentali dal Rapporto di Sicurezza del Triga RC1	62
3.7.1. Incidente di Reattività : Fuchs	62
3.7.2. Incidente di Perdita del Refrigerante : Svuotamento Istantaneo della Piscina (General Atomic)	68
3.8. Stabilità del Combustibile	70
4. Conclusioni	72
5. Bibliografia	73

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 3 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	-------------

6. Simbologia	73
7. Elenco allegati	73

FIGURA 1-1 VISTA DEL NOCCIOLO DEL REATTORE TRIGA RC -1	10
FIGURA 1-2 VISTA DELLA HALL TECNOLOGICA DEL REATTORE TRIGA RC-1.....	10
FIGURA 1-3 CONFIGURAZIONE DEL NOCCIOLO DEL REATTORE TRIGA-RC1 :.....	11
FIGURA 1-4 SPACCATO DEL POZZO DEL REATTORE TRIGA-RC1 :.....	12
FIGURA 1-5 IMPIANTO RAFFREDDAMENTO DEL TRIGA-RC1 :	13
FIGURA 1-6 LA SALA CONTROLLO DEL REATTORE TRIGA-RC1 :.....	13
FIGURA 2-1 SCHEMA A BLOCCHI DEL MODELLO DEL REATTORE TRIGA RC-1.....	17
FIGURA 2-2 LE BARRE DI CONTROLLO SICUREZZA E SHIM1.....	20
FIGURA 2-3 LE BARRE DI CONTROLLO SHIM2 E REGOLAZIONE FINE	21
FIGURA 2-4 LA DENSITÀ DELL'ACQUA IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA.....	23
FIGURA 2-5 L'INTERFACCIA PRINCIPALE OPERATORE-MODELLO.....	27
FIGURA 2-6 L'INTEFACCIA PER LA MOVIMENTAZIONE DELLE BARRE DI CONTROLLO.....	28
FIGURA 3-1 POTENZE NOCCIOLO : PRODOTTA, TRASMESSA , TRASPORTATA.....	30
FIGURA 3-2 IL FLUSSO NEUTRONICO MEDIO : FATTORE PICCO = 1.5.....	30
FIGURA 3-3 TEMPERATURE : COMBUSTIBILE, H2O USCITA NOCCIOLO, H2O PISCINA.....	31
FIGURA 3-4 PORTATA CIRCOLAZIONE NATURALE DEL NOCCIOLO	31
FIGURA 3-5CONSUMO INTEGRALE DI FISSILE	32
FIGURA 3-6 REATTIVITÀ DELLO XENON.....	32
FIGURA 3-7 LA REATTIVITÀ TOTALE	33
FIGURA 3-8 POSIZIONI E REATTIVITÀ DELLE BARRE DI CONTROLLO	33
FIGURA 3-9 PORTATE PRIMARIO E SECONDARIO SCAMBIATORI.....	34
FIGURA 3-10 TEMPERATURE SCAMBIATORI : H2O PRIMARIA	34
FIGURA 3-11 TEMPERATURE SCAMBIATORI : H2O SECONDARIA	35
FIGURA 3-12 POTENZE SCAMBIATORI : ASPORTATA DA H2O POZZO	35
FIGURA 3-13 POTENZE PRODOTTA E CEDUTA ALL'ACQUA.....	37
FIGURA 3-14 PARTICOLARE POTENZA DECADIMENTO DOPO LO SCRAM : BORST-WHELER.....	37
FIGURA 3-15 TEMPERATURE COMBUSTIBILE E ACQUA PISCINA.....	38
FIGURA 3-16 PARTICOLARE TEMPERATURE COMBUSTIBILE E ACQUA DOPO SCRAM	38
FIGURA 3-17 GRAFICO SPERIMENTALE DELLA REATTIVITÀ ASSORBITA DALLO XENON DAL 7 AL 11 LUGLIO 2003 DEL REATTORE TRIGA	40
FIGURA 3-18 POTENZE PRODOTTA E CEDUTA H2O : TRIGA ALLA POTENZA DI 1 MW.....	43
FIGURA 3-19 POSIZIONI BARRA CONTROLLO SHIM2 : ESTRATTE LE ALTRE BARRE	43
FIGURA 3-20 LA REATTIVITÀ DELLO XENON	44
FIGURA 3-21 TEMPERATURE FUEL E H2O POZZO	44
FIGURA 3-22 GRAFICO SPERIMENTALE DELLA REATTIVITÀ ASSORBITA DALLO XENON DAL 1 AL 4 LUGLIO 2003 DEL REATTORE TRIGA	48
FIGURA 3-23 POTENZE PRODOTTA E CEDUTA H2O : TRIGA ALLA POTENZA DI 1 MW.....	50
FIGURA 3-24 POSIZIONI BARRA SHIM2 : ESTRATTE LE ALTRE BARRE	50
FIGURA 3-25 : LA REATTIVITÀ DELLO XENON	51
FIGURA 3-26 LE POTENZE DEL NOCCIOLO	55
FIGURA 3-27 LE POTENZE DEL NOCCIOLO	55
FIGURA 3-28 LE POTENZE DEL NOCCIOLO	56
FIGURA 3-29 INDICATORE DI POTENZA.....	58
FIGURA 3-30 SALITA A POTENZA	58
FIGURA 3-31 PARTICOLARE DELLA SALITA A POTENZA . SCALA 1 WATT :.....	59
FIGURA 3-32 PARTICOLARE DELLA SALITA A POTENZA . SCALA 10 WATT :	59
FIGURA 3-33 PARTICOLARE DELLA SALITA A POTENZA . SCALA 300 KW :.....	60
FIGURA 3-34 LA CURVA IN-HOUR REATTIVITÀ-PERODO STABILE DEL REATTORE TRIGA RC1 :SONO STATI RIPORTATI I PUNTI SIMULATI DAL MODELLO	62
FIGURA 3-35 IL GRADINO DI REATTIVITÀ : CADUTA PROVINO	64
FIGURA 3-36 RISPOSTA DEL REATTORE NEL DOMINIO DEL TEMPO	64

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 4 di 73
---	---------------------------	--	--------	----------	-------------

FIGURA 3-37	TIPICA CODA DEI NEUTRONI RITARDATI (ROSSO)	65
FIGURA 3-38	RISPOSTA DEL REATTORE NEL PIANO DELLE FASI POTENZA-REATTIVITÀ.....	65
FIGURA 3-39	VARIAZIONE ISTANTANEA TEMPERATURA MEDIA COMBUSTIBILE : 170 °C.....	66
FIGURA 3-40	RISPOSTA DEL REATTORE NEL DOMINIO DEL TEMPO	67
FIGURA 3-41	IL GRADINO DI REATTIVITÀ	67
FIGURA 3-42	LA REATTIVITÀ TOTALE : VENGONO ESTRATTE TUTTE LE BARRE ALLA MAX VELOCITÀ CONSENTITA.....	68
FIGURA 3-43	POTENZE NOCCIOLO.....	69
FIGURA 3-44	TEMPERATURA COMBUSTIBILE DOPO SVUOTAMENTO : SCAMBIO TERMICO CON ARIA	69
FIGURA 3-45	DIAGRAMMA DI FASE DELL'IDRURO DI ZIRCONIO.....	71
TABELLA 3-1	CONFRONTO TRA IL VALORE NOMINALE DELLE PRINCIPALI VARIABILI E QUELLO SIMULATO.....	29
TABELLA 3-2	VALORI RELATIVI ALLO XENON.....	42
TABELLA 3-3	PERDITA DI REATTIVITÀ PER XENON	49
TABELLA 3-4	MISURA DEL PERIODO STABILE E CONFRONTO CON LA CURVA INHOUR	61

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 5 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	-------------

Introduzione

Il laboratorio SIMING dell'unità UT-FISST dell'ENEA, nell'ambito delle proprie attività di modellistica e di simulazione, ha sviluppato il modello dinamico del reattore nucleare TRIGA RC-1 dell'ENEA.

Prima di iniziare la trattazione del modello, argomento fondamentale nel rapporto, è stato necessario fornire le caratteristiche principali del reattore Triga al fine di avere una base di conoscenza utile al modello stesso. Infatti nel capitolo primo viene presentato il reattore nel suo insieme, le informazioni riguardanti la struttura del nocciolo, le caratteristiche del combustibile e delle barre di controllo, una descrizione sintetica della piscina del reattore e dell'impianto di raffreddamento. Infine una panoramica della sala controllo e della consolle di manovra del reattore conclude l'esposizione, rimandando il lettore a /1/ per approfondimenti.

Nel capitolo secondo vengono trattati gli aspetti teorici del modello, gli obiettivi, la struttura, le variabili di ingresso, le variabili di uscita, ecc. Particolare spessore viene dato alle ipotesi di base della parte neutronica e termica del reattore per avere un quadro completo delle potenzialità del modello. Queste ultime verranno messe in evidenza nella parte sperimentale del rapporto. Viene inoltre fornito un esempio di procedura della interfaccia modello-operatore per evidenziare la versatilità del modello.

Infine nel capitolo terzo vengono riportate le simulazioni delle prove sperimentali del reattore. Queste hanno dimostrato che il modello è in grado di riprodurre il funzionamento dell'impianto nelle molteplici e tipiche condizioni di lavoro del Triga. Si passa dalle prove a potenza con e senza scram, a quelle specifiche di misura della reattività dello xenon, alle prove a potenza zero che hanno individuato una zona di instabilità del reattore.

Simulazioni di salita e discesa a potenza hanno messo in evidenza un buon controllo della reattività delle barre, così come il calcolo del periodo stabile rivela un adattamento corretto con la curva In-houre del reattore Triga. Infine il modello ha riprodotto le prove incidentali di reattività e di perdita del refrigerante (General Atomic) riportate nel Rapporto di Sicurezza del Triga.

Conclusioni

Le caratteristiche principali del modello TRIGA RC-1 si possono riassumere in termini di :

- Stabilità :
Il modello raggiunge sempre una condizione stazionaria (reattore critico) a partire da qualunque punto di funzionamento
- Affidabilità della soluzione :
Risultati ingegneristici in linea con dati sperimentali e con le specifiche del R.S.T.
- Stiff system : dinamiche veloci e lente

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 6 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	-------------

- Tempo di calcolo : circa il 45% dell'intervallo simulato in base al computer utilizzato di tipo personal
- Maneggevolezza

Il modello è dotato di Restart

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 7 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	-------------

1. Il reattore nucleare TRIGA RC-1 dell'ENEA

Il laboratorio SIMING dell'unità UT-FISST dell' ENEA, nell'ambito delle proprie attività di modellistica e di simulazione, ha sviluppato il modello dinamico del Reattore Nucleare TRIGA RC-1 dell' ENEA.

Nel capitolo vengono fornite le caratteristiche principali del reattore al fine di avere una base di conoscenza utile al modello, rimandando il lettore a /1/ per approfondimenti.

1.1. Le caratteristiche principali del reattore

Il reattore nucleare di ricerca **TRIGA RC-1** (**T**raining **R**adio **I**sotope **G**eneral **A**tom **R**eactor **C**asaccia **1**) è stato realizzato nel 1960 nell'ambito dell'iniziativa USA Atom for Peace nella versione a 100 kW e portato successivamente alla potenza di 1000 kW su progetto ENEA. Questo reattore insieme al TAPIRO costituiscono gli unici due reattori nucleari italiani in funzione presso il Centro di Ricerca della Casaccia dell'ENEA.

Il TRIGA RC-1 viene impiegato :

- come sorgente di neutroni per irraggiamenti a supporto della scienza dei materiali, della biologia e per lo sviluppo di radio farmaci usati nella medicina nucleare
- a supporto della didattica dei corsi di Ingegneria Nucleare

Le sue caratteristiche principali sono :

- Reattore termico a piscina con potenza nominale di 1000 kW
- Flusso neutronico max : 2.7×10^{13} neutroni / cm².sec alla potenza max
- Facilities di irraggiamento

Le **fig. 1.1** e **1.2** mostrano una vista del nocciolo e della hall tecnologica del reattore.

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 8 di 73
---	---------------------------	--	--------	----------	-------------

1.2. Il combustibile e il nocciolo

Il nocciolo del reattore TRIGA RC-1 è un insieme cilindrico che comprende gli elementi di combustibile, le barre di controllo e una sorgente di Americio-Berillio per l'avviamento, **fig. 1.3** . L'acqua che circonda questi componenti occupa circa 1/3 del volume del nocciolo.

L'elemento di combustibile (= barra) è formato da una lega ternaria di Idruro di Zirconio e Uranio (HZr-U), il cui rapporto tra atomi di H e di Zr vale 1,7 .

Questo rapporto conferisce al reticolo cristallino della lega una elevata stabilità dal punto di vista metallurgico e nucleare, che verrà evidenziata in alcune prove incidentali simulate dal modello.

L'uranio è arricchito al 20% in peso nell'elemento fissile U235. La moderazione neutronica è affidata dunque non soltanto all'acqua di raffreddamento ma anche allo idruro di zirconio della lega , conferendo al reattore un elevato coefficiente negativo pronto della temperatura (effetto Doppler); l'insieme risulta quindi di una sicurezza intrinseca molto elevata . L'elemento di combustibile, delimitato alle due estremità da cilindretti di grafite (riflettore assiale), è incamiciato mediante una guaina di acciaio inossidabile .

Le barre di controllo :

- Sicurezza “fueled follower “
- Shim1 e Shim2 “fueled follower “
- Regolazione senza “fueled follower “

sono formate da carburo di boro (forte assorbitore neutronico) e incamiciate in acciaio inossidabile.

Il riflettore di forma toroidale a sezione rettangolare in grafite è circondato da uno schermo termico di piombo (alto z) per assorbire i raggi gamma provenienti dal nocciolo .

1.3. L'impianto di raffreddamento del reattore

Il nocciolo del reattore è immerso in una piscina di acqua e viene raffreddato per circolazione naturale, **fig. 1.4** .

Il calore prodotto dal reattore, ceduto all'acqua sotto forma di entalpia, viene asportato all'esterno della piscina mediante un tubo di aspirazione connesso ad una pompa, **fig. 1.5**. L'acqua calda viene inviata a due scambiatori identici di calore posti in serie, aventi asse orizzontale e fascio tubiero a due passaggi . I secondari lato cassa, anch'essi in serie, sono collegati a due torri di raffreddamento in parallelo esterne alla hall del reattore, le quali disperdono il calore nell'ambiente. Una pompa estrae dalle casse di raccolta delle torri l'acqua fredda inviandola agli scambiatori .

Nella figura 1.5 sono indicati anche i valori nominali delle portate e delle temperature dell'acqua.

La portata primaria viene mantenuta sempre al valore costante di 80 m³/h anche quando il reattore è spento per motivi di sicurezza.

E' importante per il modello del reattore osservare anche la struttura del pozzo. A partire dall'interno si incontra : contenitore in alluminio (spessore 1.4 cm), un meato di aria, uno strato

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 9 di 73
---	---------------------------	--	--------	----------	-------------

di malta (spessore 5 cm), un involucro di acciaio e la struttura di calcestruzzo armato, nonché la grande massa di acqua contenuta.

1.4. La sala di controllo

La strumentazione nucleare e convenzionale di misura e di controllo del reattore ha il suo output sulla consolle operativa all'interno della sala di controllo, riportata in **fig. 1.6** .

Nella figura vengono evidenziate in giallo le parti che risulteranno significative per il modello del reattore :

- Pannello di controllo principale , punto Pc . L'operatore estrae e inserisce le barre di controllo, esegue tramite due pulsanti le manovre di rientro barre e di scram manuale in casi di emergenza
- Indicatori di potenza, punto M
- Temperatura del combustibile, punto A
- Temperature dell'acqua negli scambiatori di calore, punto E
- Portate negli scambiatori di calore, punto B
- Allarmi vari : presenza di radioattività ambientale e nell'acqua, livello acqua pozzo, ecc.



Immagine con copyright ENEA

Figura 1-1 Vista del nocciolo del reattore TRIGA RC -1

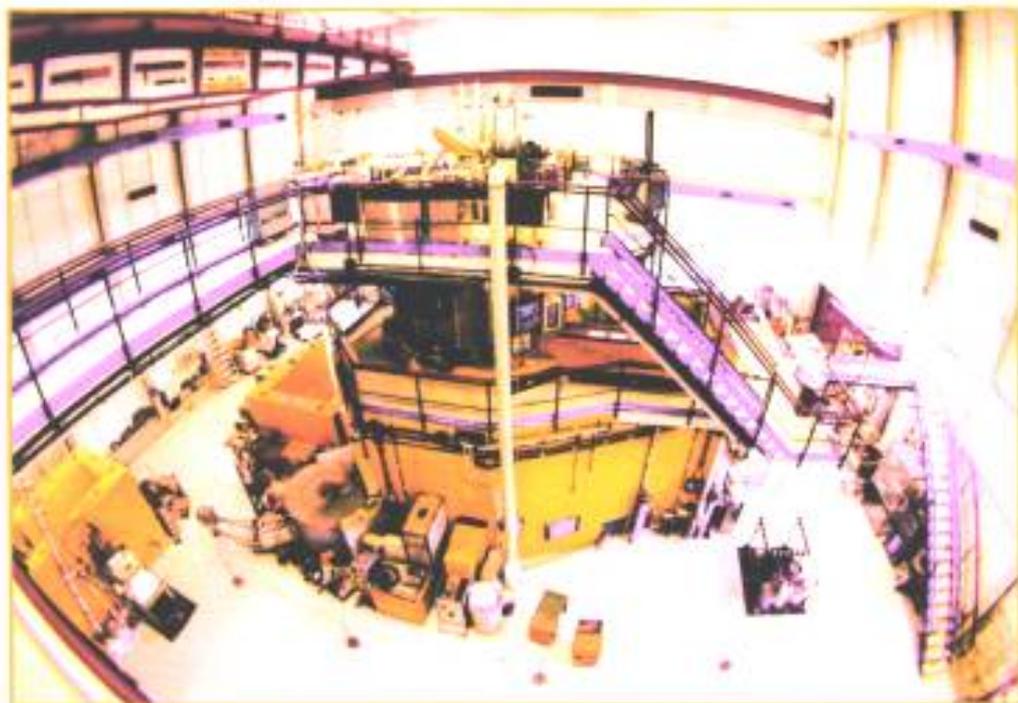


Figura 1-2 Vista della hall tecnologica del reattore TRIGA RC-1

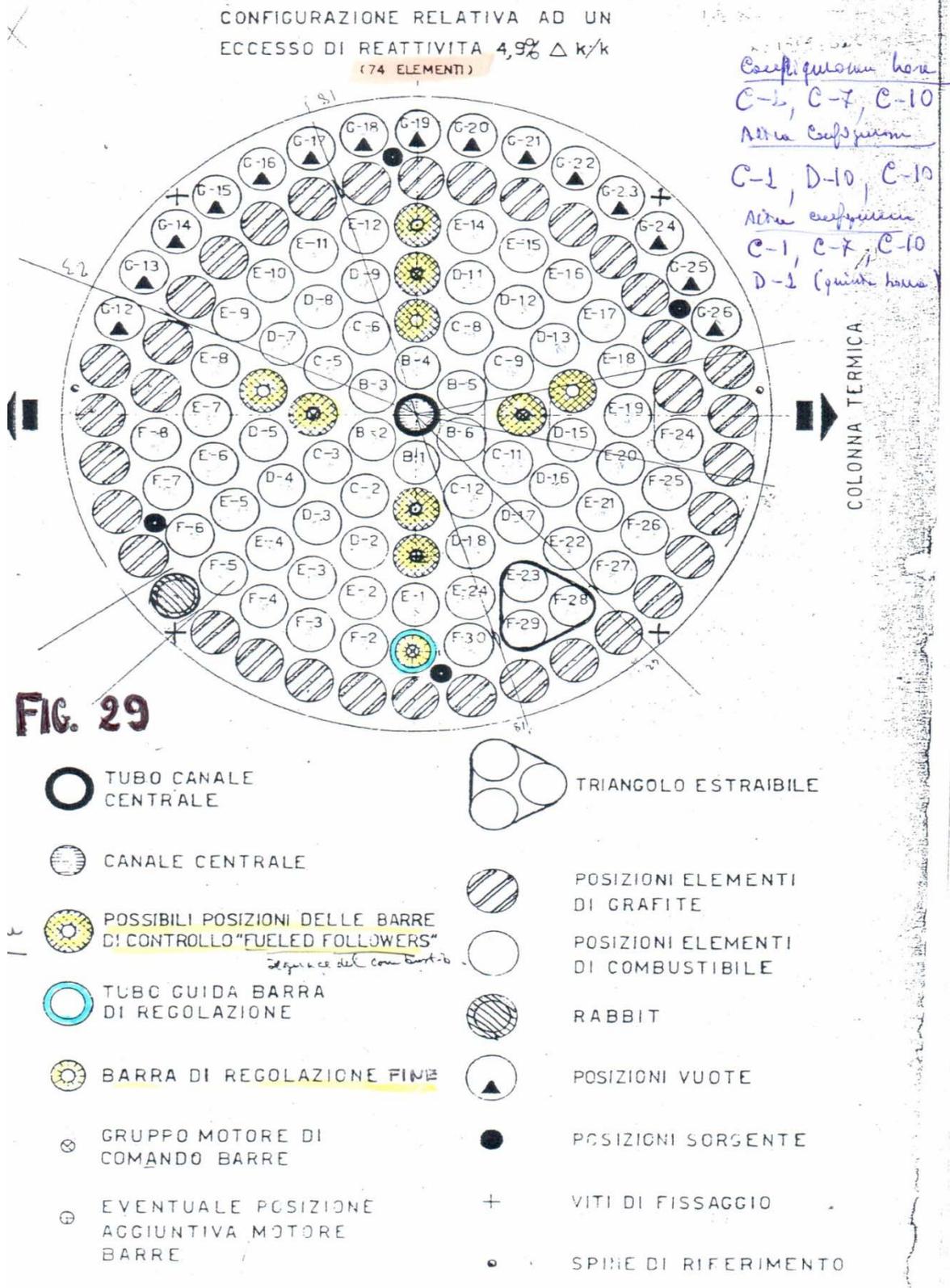


Figura 1-3 Configurazione del nocciolo del reattore TRIGA-RC1 :
disegno dal Rapporto di Sicurezza del Triga

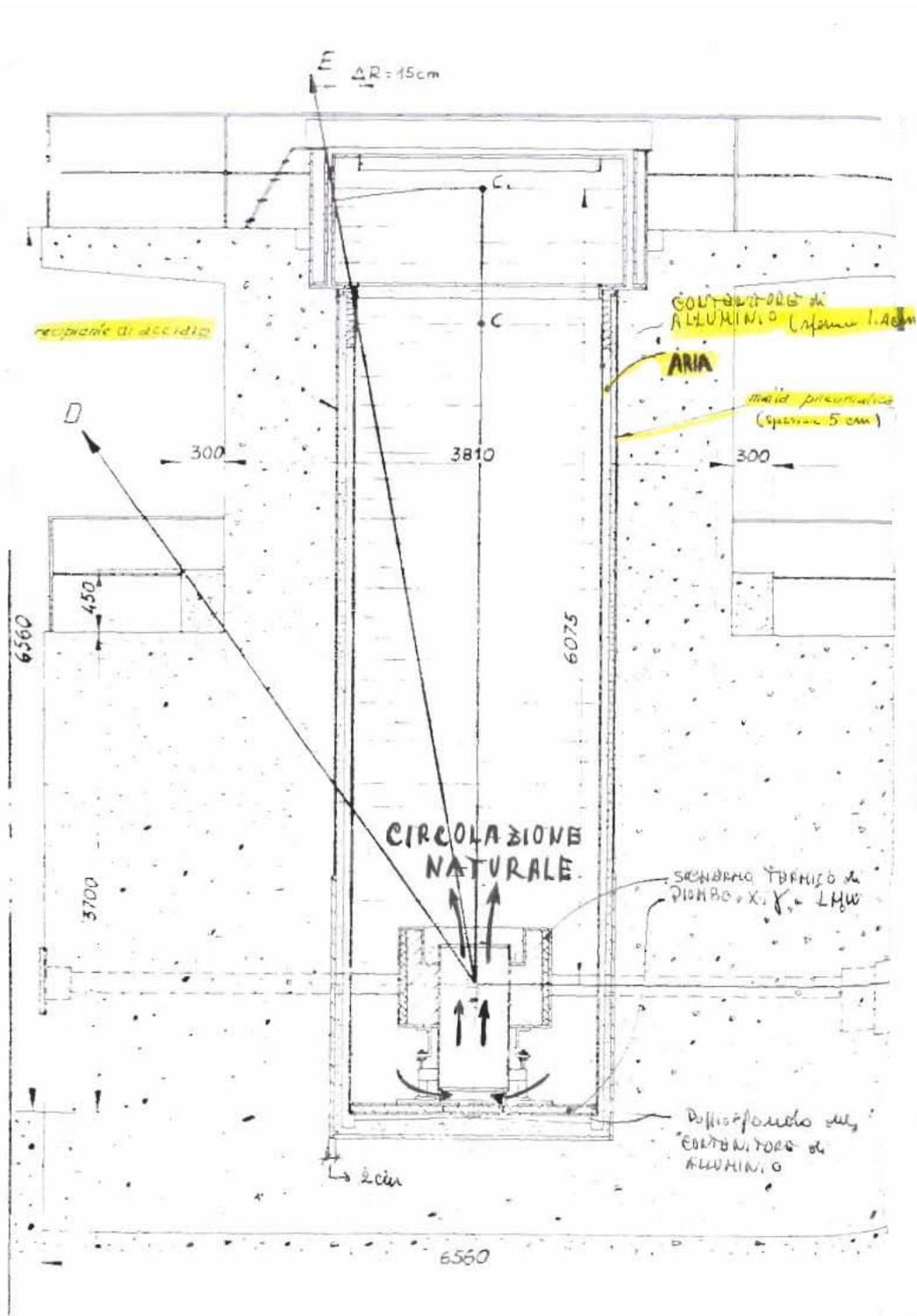


Figura 1-4 Spaccato del pozzo del reattore TRIGA-RC1 :
 disegno dal Rapporto di Sicurezza del Triga

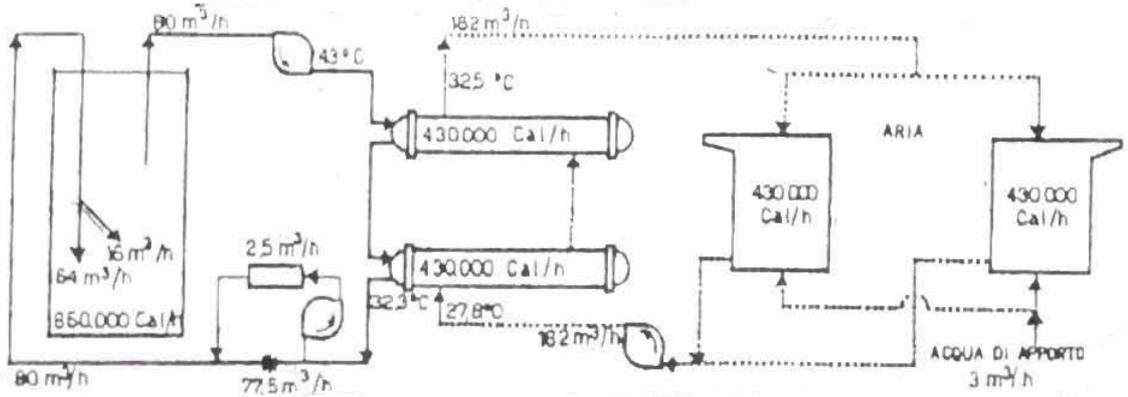


Figura 1-5 Impianto Raffreddamento del TRIGA-RC1 :
 disegno dal Rapporto di Sicurezza del Triga

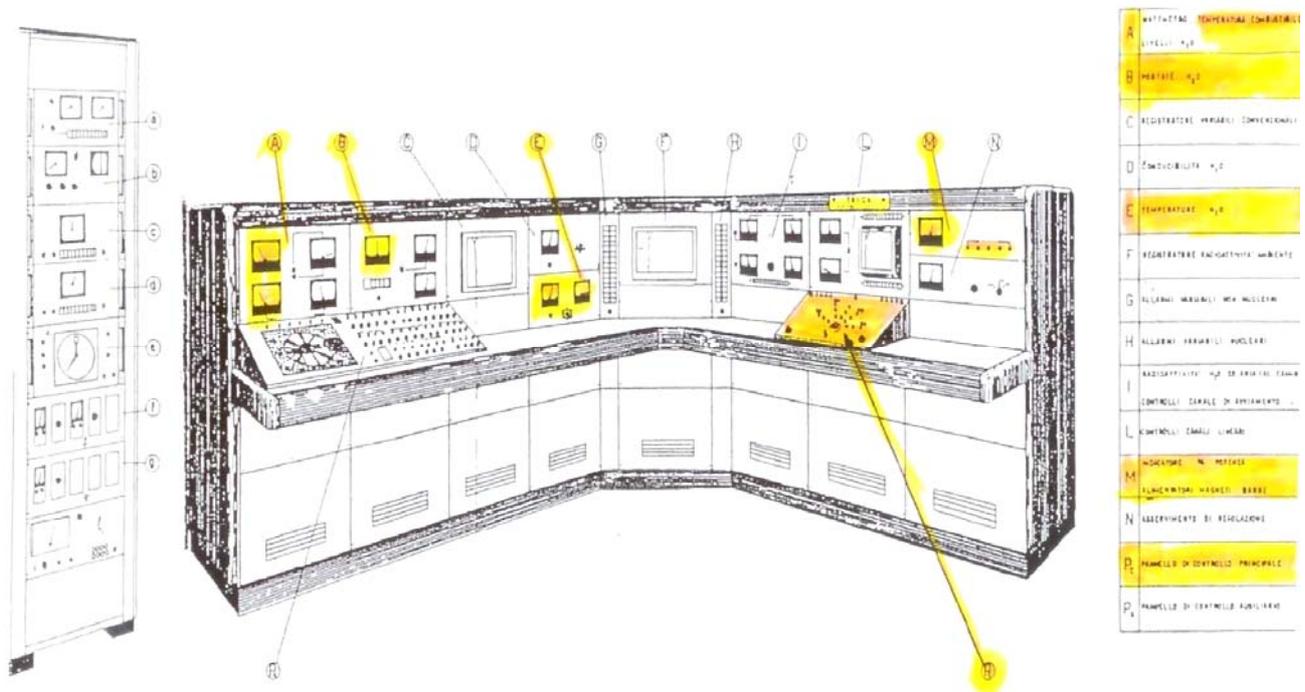


Figura 1-6 La sala controllo del reattore TRIGA-RC1 :
 disegno dal Rapporto di Sicurezza del Triga

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 14 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	--------------

2. Il modello del reattore nucleare TRIGA RC-1

Nel capitolo vengono presentati gli aspetti teorici del modello, gli obiettivi, la struttura, le variabili di ingresso, le variabili di uscita, ecc. Particolare cura viene rivolta alle ipotesi di base della parte neutronica e termica del reattore, per avere un quadro completo delle potenzialità del modello. Queste ultime verranno messe in evidenza nella parte sperimentale del rapporto. Viene inoltre fornito un esempio di procedura dell'interfaccia modello-operatore per evidenziare la versatilità del modello .

2.1. Gli obiettivi del modello

Il modello è stato progettato per simulare la dinamica del reattore e interiorizzare i processi :

- Avviamento, salita e discesa a potenza, variazione del livello di potenza, manovra normale di spegnimento e di emergenza (sequenza di rientro barre) ecc.
- Regimi stazionario, sinusoidale e pulsato
- Misure del periodo stabile
- Scram automatico e/o manuale del reattore
- Transitori rapidi dovuti a incidenti di reattività, incidente di svuotamento della piscina (General Atomic)

Necessario

- Visite impianto
- Il rapporto di sicurezza del TRIGA RC-1
- Conoscenza dell'impianto (data sheet, disegni costruttivi, ecc.) , parametri del combustibile e dei materiali ecc.
- Dati sperimentali (reattività, flusso, temperature ...)
- Un interlocutore del personale d'impianto del reattore

2.2. La struttura del modello

Il modello del TRIGA è costituito da un insieme di modelli dei componenti del reattore connessi tra loro, che si scambiano dati e informazioni .

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 15 di 73
---	---------------------------	--	--------	----------	--------------

Questi sono :

- Il modello neutronico-termoidraulico del nocciolo del reattore
- Il modello di movimentazione delle barre di controllo
- Il modello del Sistema di Controllo della velocità delle barre
- I modelli della dinamica del Iodio-Xenon e Promezio-Samario-> reattività Xe
- Il modello del sistema di sicurezza -> scram automatico del reattore
- Le subroutine delle manovre manuali di spegnimento del reattore per emergenza : scram e rientro barre manuali
- La subroutine per il calcolo del periodo stabile
- Il modello della potenza di decadimento a fronte dello spegnimento del reattore : la funzione di Borst-Wheller
- Il modello degli scambiatori di calore per il trasferimento del calore prodotto all'ambiente (reattore sperimentale)

In **fig. 2.1** viene riportato lo schema a blocchi del modello del reattore TRIGA RC-1

2.2.1. Il Modello del Reattore Nucleare TRIGA RC-1

Il modello neutronico del nocciolo è costituito dalle equazioni della cinetica con sei gruppi di neutroni ritardati per l' U35. Può simulare anche un combustibile misto di U35 e Pu39 per complessivi dodici gruppi di ritardati. Il modello è controeazionato in reattività (Doppler ecc.) .

La reattività di barra viene introdotta dal modello di movimentazione delle barre di controllo, il quale simula le manovre eseguite dall'operatore d'impianto sulla console di controllo del reattore . Il modello contiene le curve di calibrazione delle barre di controllo.

Il modello termico del nocciolo simula il trasferimento del calore prodotto dalla barretta al fluido termovettore. Viene pertanto simulata la circolazione naturale dell'acqua che attraversa il nocciolo. In alternativa al modello di base, è stato sviluppato un secondo modello termico senza circolazione naturale, il quale può essere selezionato dall'operatore all'inizio di una seduta di simulazione .

Il modello della cinetica dello Xenon e del Samario (veleni neutronici) calcola le variazioni nel tempo della concentrazione di questi composti che introducono reattività negativa nel nocciolo. Viene infatti calcolata la reattività dello Xenon.

Sono presenti inoltre nel modello generale la controeazione pronta del combustibile (effetto Doppler) e quella dovuta alla variazione della densità dell'acqua per temperatura, che agisce sulla moderazione neutronica. Quest'ultima risulta tuttavia poco influente sul processo, tanto che sarebbe potuta essere trascurata.

Il modello del sistema di controllo della reattività agisce sulla velocità di salita o di discesa delle barre di controllo, in modo che le variazioni di potenza non siano veloci.

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 16 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	--------------

Il modello del sistema di sicurezza interviene spegnendo rapidamente il reattore (scram automatico) quando la potenza aumenta troppo velocemente o supera la potenza max consentita, in seguito a situazioni di anomalo funzionamento.

Per gli aspetti di controllo e di sicurezza è interessante vedere la simulazione della salita a potenza (...) riportata nella parte sperimentale del rapporto.

Il modello del sistema di emergenza consente all'operatore di intervenire in situazioni di emergenza (presenza di allarmi) spegnendo il reattore con manovre manuali di rientro barre o di scram, a secondo della situazione di pericolo (a giudizio dello operatore).

Si vedano a riguardo i due pulsanti del pannello di controllo riportato nella fig. 1.7 del capitolo primo.

Lo scram è un intervento di sicurezza molto stressante per il reattore e oltremodo pesante per il modello, il quale però risponde bene.

In seguito allo spegnimento del reattore (normale o scram) il nocciolo del reattore continua a produrre potenza termica per i decadimenti beta e gamma dei radionuclidi instabili. Nel modello del nocciolo è stata pertanto inserita la funzione di Borst-Wheller.

Infine il modello termico degli scambiatori di calore che consente di trasportare il calore prodotto dal reattore all'esterno dell'edificio reattore. Il modello è in grado di simulare anche la situazione di parzializzazione dell'impianto termico.

E' possibile inserire nel modello anche elevati gradini di reattività per i transitori con dinamica rapida, simulanti incidenti di reattività.

Il modello TRIGA è dotato di restart.

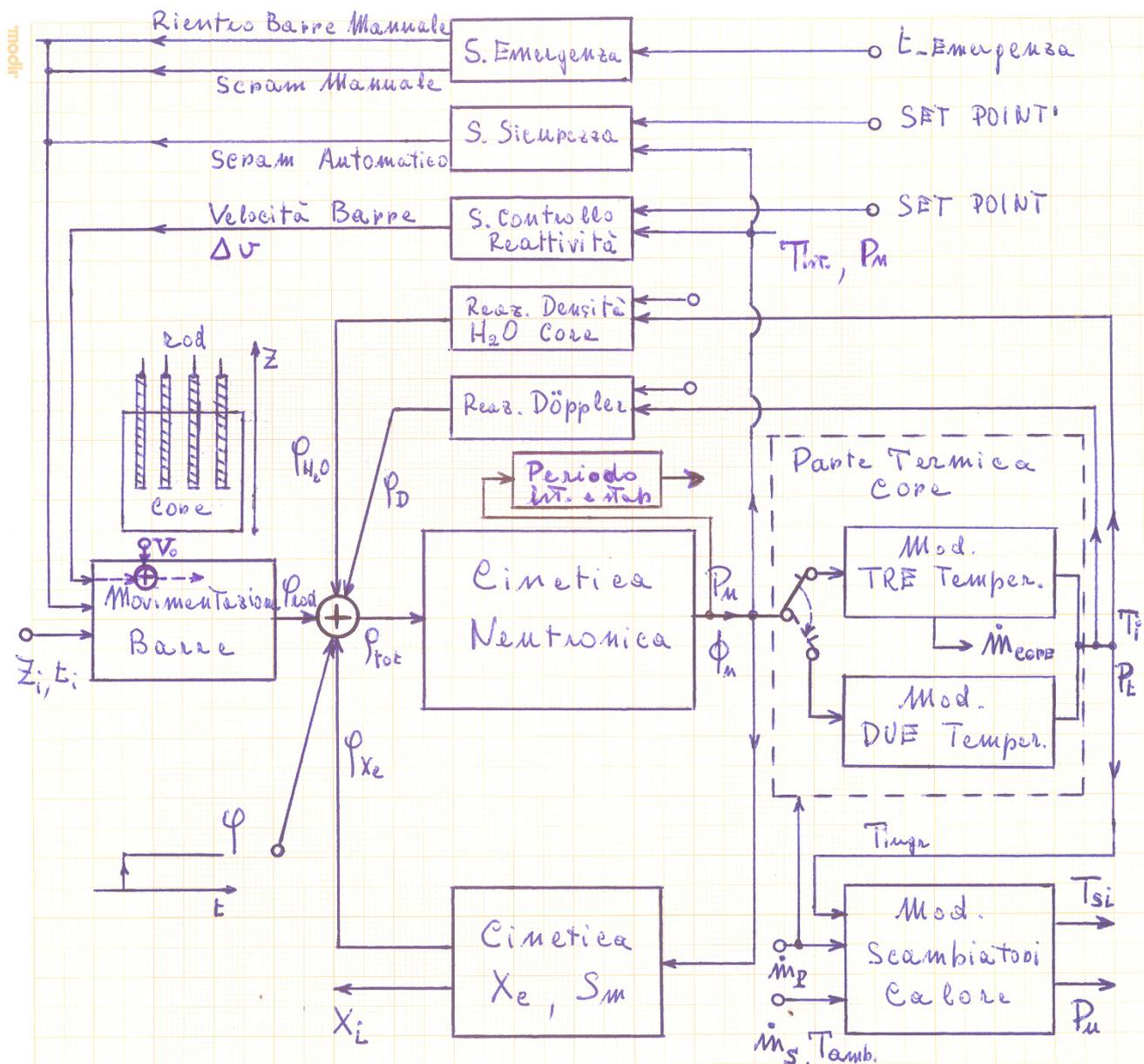


Figura 2-1 Schema a blocchi del Modello del Reattore TRIGA RC-1

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 18 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	--------------

2.3. Le ipotesi di base per il Modello del Reattore Nucleare TRIGA RC-1

Vengono riportate le ipotesi di base relative al nocciolo del reattore e alla parte convenzionale dell'impianto, così come sono state presentate alla comunità scientifica nel seminario effettuato nel Centro di Ricerca della CASACCIA, /2/.

2.3.1. Assunzioni per la parte neutronica del nocciolo

1. Modello a cinetica neutronica puntiforme
2. Cinetica : 1 gruppo neutroni pronti + 6 gruppi di ritardati per U-235 + 6 gruppi di ritardati per Pu-239

Caso TRIGA => 6 gruppi di ritardati per U-235

3. n (densità neutronica) , X_i , Flusso Neutronico , Potenza Prodotta

sono grandezze da ritenersi mediate nello spazio e variabili nel tempo .

In queste entra il Fattore di Picco (F.P. = 1.5)

4. Proporzionalità tra n , Flusso Neutronico , Potenza Prodotta

$$\Rightarrow \text{Flusso Neutronico} = n * vt$$

Si assume vt in corrispondenza della $E = 0.025$ eV da R.S.T (equilibrio termodinamico neutroni-combustibile)

5. Barre Controllo : le forme d'onda analitiche reattività-posizione sono state inserite nel modello di movimentazione barre .

⇒ Buon adattamento con i dati sperimentali, si vedano **fig. 2.2** e **2.3**

6. La velocità di inserzione della reattività viene regolata dal Sistema di Controllo della velocità di barra

⇒ Vedere salita a potenza

7. Reattività Doppler : coefficiente da R.S.T.

Controreazione rapida e di elevatissima intensità

-> combustibile formato da lega ternaria : U-H-Zr
(arricchimento 20% , H / Zr = 1.7 importante)

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 19 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	--------------

8. Reattività variazione Densità H₂O con la Temperatura

Controreazione debole in TRIGA

9. Reattività Xenon : Controreazione lenta

⇒ Cinetica Xenon

9.1 Cinetica Xenon-135 :

Si forma : - fondamentalmente da decadimento I-135
($\tau = 9.6$ ore)
- meno dalla fissione

Scompare : - per assorbimento neutronico
($\sigma = 3 \cdot 10^6$ barns)

- per decadimento ($\tau = 13$ ore)

I-135 deriva dal decadimento del Tc-135 ($\tau = 2$ minuti)

⇒ Si assume che I-135 venga generato da Fissione

- . Le costanti di tempo giocano un ruolo importante nel modello

9.2 Quando il reattore viene spento si produce un transitorio di accumulo : “ Xenon build-up “

10. Cinetica Samario-149 :

Si forma : - da decadimento Pm-149
($\tau = 47$ ore)

Scompare : - solo per assorbimento neutronico
($\sigma = 5 \cdot 10^4$ barns)

Elemento stabile

Pm-149 deriva dal decadimento del Nd-149
($\tau = 2$ ore)

⇒ Si assume che Pm-149 venga generato da Fissione

- . Le costanti di tempo giocano un ruolo importante nel modello

⇒ Si trascura la reattività del Sm-149

11. Il Consumo di Fissile proporzionale all' Energia Prodotta
12. La Potenza di Decadimento (gamma e beta) dopo lo spegnimento del reattore viene espressa dalla funzione di BORST-WHEELER

Si assume che i gamma depositino la loro energia interamente nel combustibile

13. Sono previsti nella dinamica del reattore Scram automatico (Sistema di Sicurezza) e le manovre di Emergenza Scram manuale e Rientro Barre

MODELLO BARRE CONTROLLO

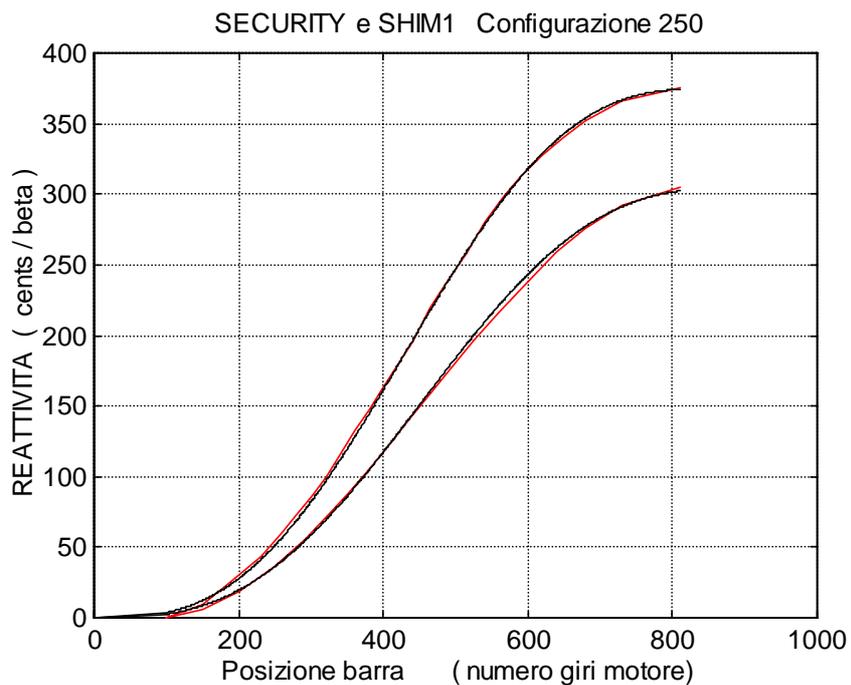


Figura 2-2 Le barre di controllo Sicurezza e Shim1

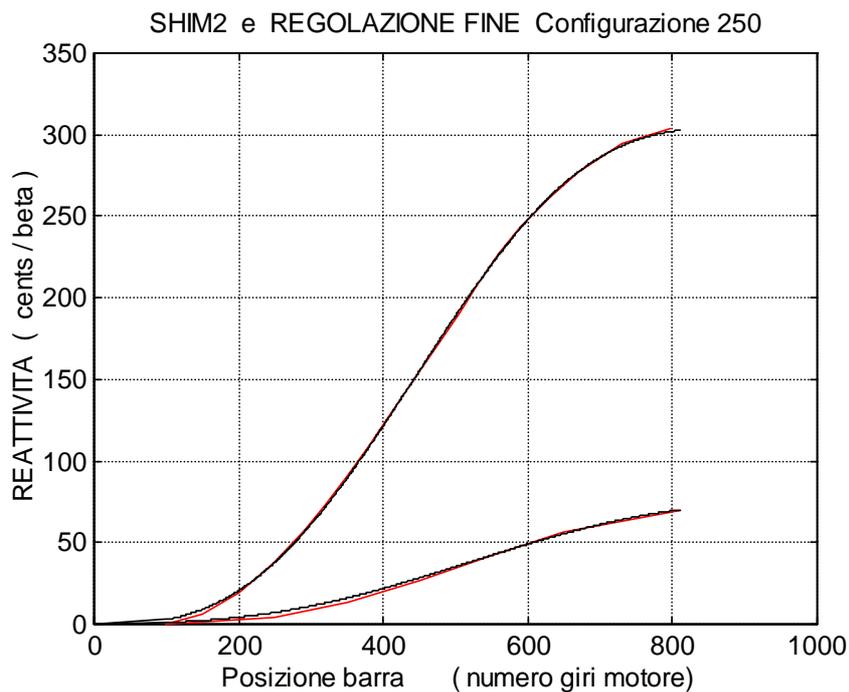


Figura 2-3 Le barre di controllo Shim2 e Regolazione Fine

Rosso = sperimentale Nero = calcolato

2.3.2. Assunzioni per la parte termica del nocciolo

Due modelli alternativi :

-> Modello a TRE Temperature (di base)

T combustibile
T massa H2O nocciolo (fluido termovettore)
T massa H2O pozzo
+ Circolazione Naturale attraverso Nocciolo

-> Modello a DUE Temperature

T combustibile
T massa H2O totale pozzo

Le temperature sono da ritenersi grandezze mediate nello spazio e variabili nel tempo

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 22 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	--------------

2.3.2.1 Modello a TRE Temperature

1. Il coefficiente di scambio termico Combustibile-H₂O vettore :

$$U = A_o / (r_1/ 2 * K_u + r_1/K_i * \ln r_2/r_1 + 1/h)$$

dove $A_o < 1$ (leggermente), tiene conto della resistenza termica di contatto

$h =$ coeff. scambio guaina-H₂O

2. La conduzione assiale del calore nella barretta riduce i gradienti assiali (molto elevati in barrette con pellets)
3. La massa di H₂O pozzo riceve energia dalla portata di circolazione ed energia viene asportata dal primario degli scambiatori di calore
4. Si trascurano le perdite di calore attraverso le mura del pozzo e l'evaporazione (reintegro) :

$$M_{h_2o_evap} \ll M_{h_2o_pozzo}$$

Circolazione Naturale nel Nocciolo

5. La differenza di densità H₂O tra colonna calda nocciolo e quella fredda esterna produce il movimento
6. La dipendenza della densità H₂O dalla temperatura è stata espressa con una parabola cubica nell'intervallo di applicazione, si veda la **fig. 2.4** .
7. La resistenza idraulica è un parametro noto da R.S.T.

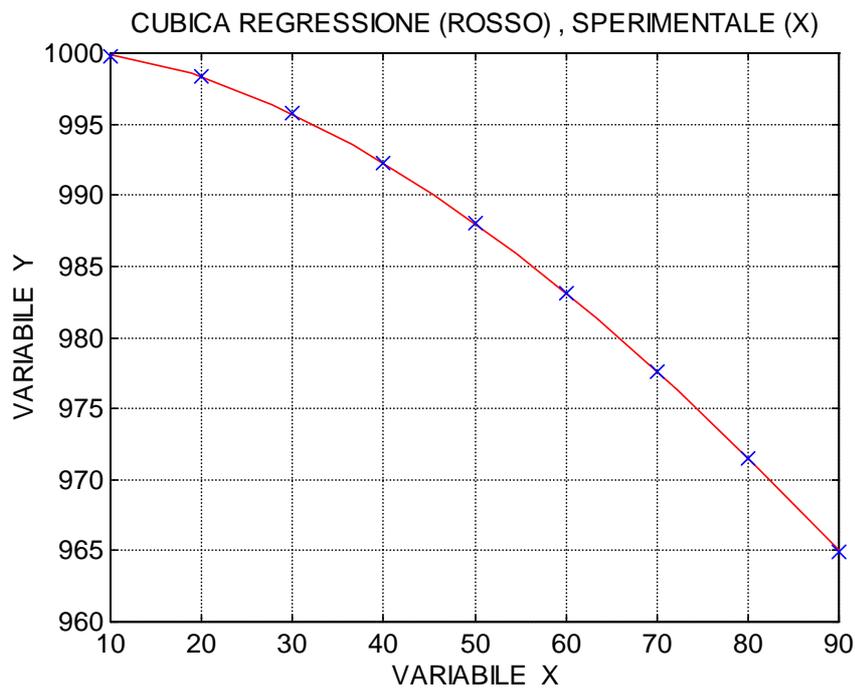


Figura 2-4 La densità dell'acqua in funzione della temperatura

» regre

parabola cubica : densità_h2o = $y = a + b * x + c * x^2 + d * x^3$

$y = (\text{kg} / \text{m}^3)$ $x = (^\circ\text{C})$

$a = 1.0003\text{e}+003$ $b = 0.0151$ $c = -0.0060$ $d = 1.6558\text{e}-005$

errore_quadratico_medio = 0.0028

2.3.2.2 Modello a DUE Temperature

-> Non viene calcolata la Circolazione Naturale nel Nocciolo

Il modello si basa sull'ipotesi :

“La potenza trasmessa dalla barretta a H2O termovettore viene totalmente e istantaneamente ceduta alla massa H2O del pozzo “

L'ipotesi nasce da tre osservazioni :

1. Grande inerzia termica della massa H2O del pozzo :

$$M_{\text{h2o_pozzo}} \gg M_{\text{h2o_core}}$$

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 24 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	--------------

- Tempo di transito di una perturbazione attraverso il nocciolo piccolo rispetto ai tempi caratteristici dei transitori termici della massa H₂O del pozzo :

$$\tau \ll \tau_{\text{h2o_pozzo}}$$

- In condizioni stazionarie il ritardo τ perde significato

2.3.3. Assunzioni per l'impianto di raffreddamento del reattore

- Gli scambiatori di calore sono costruttivamente identici
 \Rightarrow le potenze cedute ai secondari uguali (da R.S.T.)

- Fascio tubiero a due passaggi è percorso in concorrente e controcorrente da H₂O del secondario

$$\Rightarrow U_{\text{tot}} \text{ espresso da correlazione Dittus-Boelter}$$

valida per entrambi i tipi di flusso

- La massa del fascio tubiero viene trascurata
(ipotesi molto usata)
- Perdite di energia nulle nell'ambiente dagli scambiatori e tubazioni (buona coibentazione)
- Con portata secondaria nulla e reattore in funzione (tipicamente avviamento e/o potenza ridotta) si assume :

$$U_{\text{tot}} = 0 \text{ fascio tubiero}$$

Condizione di adiabaticità del primario

- La parzializzazione dell'impianto è una operazione che consente il funzionamento del reattore a potenza ridotta

$$\Rightarrow \text{Può essere eseguita nel modello}$$

- La Temperatura H₂O del primario ingresso scambiatore n. 1 coincide con Temperatura media H₂O pozzo
- La Temperatura H₂O del secondario ingresso scambiatore n. 2 coincide con Temperatura ambiente esterna (da R.S.T.), che diviene una variabile ingresso del modello

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 26 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	--------------

Le variabili di uscita

Nocciolo reattore :

Flusso neutronico medio	(neutroni/ cm ² .sec)
Potenza termica prodotta	(watt)
Potenza termica trasmessa H2O raffreddamento	(watt)
Potenza termica miscelata con H2O pozzo	(watt)
Temperatura combustibile	(°C)
Temperatura h20 ingresso nocciolo	(°C)
Temperatura h20 uscita nocciolo	(°C)
Portata circolazione naturale nel nocciolo	(m ³ / h)
Consumo Integrale Fissile	(gr)
Reattività Xenon	(cents di beta)
Reattività totale	(cents di beta)

Scambiatori :

Temperature primario ingresso e uscita	(°C)
Temperature secondario ingresso e uscita	(°C)
Potenza termica trasmessa primario secondario	(watt)

Condizioni iniziali

Potenze nocciolo nulle
Potenze scambiatori nulle

Temperature combustibile e acqua (nocciolo, pozzo, scambiatori) uguali alla temperatura ambiente

Concentrazioni nulle dei veleni neutronici Xenon e Samario

Il modello è dotato di restart

2.4.1. L'interfaccia operatore-modello per l'input nell'ambiente MATLAB

In questo paragrafo vengono forniti alcune informazioni sull'ambiente di sviluppo MATLAB del modello e un esempio di input per l'operatore.

Ambiente di Sviluppo

Il MATLAB della Società MathWorks è un ambiente di simulazione utilizzato in tutto il mondo. Le sue caratteristiche si possono riassumere

- general purpose molto potente per il calcolo
- grande versatilità

- grande flessibilità

E' stato impiegato con successo in molte attività di modellistica di processi e di impianti .

Segue un esempio di input del modello

Dopo essere entrati in ambiente Matlab si fissa la lunghezza dell'intervallo di simulazione e si lancia il modello di nome TRIGARC1 :

```
>> N = 8 * 3600                                ( sec )
>> TRIGARC1                                    ( modello )
```

Compare l'icona principale

Interfaccia del modello reattore TRIGA



Figura 2-5 L'interfaccia principale operatore-modello

Si seleziona il campo obbligatorio 1. AVVIAMENTO .
Compare l'icona della movimentazione delle barre di controllo.
Queste vengono selezionate a piacere



Figura 2-6 L'interfaccia per la movimentazione delle barre di controllo

3. Simulazione delle prove sperimentali del reattore nucleare TRIGA RC-1

Nel capitolo vengono riportate le simulazioni delle prove sperimentali del reattore. Queste mostrano che il modello è in grado di riprodurre il funzionamento dell'impianto nelle molteplici e tipiche condizioni di lavoro del Triga. Si passa infatti dalle prove a potenza con e senza scram, a quelle specifiche di misura della reattività dello Xenon, alle prove a potenza zero, le quali individuano la zona di instabilità del reattore.

Simulazioni di salita e discesa a potenza mettono in evidenza un buon controllo della reattività delle barre da parte del modello, così come il calcolo del periodo stabile rivela un buon adattamento con la curva In-hour del reattore Triga. Infine il modello riproduce le prove riportate nel Rapporto di Sicurezza del Triga di incidenti di reattività e di perdita del refrigerante (General Atomic).

3.1. Funzionamento Triga in Condizioni Nominali : da R.S.T.

Il modello del Triga viene portato alla potenza nominale di 1 MWt e il livello viene mantenuto stabile per circa 6 ore di funzionamento. I valori delle variabili di ingresso e di uscita del modello sono stati riportati insieme ai dati nominali dell'impianto, desunti da **R.S.T.** , nella **tabella n. 3.1** .

Si osserva una ottima convergenza dei dati con un errore molto inferiore a 0.5 % .

I grafici delle variabili del modello sono stati riportati nel paragrafo. In particolare per il consumo di fissile, **fig. 3.1.5**, non presente nella tabella 3.1, occorre ricordare che il bruciamento di 1 grammo genera una energia di 1 MWd ; pertanto il funzionamento di circa 8 ore del Triga a potenza di 1 MWt corrisponde a un consumo di circa 1/3 di grammo di fissile. Per la reattività assorbita dallo Xenon, **fig. 3.1.6**, verranno presentate delle prove dedicate.

VARIABILI	Valori nominali	Simulazione
Potenza prodotta (MW)	1	1
Flux neutr. max (n/cm²*sec)	2.7*10 ¹³	2.7*10 ¹³
Delta T, h2o core (°C)	20	20
Portata core (m³/h)	43	42.5
Portata primario (m³/h)	80	80
Portata secondario (m³/h)	182	182
Delta T, primario (°C)	-10.7	-10.4
Delta T, secondario (°C)	+ 4.7	+ 4.7

Tabella 3-1 Confronto tra il valore nominale delle principali variabili e quello simulato

SIMULAZIONE CONDIZIONI NOMINALI

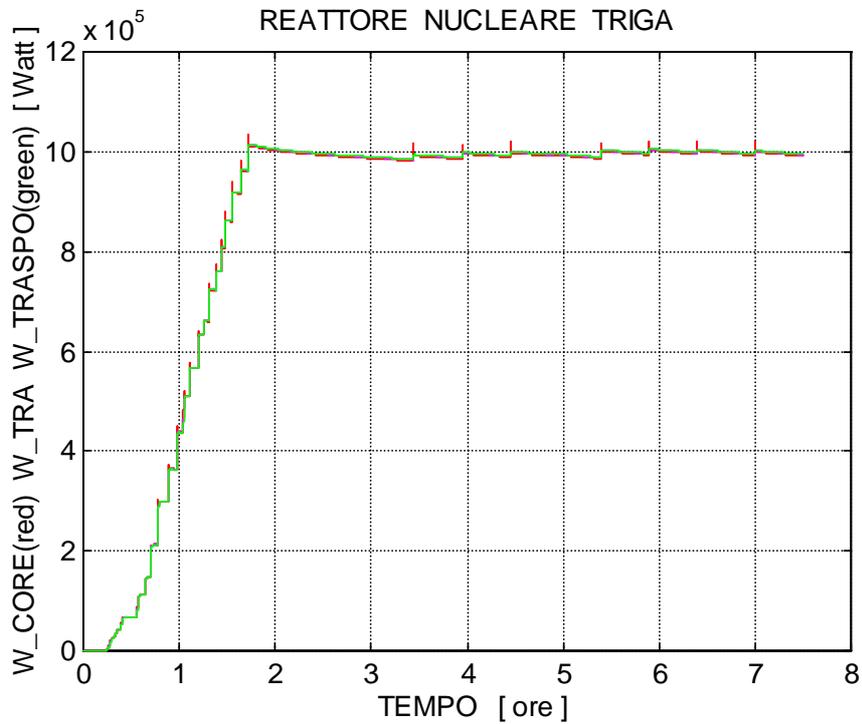


Figura 3-1 Potenze Nocciolo : Prodotta, Trasmessa , Trasportata

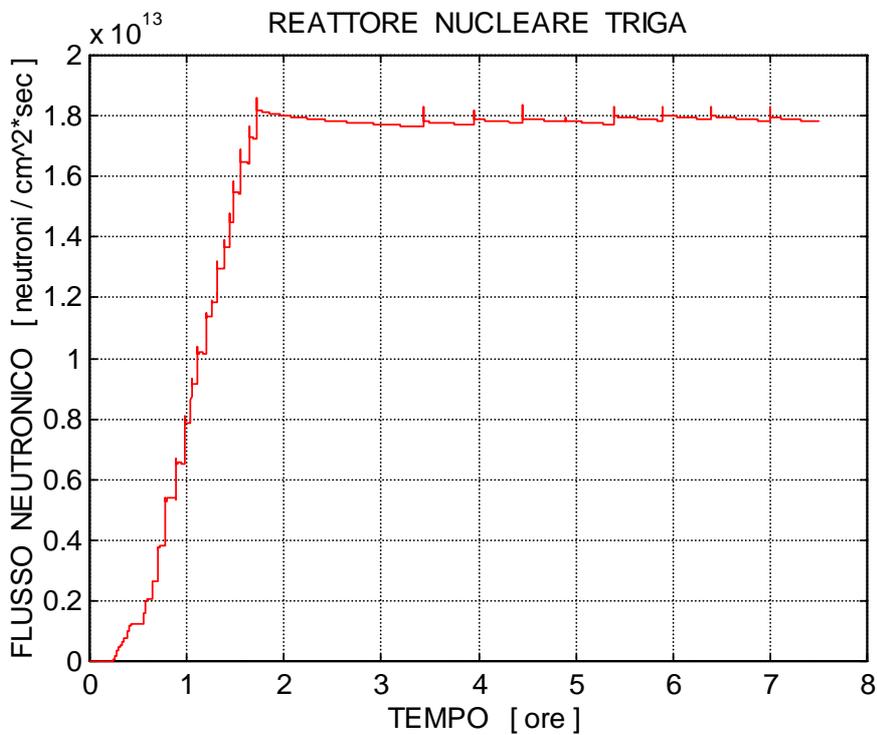


Figura 3-2 Il flusso neutronico medio : Fattore Picco = 1.5

(R.S.T. : Flusso_max = 2.7×10^{13} n / cm²*sec)

SIMULAZIONE CONDIZIONI NOMINALI

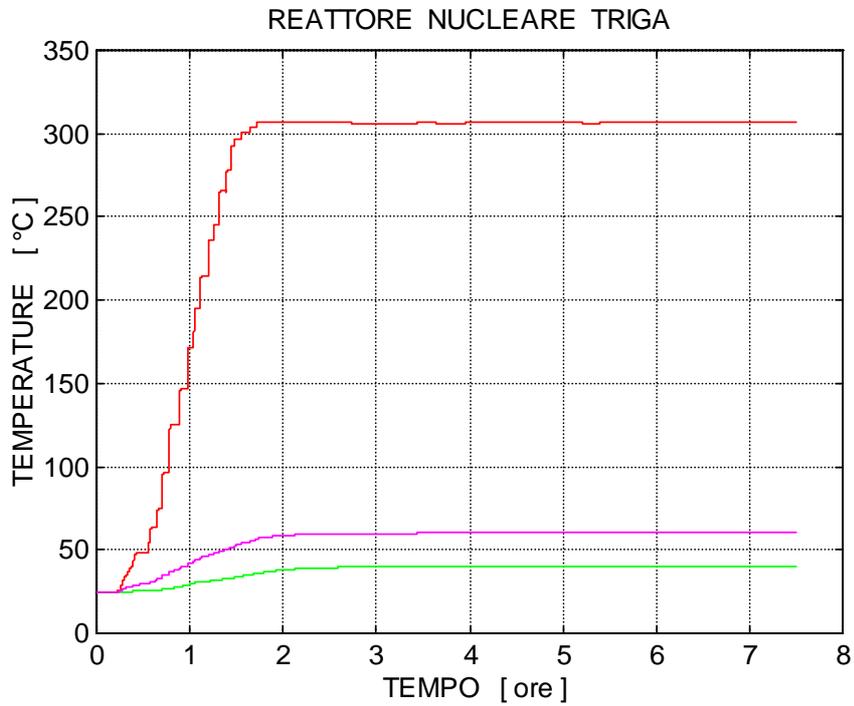


Figura 3-3 Temperature : combustibile, h2o uscita nocciolo, h2o piscina
 (R.S.T. : $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

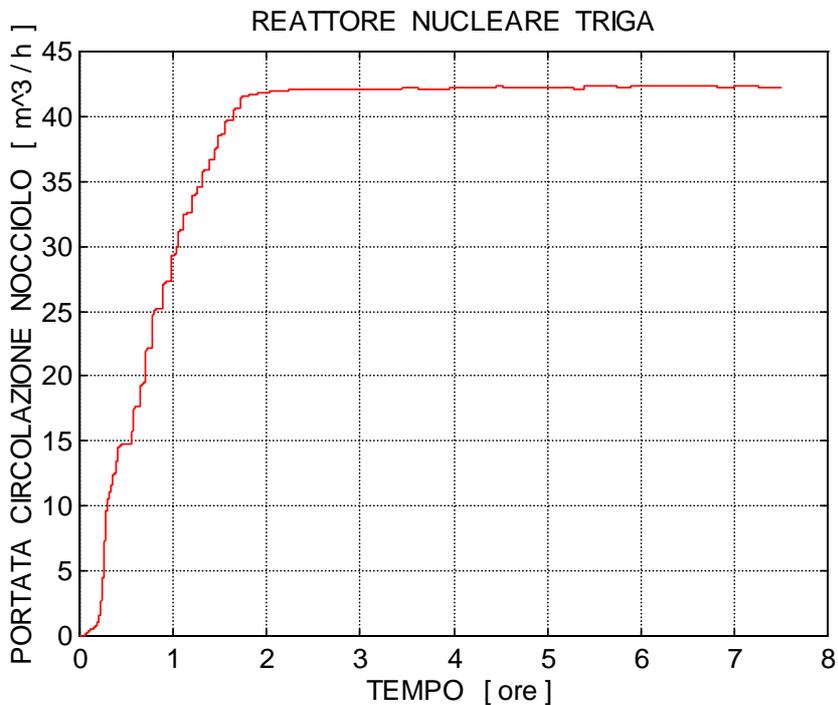


Figura 3-4 Portata Circolazione Naturale del Nocciolo
 (R.S.T. : Portata = $43\text{ m}^3/\text{h}$)

SIMULAZIONE CONDIZIONI NOMINALI

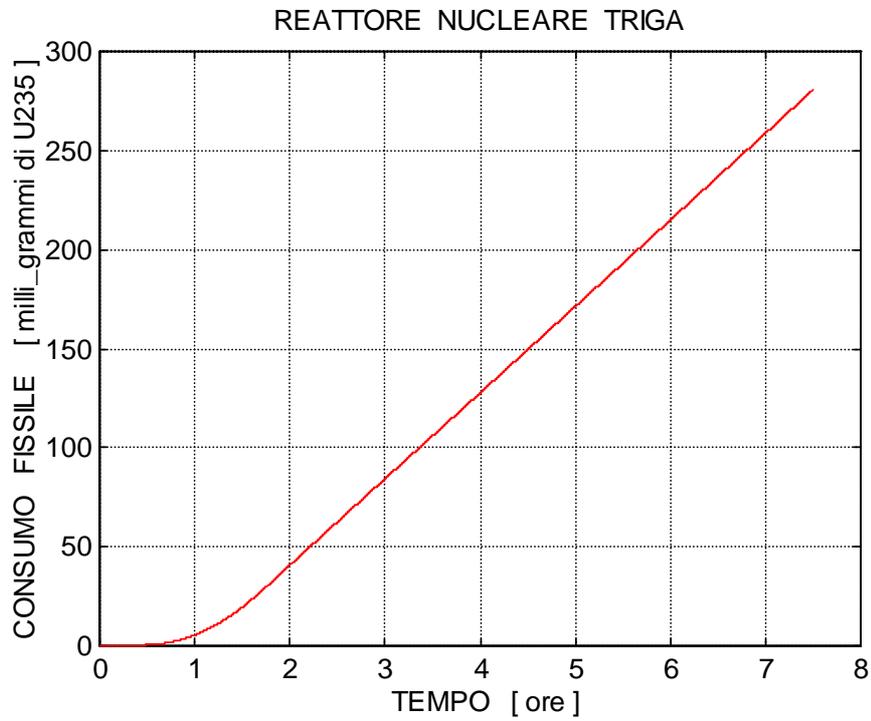


Figura 3-5 Consumo integrale di fissile

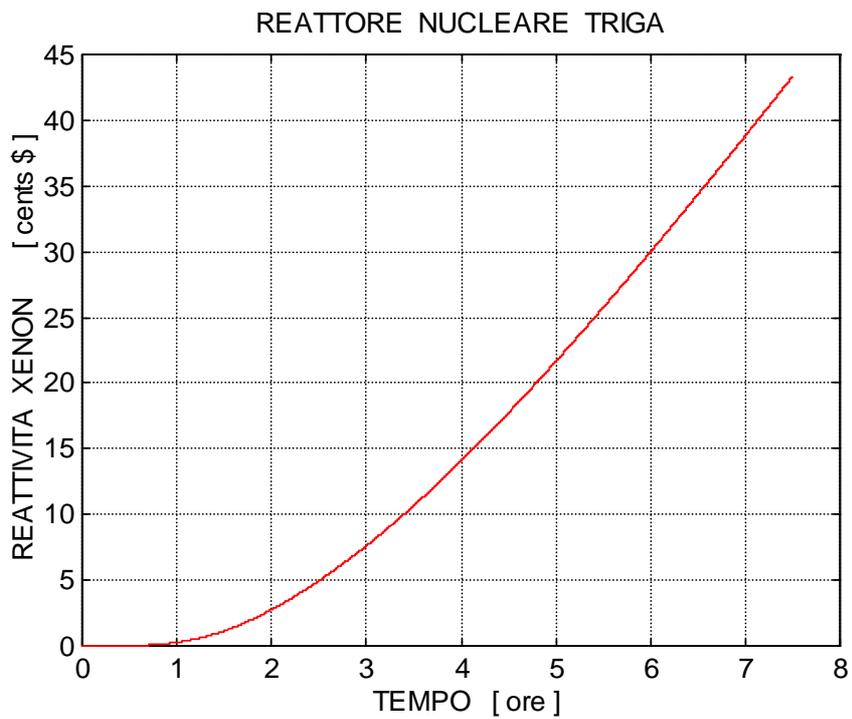


Figura 3-6 Reattività dello Xenon

SIMULAZIONE CONDIZIONI NOMINALI

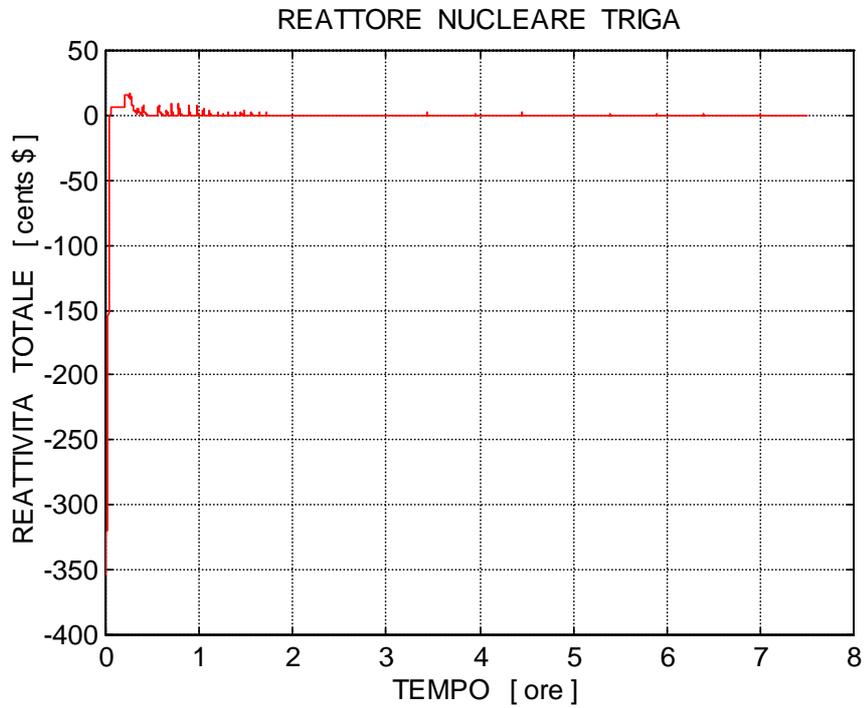


Figura 3-7 La reattività totale

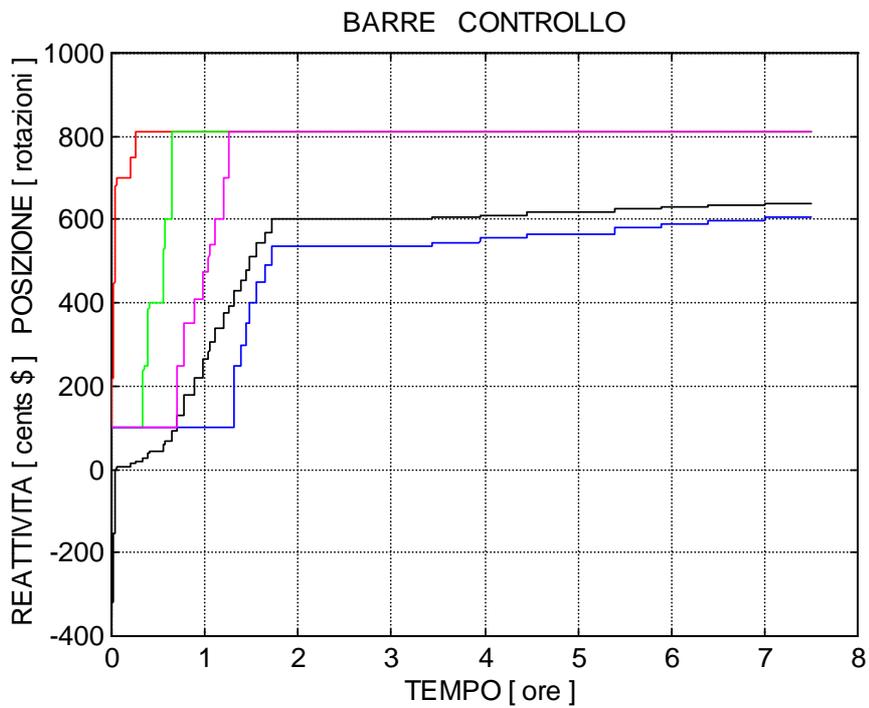


Figura 3-8 Posizioni e reattività totale delle barre di controllo
 rosso = sicurezza, verde = regolazione, viola e blu shim1 e 2

SIMULAZIONE CONDIZIONI NOMINALI



Figura 3-9 Portate Primario e Secondario Scambiatori

(R.S.T. : Prim= 83 m³ / h, Secon = 182 m³ / h)

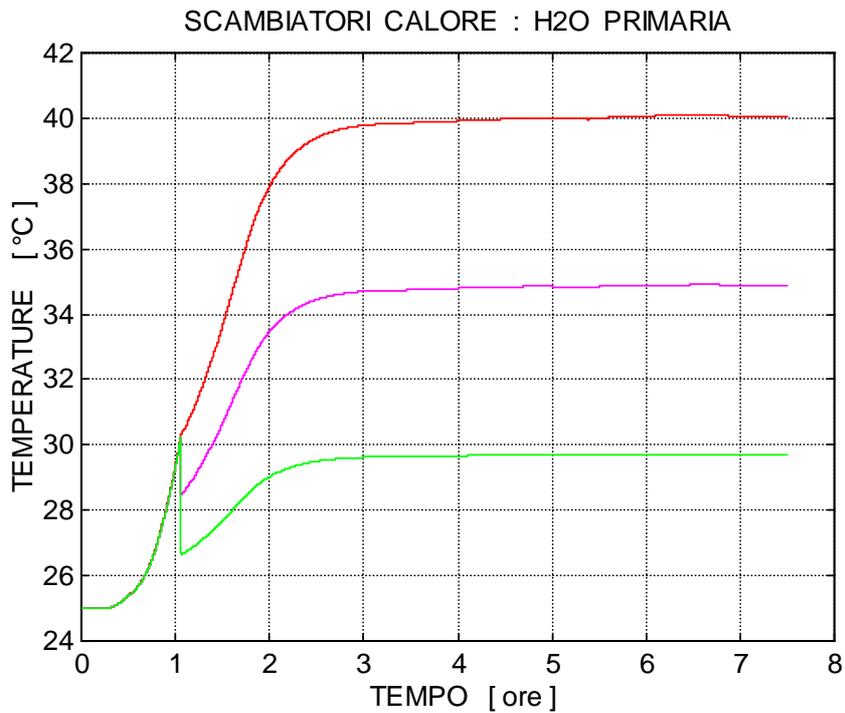


Figura 3-10 Temperature Scambiatori : H2O Primaria

(R.S.T. : DeltaTp = -10.7 °C)

SIMULAZIONE CONDIZIONI NOMINALI

SCAMBIATORI CALORE : H2O SECONDARIA

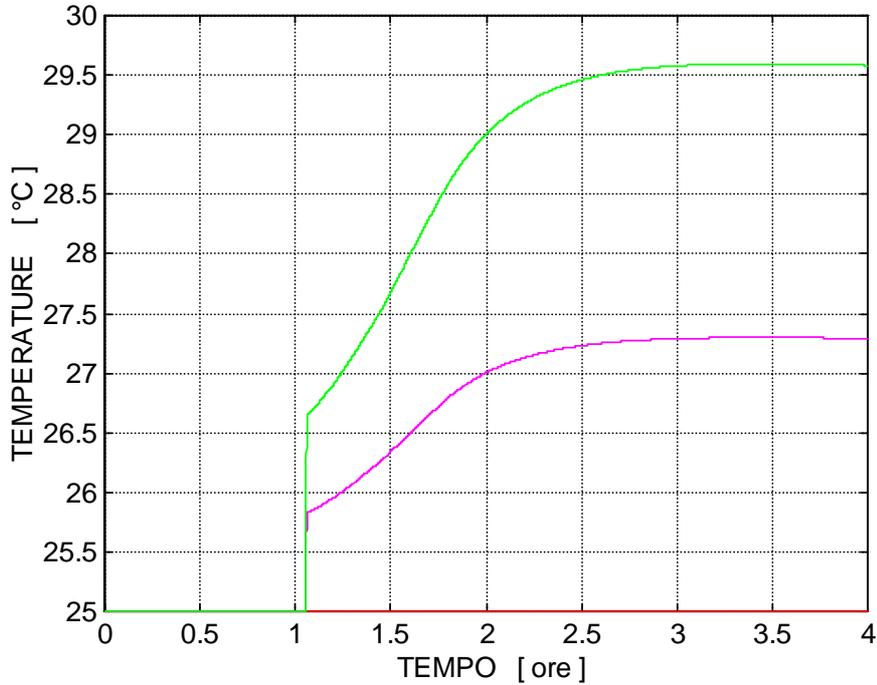


Figura 3-11 Temperature Scambiatori : H2O Secondaria

(R.S.T. : DeltaTs = + 4.7 °C)

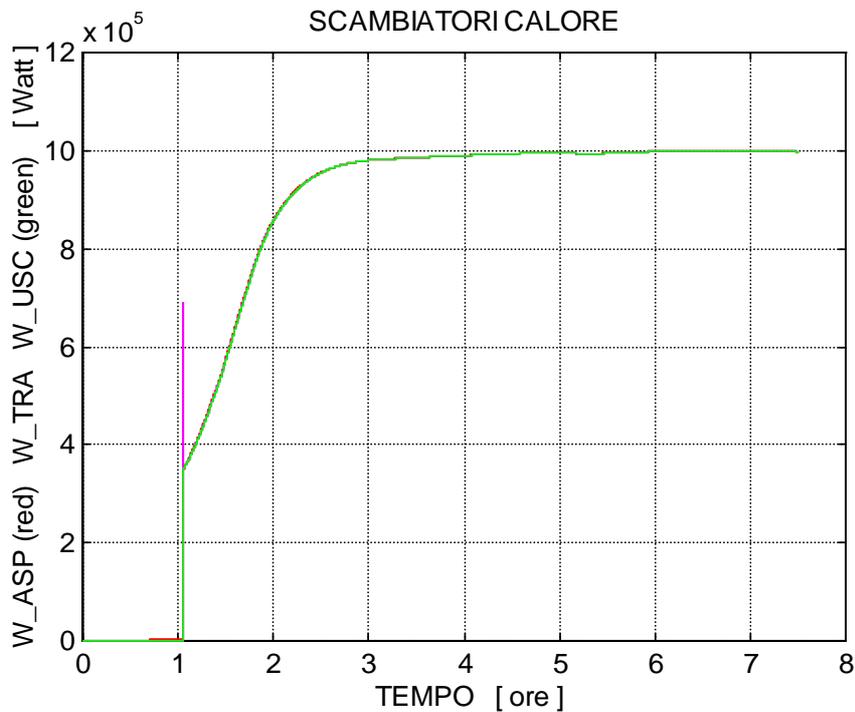


Figura 3-12 Potenze Scambiatori : Asportata da H2O pozzo

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 36 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	--------------

3.2. Prova Sperimentale a Potenza con Scram Automatico del 19 Ottobre 2010

La prova del 19 ottobre 2010 segna la data di avviamento del reattore TRIGA RC1 dell'ENEA dopo anni di inattività.

Il reattore viene portato alla potenza nominale di 1 MWt e mantenuto in tale livello per circa 5 ore, seguito successivamente da uno spegnimento rapido automatico di scram per prova strumentazione.

Il modello ha eseguito correttamente la simulazione evidenziando un buon adattamento con i dati sperimentali, riportati insieme ai dati simulati nelle **figure 3.13, 3.14, 3.15, 3.16** della potenza termica e delle temperature del combustibile e dell'acqua di raffreddamento.

Si nota inoltre un buon andamento della potenza di decadimento di Borst-Wheler durante lo scram, che rappresenta una manovra stressante per il reattore e una procedura pesante per il modello.

PROVA SPERIMENTALE 19-10-2010 CON SCRAM AUTOMATICO

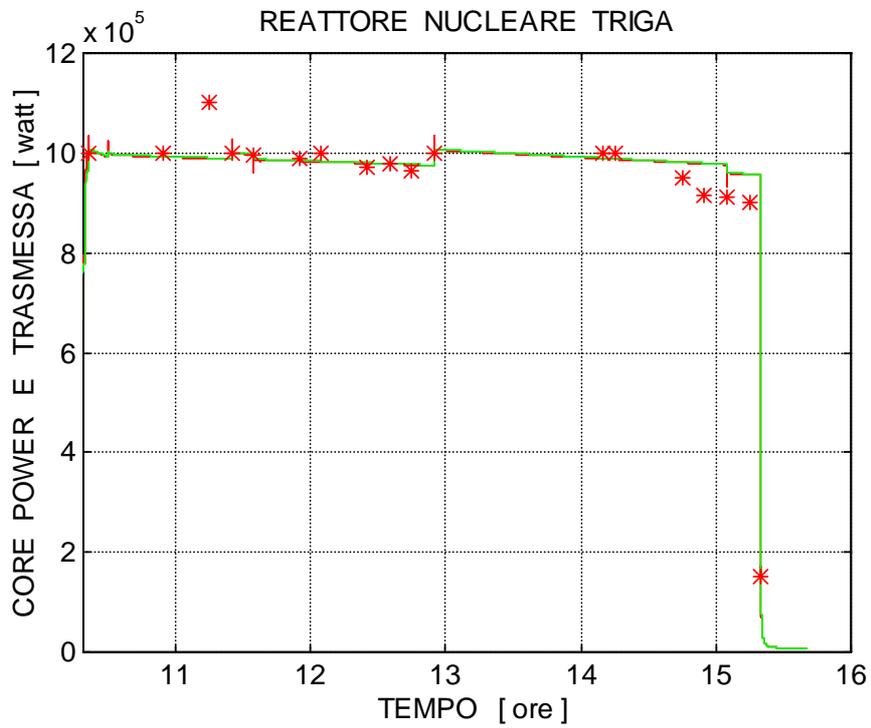


Figura 3-13 Potenze prodotta e ceduta all'acqua

* = valori sperimentali

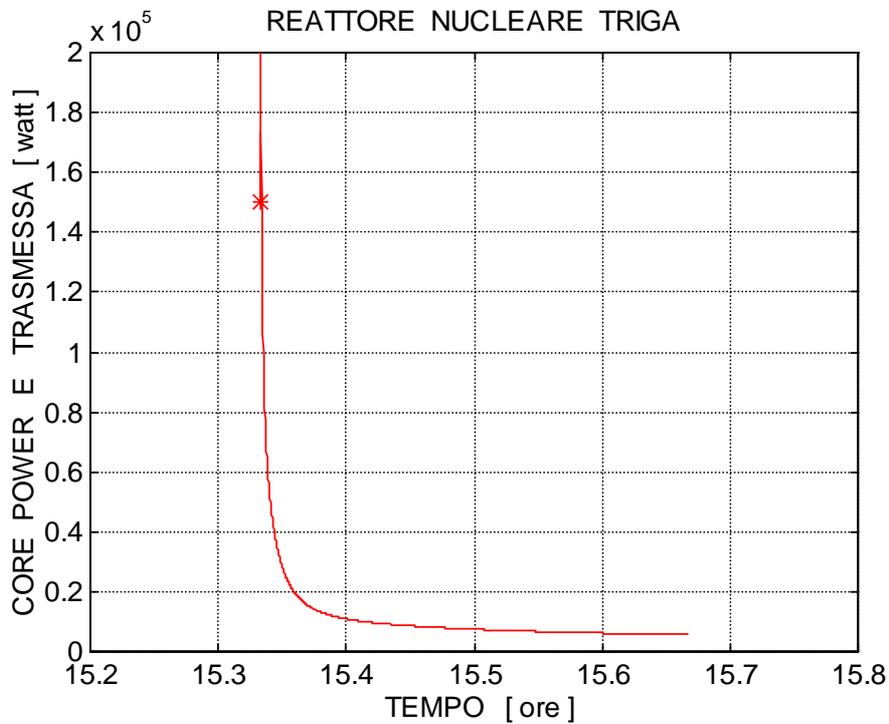


Figura 3-14 Particolare potenza decadimento dopo lo scram : Borst-Wheler

($\Delta t = 360-400 \text{ sec} \rightarrow T_{\text{stab.}} = 90 \text{ sec circa}$)

PROVA SPERIMENTALE 19-10-2010 CON SCRAM AUTOMATICO

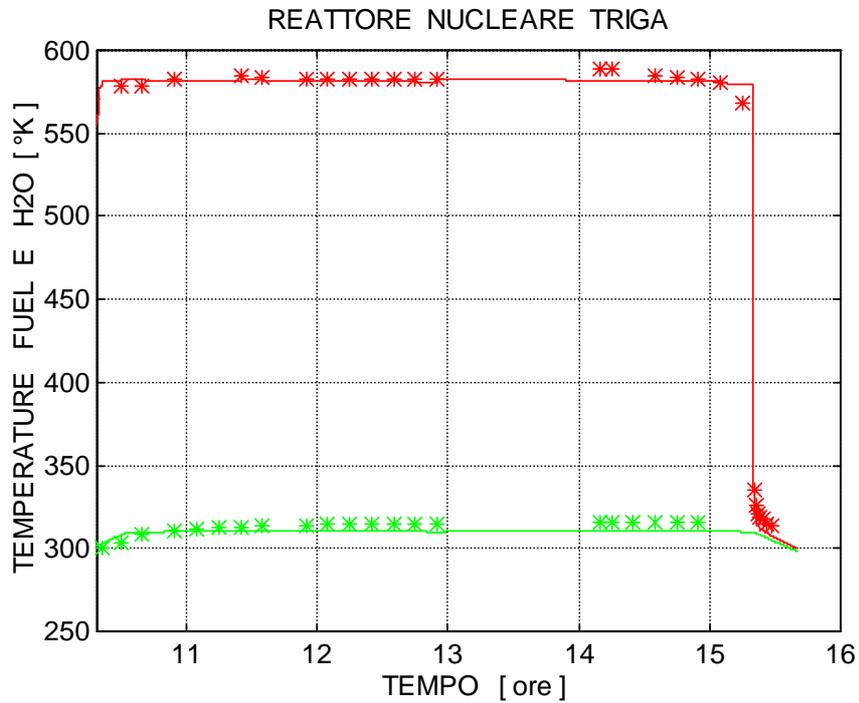


Figura 3-15 Temperature combustibile e acqua piscina

* = valori sperimentali

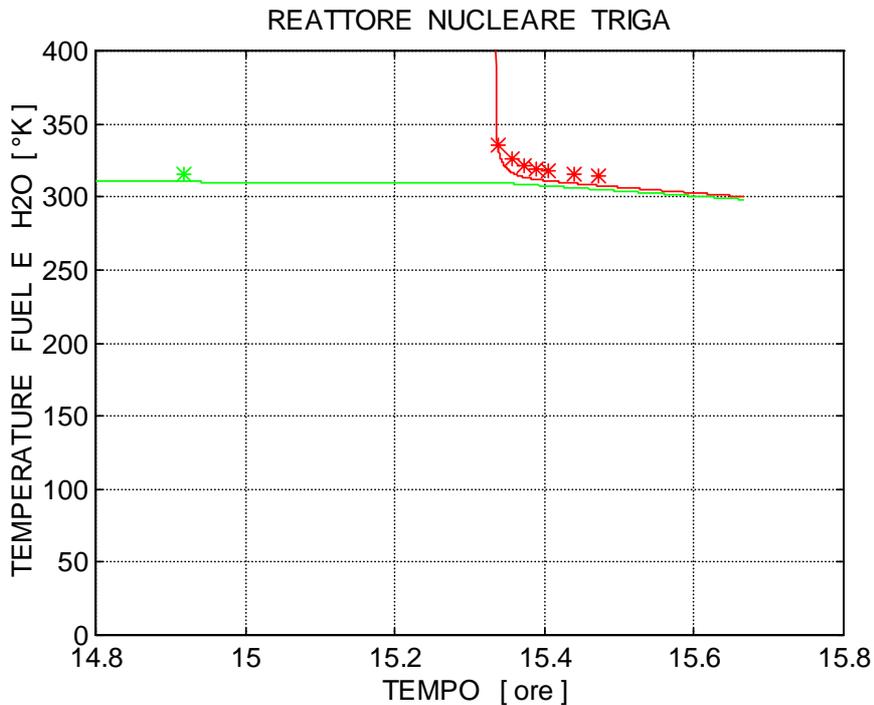


Figura 3-16 Particolare temperature combustibile e acqua dopo scram

* = valori sperimentali

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 39 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	--------------

3.3. Prove Sperimentali a Potenza di Perdita di Reattività per Avvelenamento da Xenon

Sono state condotte due settimane di prove con il reattore Triga alla potenza di 1 MWt nell'anno 2003. La perdita di reattività dovuta allo Xenon (formantesi con l'irraggiamento), che si manifesta con un abbassamento del livello di potenza, viene compensata mediante l'estrazione in più step della barra di controllo.

3.3.1. Prove da 7 a 11 Luglio 2003

Nel paragrafo vengono riportate tutte le variabili significative della simulazione del primo giorno (7 luglio) di funzionamento del reattore : potenza, posizioni della barra shim2 modulante, reattività dello xenon, temperature del combustibile e dell'acqua di raffreddamento. Per i giorni successivi vengono presentati soltanto i grafici della reattività dello xenon.

Il modello del Triga, portato alla potenza di 1 MWt, viene lasciato girare per un tempo pari alla durata della prova (7 ore), estraendo di tanto in tanto l'unica barra di controllo (shim2), rimasta inserita nel nocciolo, con le modalità sperimentali (tempi e quote) della **tabella n. 3.2** .

I dati sperimentali (potenza, temperature e reattività xenon), presenti nella tabella n.3.2, sono stati sovrapposti ai dati simulati dal modello ottenendo un buon accordo, come si può vedere nelle **figure 3.18, 3.19, 3.20, 3.21** . Infine i grafici delle **fig. 1, 2, 3, 4, 5** che si riferiscono all'intera settimana di prove, sono stati ottenuti facendo girare il modello (restart) anche nei periodi in cui il reattore è stato spento. Infatti in quegli intervalli di tempo si formano i picchi di xenon (in seguito all'azzeramento del termine di scomparsa dello Xe legato al flusso neutronico nella cinetica del modello), che decadono non totalmente e manifestano la loro influenza il giorno successivo in fase di avviamento del reattore.

Anche in questo caso si è avuto un buon accordo con i dati sperimentali.

PROVA SPERIMENTALE
 eseguita dal 7-7-2003 al 11-7-2003

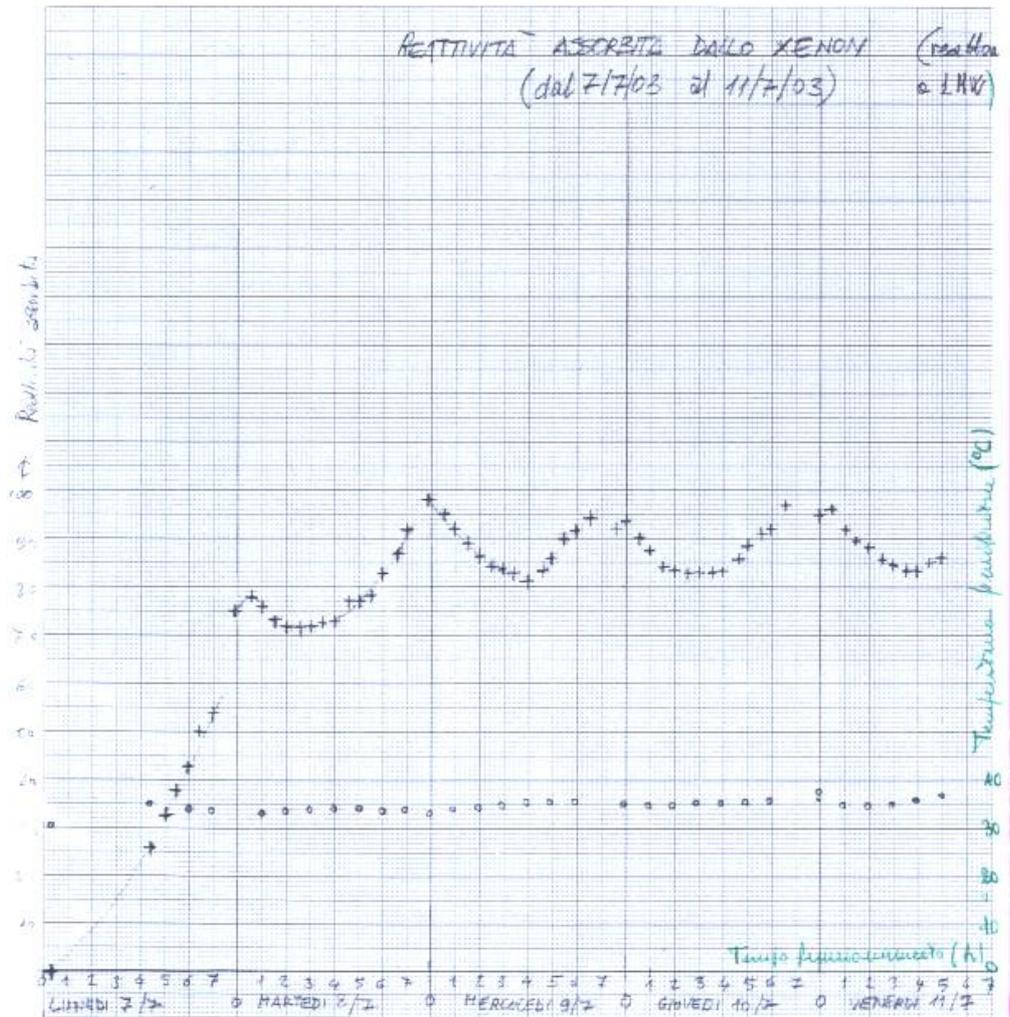


Figura 3-17 Grafico sperimentale della reattività assorbita dallo Xenon dal 7 al 11 luglio 2003 del reattore TRIGA

PROVA SPERIMENTALE 7-7-2003 : PERDITA DI REATTIVITA' PER XENON

MISURE DI XENON

Potenza J.H.W

Giorno	Ora	Sic.	Shim 1	Shim 2	Reg.	Reatt.	T. pur.
7/7/03	08.15	SU	SJ	515.4	SJ	0	30.9
	→ 13.35	"	"	553.1	SJ	25.6	35.3
	14.00	"	"	563.0	"	32	35.0
	14.30	"	"	572.9	"	38	34.9
	15.00	"	"	583.4	"	43	34.5
	15.30	"	"	584.7	"	50	34.3
	16.00	"	"	605.1	"	54	34.3
8/7/03	08.53	4u	4u	651.6	4u	75	35.5
	09.25	"	"	657.6	"	78	33.4
	10.00	"	"	653.0	"	76	33.5
	10.30	"	"	646.0	"	73	33.8
	11.00	"	"	641.5	"	72	34.1
	11.30	"	"	641.4	"	72	34.2
	12.00	"	"	641.5	"	72	34.3
	12.30	"	"	644.5	"	72	34.5
	13.00	"	"	646.6	"	73	34.7
	13.30	"	"	654.1	"	75	34.9
	14.00	"	"	656.0	"	75	34.8
	14.30	"	"	663.6	"	78.5	34.4
	15.00	"	"	669.5	"	82	34.0
	15.30	"	"	680.6	"	87.5	33.8
16.00	"	"	697.0	"	92	34.1	
9/7/03	9.05	"	"	717	"	98	32.8
	9.30	"	"	711	"	95	33.7
	10.00	"	"	696.1	"	92	34.2
	10.30	"	"	683.8	"	89	34.5
	11.00	"	"	676.2	"	86	34.6
	11.30	"	"	672.2	"	84	34.7
	12.00	"	"	671.6	"	83.5	35.3
	12.30	"	"	670.5	"	82	35.8
	13.00	"	"	665.4	"	81	36.1
	13.30	"	"	670.4	"	83	36.2
	14.00	"	"	678.1	"	84.5	36.2
	14.30	"	"	683.7	"	90	36.0
	15.00	"	"	693.9	"	91.5	36.0
	15.30	"	"	705.2	"	94	36.0

PROVA SPERIMENTALE 7-7-2003 : PERDITA DI REATTIVITA' PER XENON

CONTINUAZIONE TABELLA

MISURE DI XENON

Potenza

Giorno	Ora	Sic.	Shim 1	Shim 2	Reg.	Reatt.	T. pur.
10/7/03	0838	su	su	698	su	92,5	35,3
	9.00	u	u	706,6	u	93,5	35,9
	9.30	u	u	689,0	u	90	35,6
	10.00	u	u	680,8	u	87,5	35,0
	10.30	u	u	676,3	u	84	34,9
	11.00	u	u	672,8	u	83,5	35
	11:30	u	u	669	u	83	35,2
	12:00	u	u	669	u	83	35,7
	12:30	u	u	668,8	u	83	35,8
	13.00	u	u	670,8	u	83,5	35,6
	13.30	u	u	670,2	u	86	35,7
	14.00	u	u	686,6	u	88,5	35,8
	14.30	u	u	692,3	u	91	36,0
	15.00	u	u	698,4	u	92	36,0
	15.30	u	u	714,8	u	97	35,9
11/7/03	0900	su	su	708,1	su	95	38,0
	09.30			711,8		96	34,6
	10.00			696,8		92	34,9
	10.30			687,1		89,5	34,9
	11.00			683,1		88	34,7
	11:30			678		85,5	34,9
	12.00			674,5		84,5	35,2
	12:30			672,8		83,5	36,4
	13.00			672,7		83,5	36,8
	13.30			675,8		85	34,2
	14.00			677,6		86	37,2

Tabella 3-2 Valori relativi allo Xenon

PROVA SPERIMENTALE 7-7-2003 : PERDITA DI REATTIVITA' PER XENON

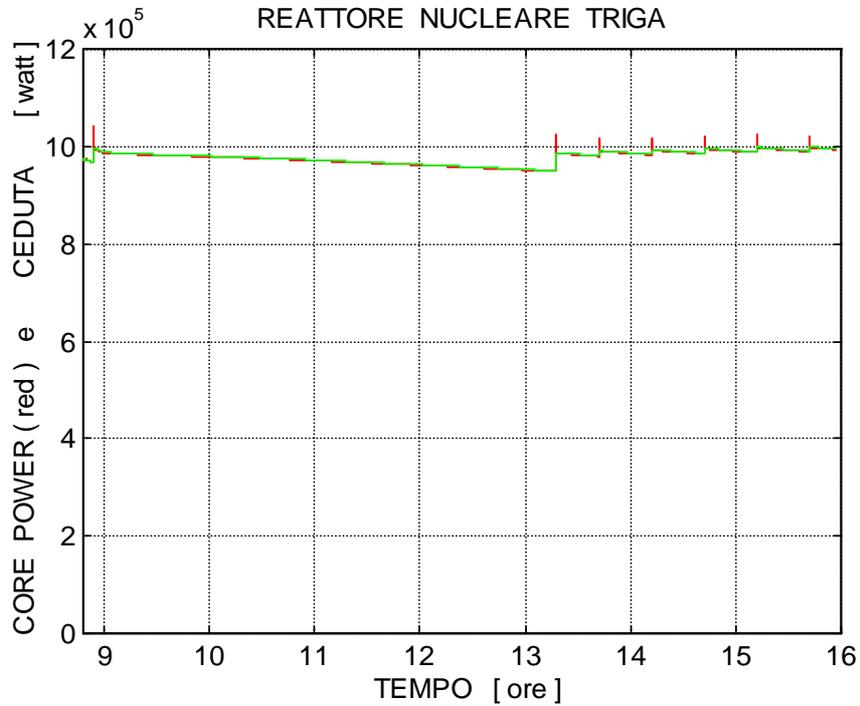


Figura 3-18 Potenze prodotta e ceduta h2o : Triga alla potenza di 1 MW

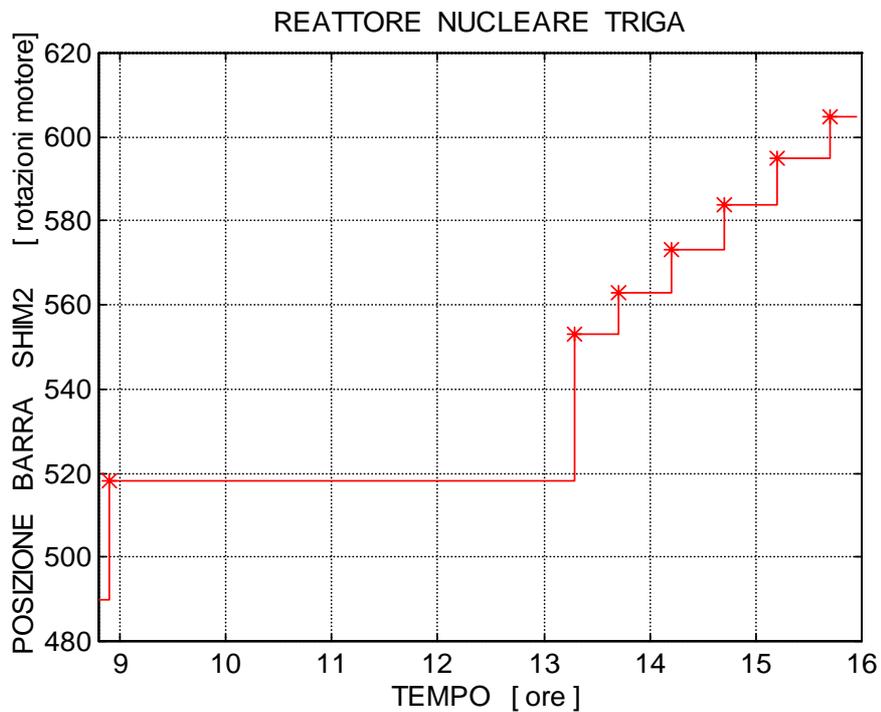


Figura 3-19 Posizioni barra controllo Shim2 : estratte le altre barre

PROVA SPERIMENTALE 7-7-2003 : PERDITA DI REATTIVITA' PER XENON

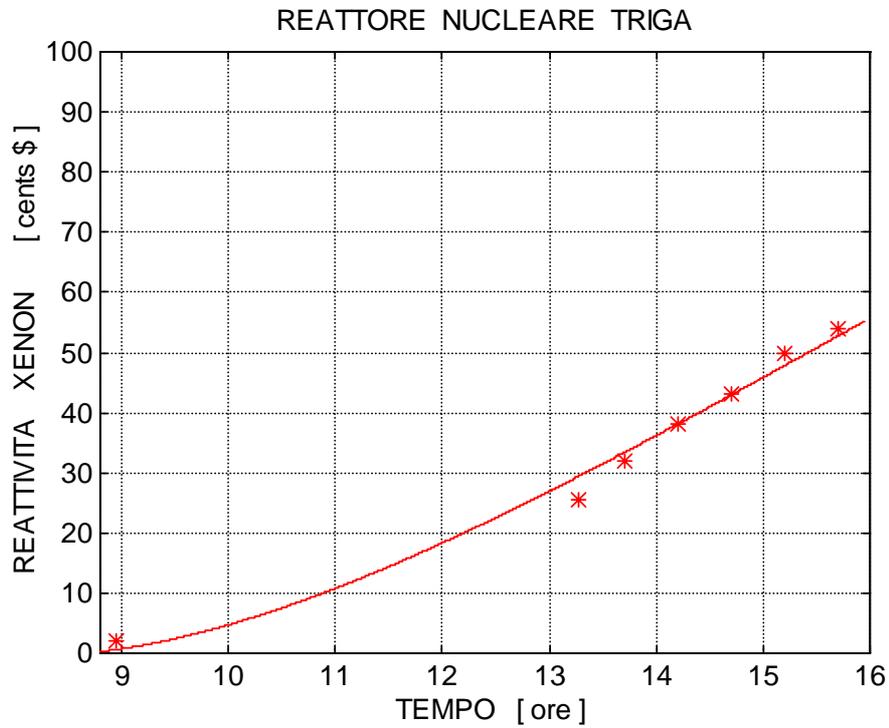


Figura 3-20 La reattività dello Xenon

* = sperimentale

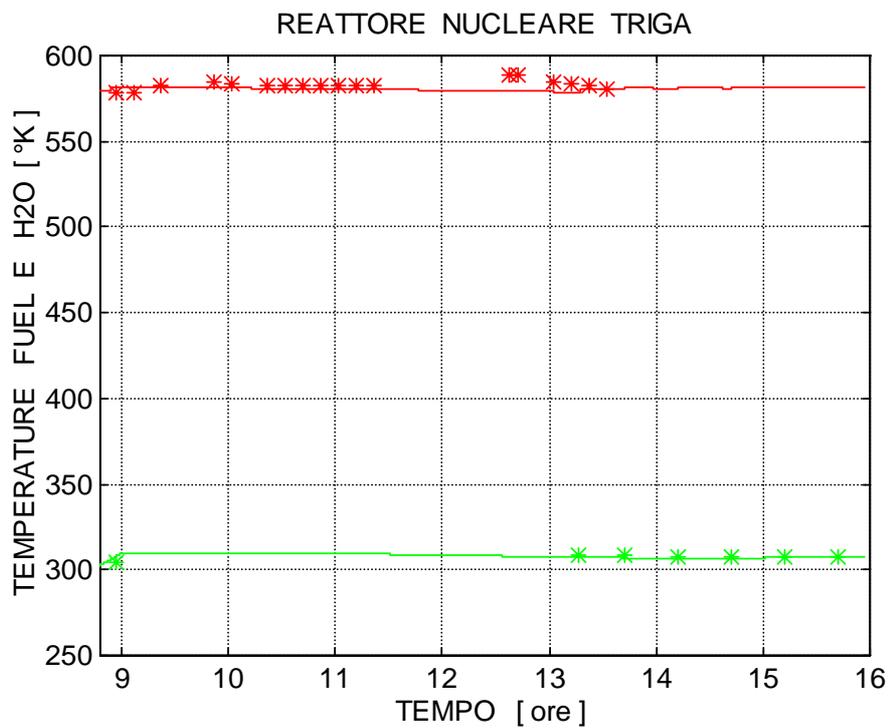


Figura 3-21 Temperature fuel e h2o pozzo

SIMULAZIONE PROVE SPERIMENTALI dal 7/7/03 al 11/7/03 :
PERDITA DI REATTIVITA' PER XENON

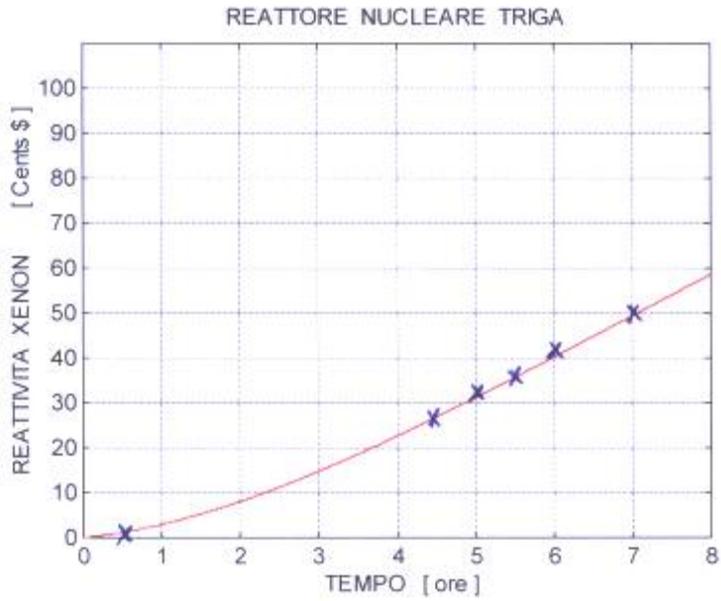


Fig. 1 Reattività Xenon : Lunedì 7/7/03

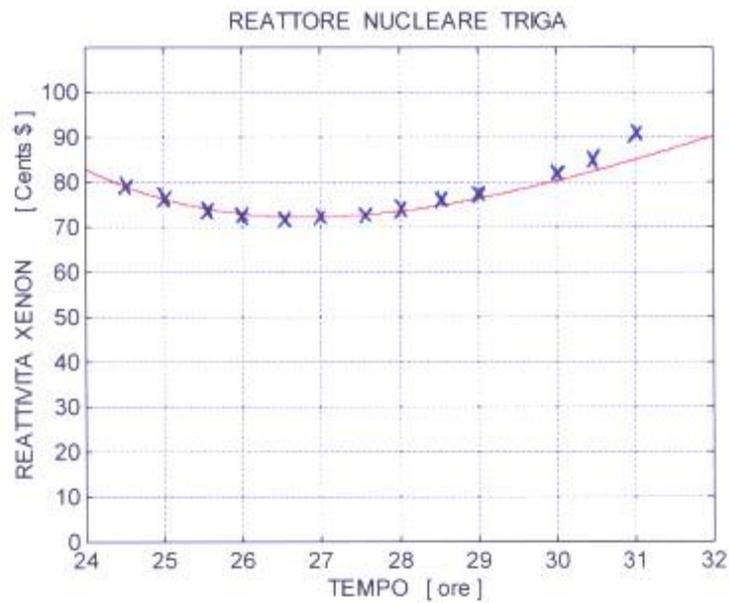


Fig. 2 Reattività Xenon : Martedì 8/7/03

PERDITA DI REATTIVITA' PER XENON

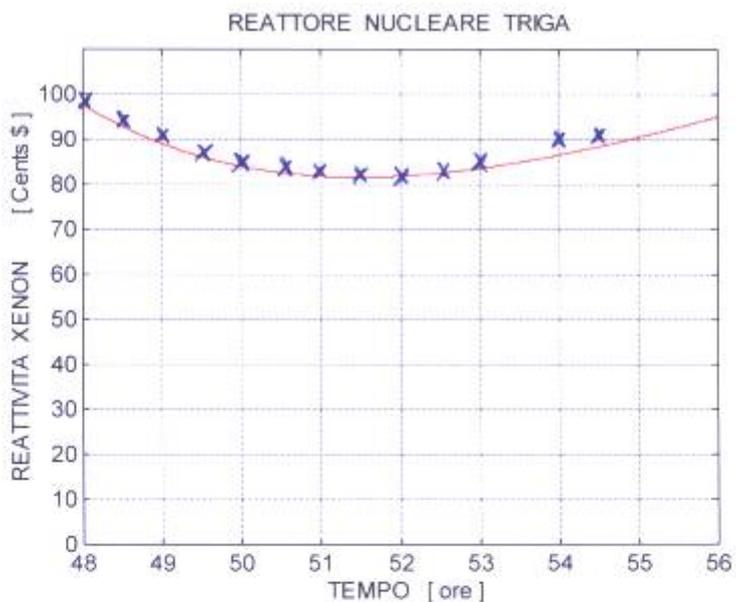


Fig. 3 Reattività Xenon : Mercoledì 9/7/03

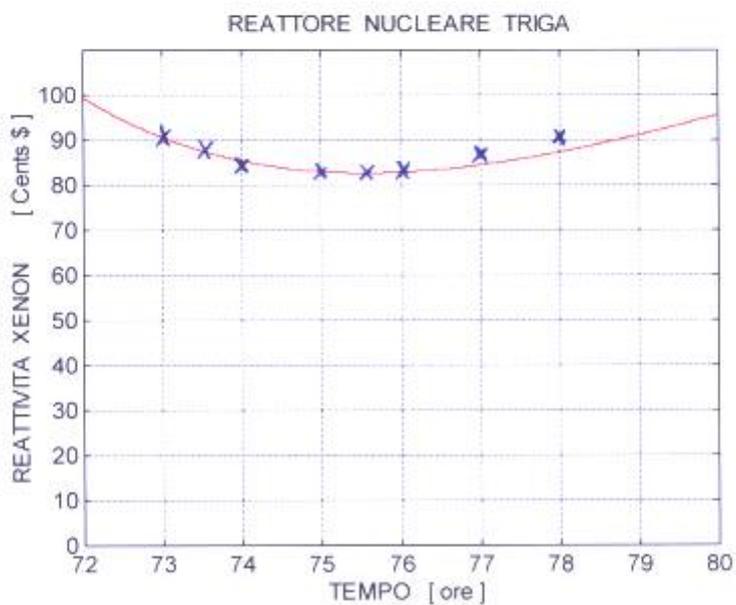


Fig. 4 Reattività Xenon : Giovedì 10/7/03

PERDITA DI REATTIVITA' PER XENON

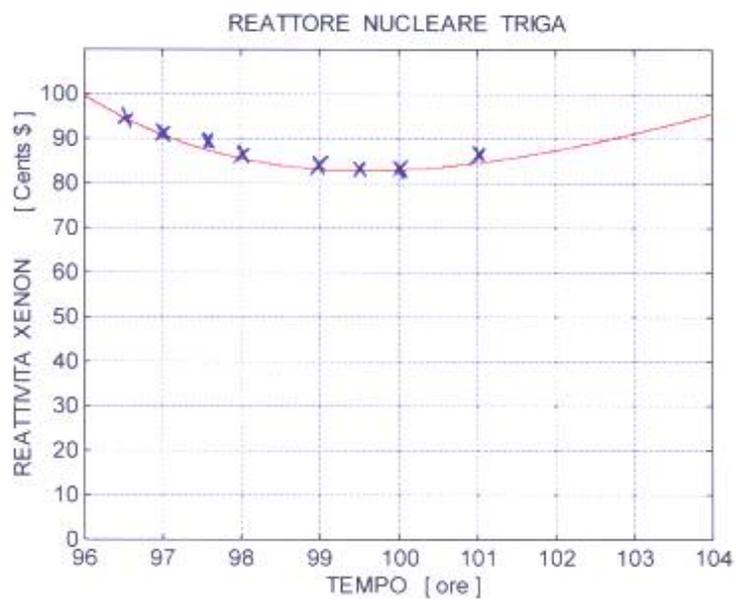


Fig. 5 Reattività Xenon : Venerdì 11/7/03

3.3.2. Prove da 1 a 4 Luglio 2003

Analogamente a quanto detto per le prove descritte nel paragrafo 3.3.1, si riportano i dati sperimentali della potenza, delle temperature e della reattività dello xenon, presenti nella **tabella n. 3.3**, sovrapposti ai dati simulati dal modello nelle **figure 3.23, 3.24, 3.25** del primo giorno di prova della settimana (1 luglio 2003). Nei giorni successivi vengono riportati i dati della sola reattività assorbita dallo xenon nelle **fig. 1, 2, 3, 4**, . Anche in questo caso si sono ottenuti dei buoni risultati .

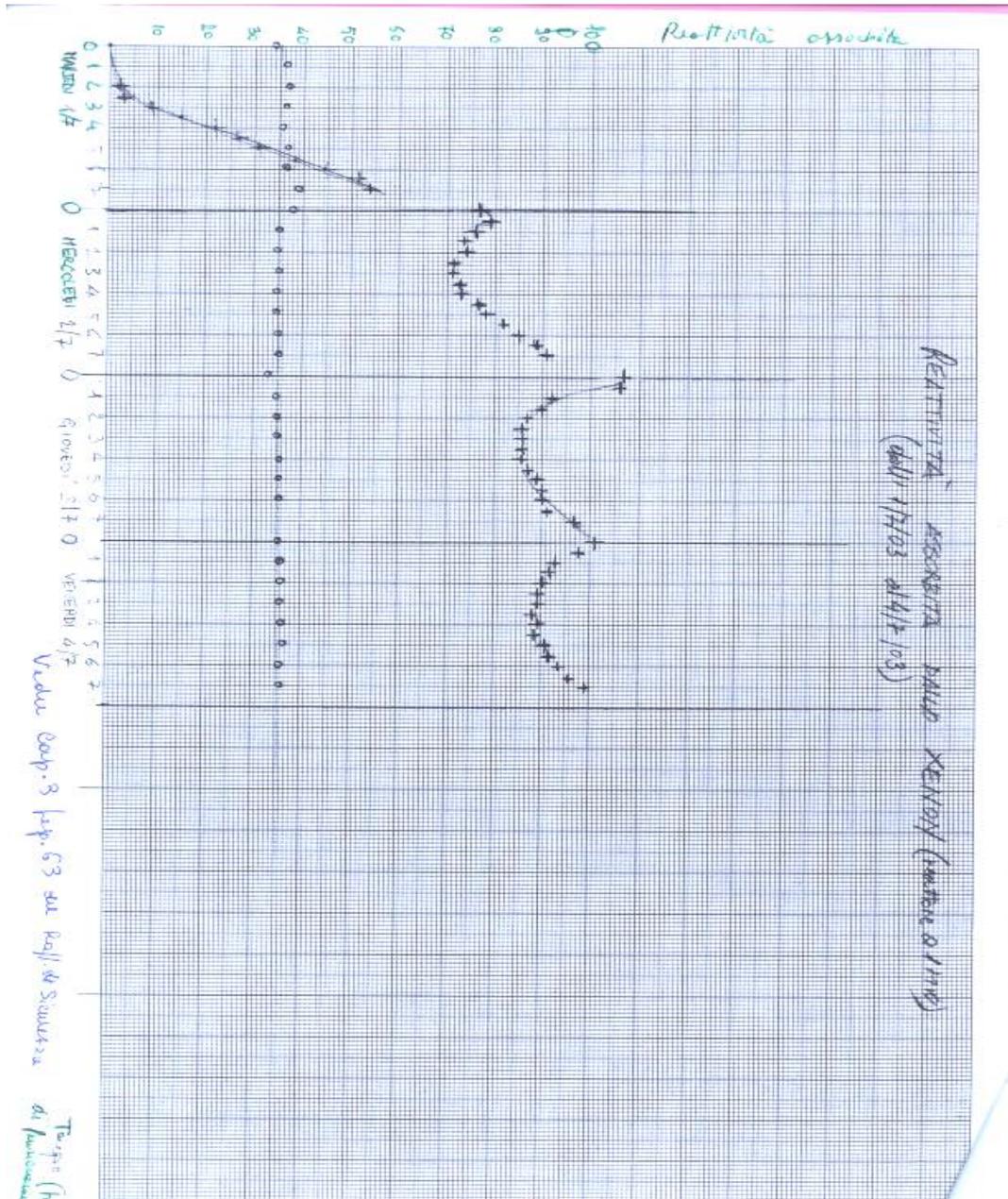


Figura 3-22 Grafico sperimentale della reattività assorbita dallo xenon dal 1 al 4 luglio 2003 del reattore TRIGA

PROVA SPERIMENTALE 1-7-2003 : PERDITA DI REATTIVITA' PER XENON

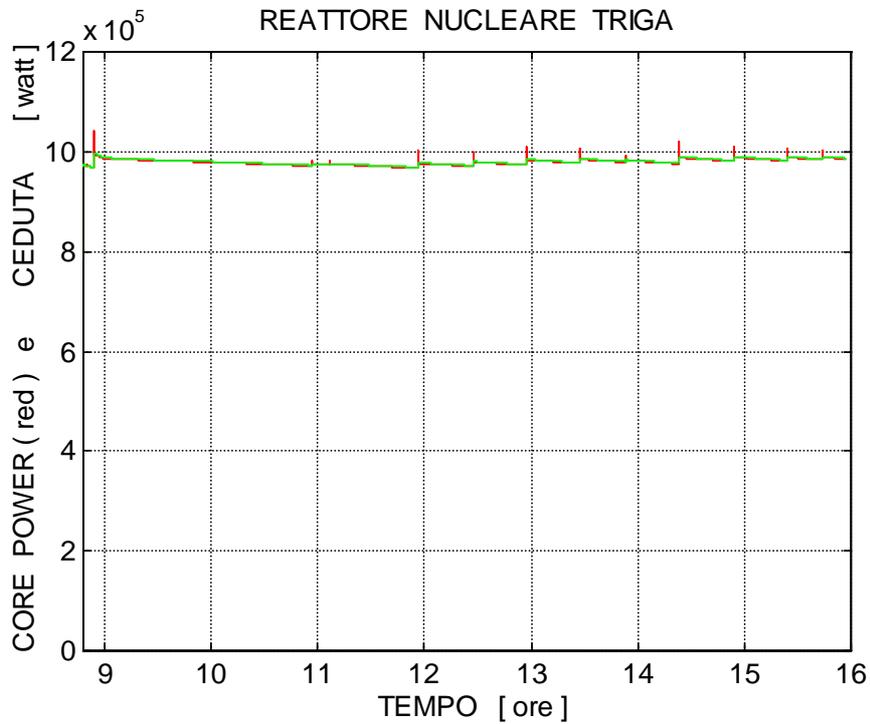


Figura 3-23 Potenze prodotta e ceduta h2o : Triga alla potenza di 1 MW

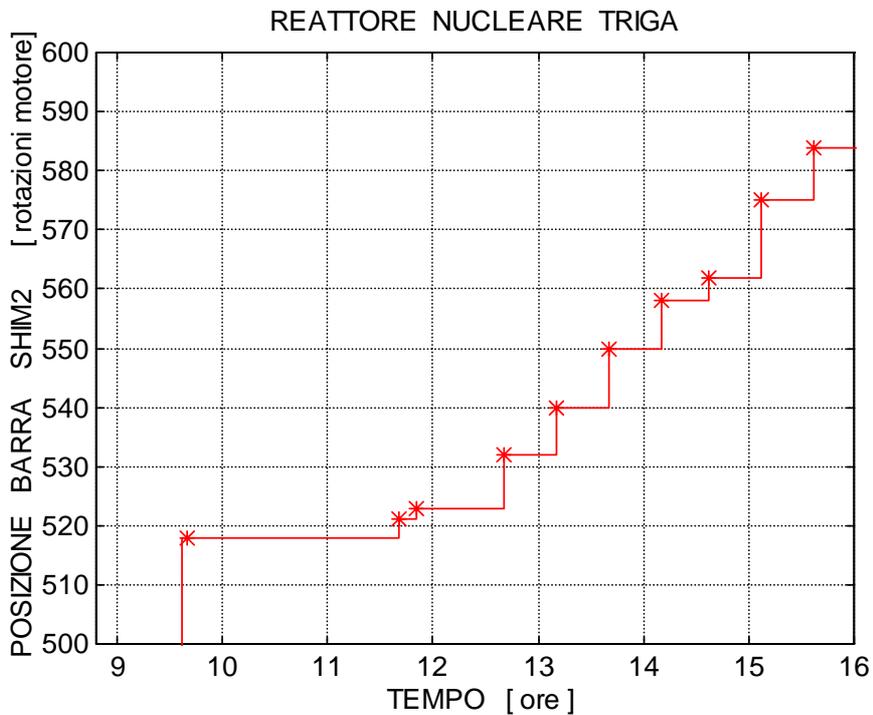


Figura 3-24 Posizioni barra Shim2 : estratte le altre barre .

* = sperimentale

PROVA SPERIMENTALE 1-7-2003 : PERDITA DI REATTIVITA' PER XENON

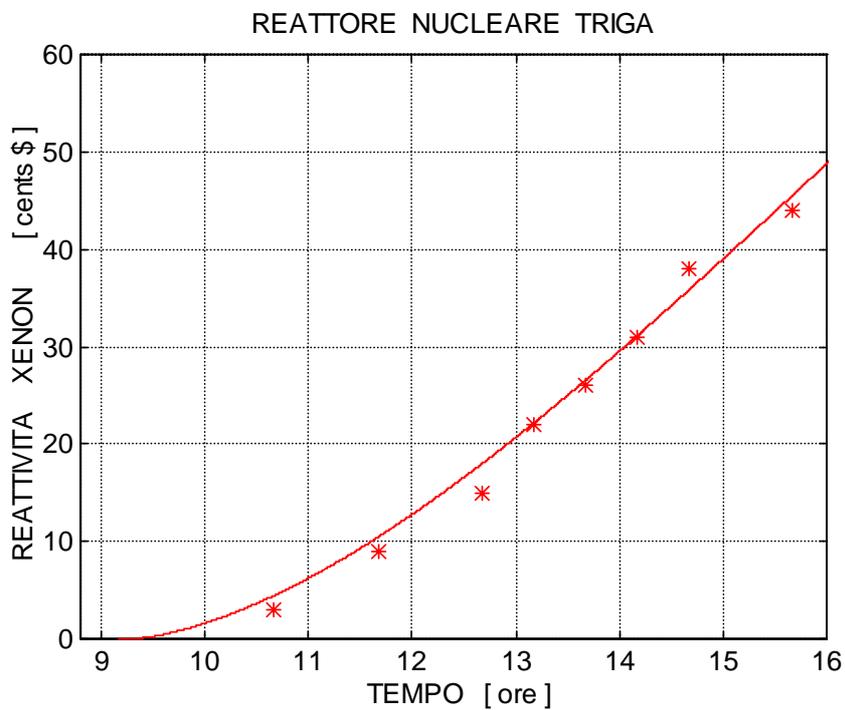


Figura 3-25 : La reattività dello Xenon

*** = sperimentale**

SIMULAZIONE PROVE SPERIMENTALI dal 1/7/03 al 4/7/03 :
PERDITA DI REATTIVITA' PER XENON

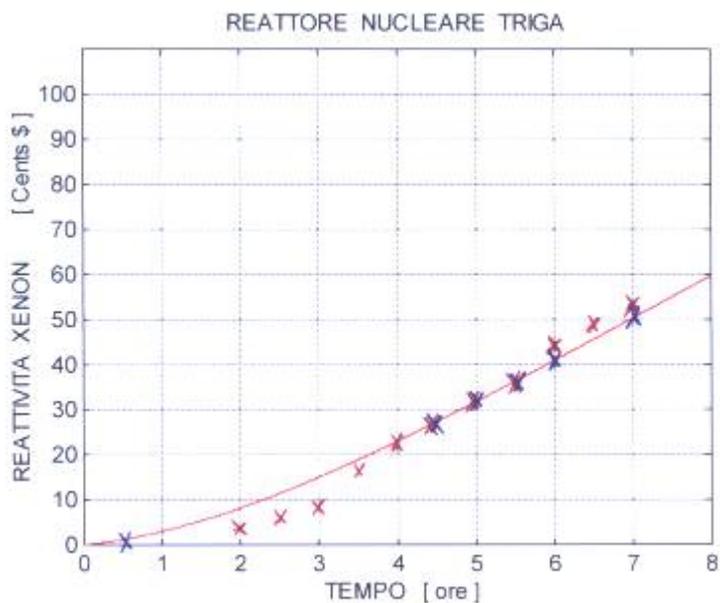


Fig. 1 Reattività Xenon : Martedì 1/7/03 e Lunedì 7/7/03 (blu)

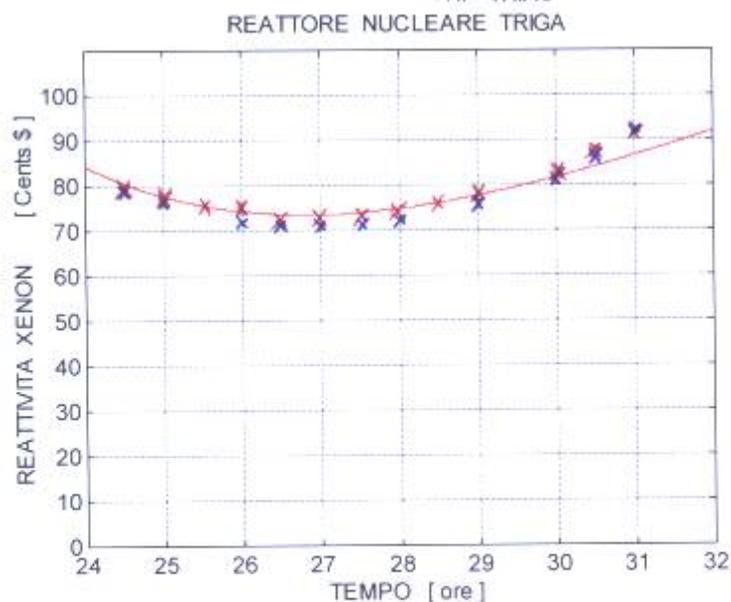


Fig. 2 Reattività Xenon : Mercoledì 2/7/03 e Martedì 8/7/03 (blu)

- * rosso = sperimentale dal 1/7 al 4/7/2003
- * blu = sperimentale dal 7/7 al 11/7/2003

PERDITA DI REATTIVITA' PER XENON

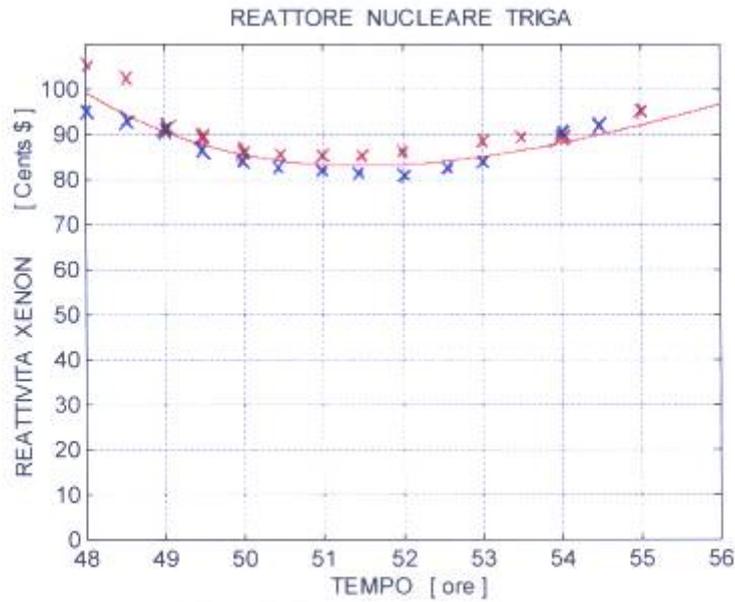


Fig. 3 Reattività Xenon : Giovedì 3/7/03 e Mercoledì 9/7/03 (blu)

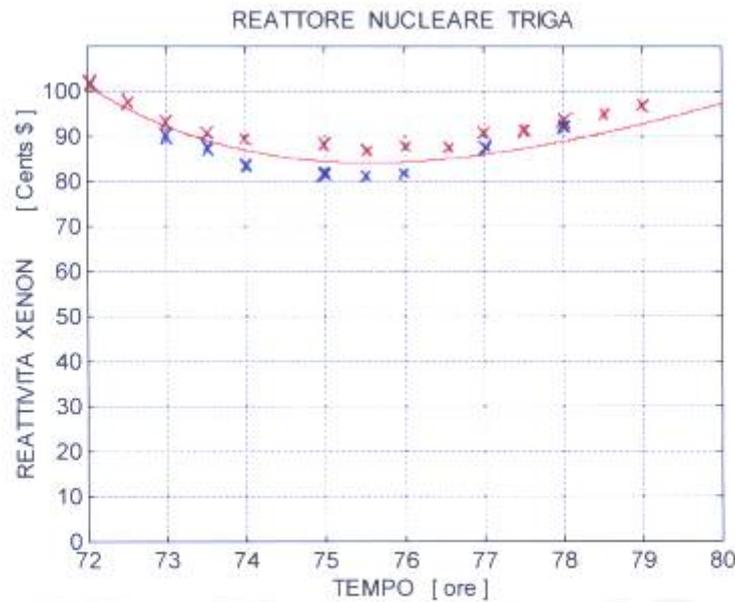


Fig. 4 Reattività Xenon : Venerdì 4/7/03 e Giovedì 10/7/03 (blu)

- * rosso = sperimentale dal 1/7 al 4/7/2003
- * blu = sperimentale dal 7/7 al 11/7/2003

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 54 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	--------------

3.4. Prove a Potenza zero (Regime Pulito) : Zona di Instabilità

Il reattore TRIGA-RC1 dell'ENEA alle basse potenze o come si dice in regime a potenza zero, non risente degli effetti di controreazione, per cui il sistema manifesta un funzionamento instabile in questo intervallo di potenza.

In particolare, sperimentalmente risulta :

- per Power \leq 100 watt non si avvertono gli Effetti di Retroazione :
→ Zona di Instabilità
- per Power $>$ 100 watt si iniziano ad avvertire gli Effetti di Retroazione
benefici

Le simulazioni che seguono vogliono dimostrare che il Modello del Triga presenta lo stesso comportamento del reattore.

A tale scopo sono state condotte due prime prove di simulazione, dette **20 watt** e **100 watt**, nelle quali il modello viene stabilizzato esclusivamente con le barre di controllo (reattività totale nulla), **fig. 3.26 e 3.27** . La difficoltà incontrata nel simulare queste manovre è imputabile alla assenza dei fenomeni di controreazione.

L'ultima simulazione, detta **400 watt**, in cui il modello viene lasciato in condizioni di leggera ipercriticità, rivela la presenza degli effetti di retroazione del combustibile oltre i 100 watt, **fig. 3.28** , come avviene sperimentalmente .

Infatti il modello del reattore aumenta di potenza raggiungendo molto lentamente (dopo 4 ore circa) la condizione stazionaria a cui corrisponde una reattività totale nulla.

REGIME A POTENZA ZERO

PROVA 1 : 20 watt
REATTORE NUCLEARE TRIGA

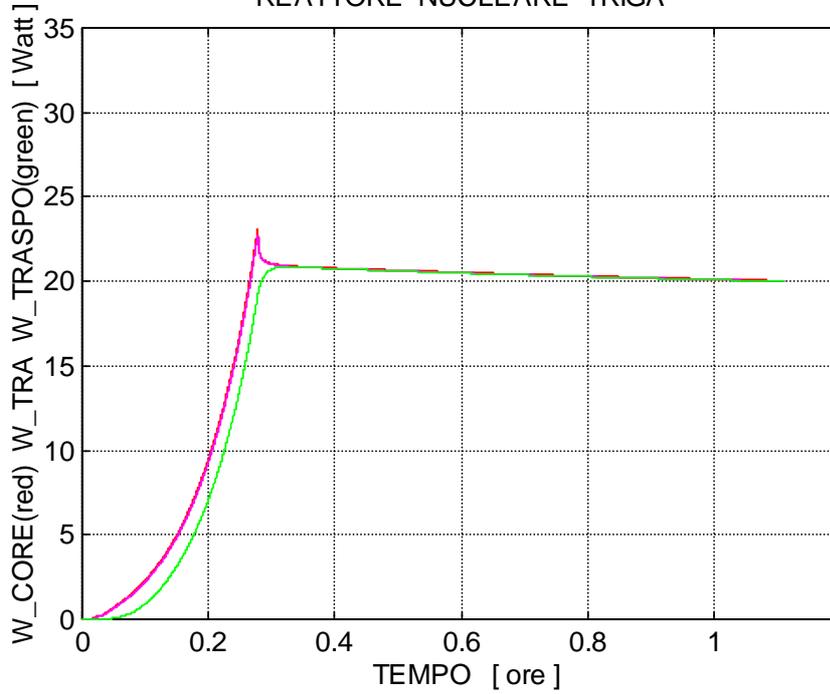


Figura 3-26 Le potenze del nocciolo

PROVA 2 : 100 watt
REATTORE NUCLEARE TRIGA

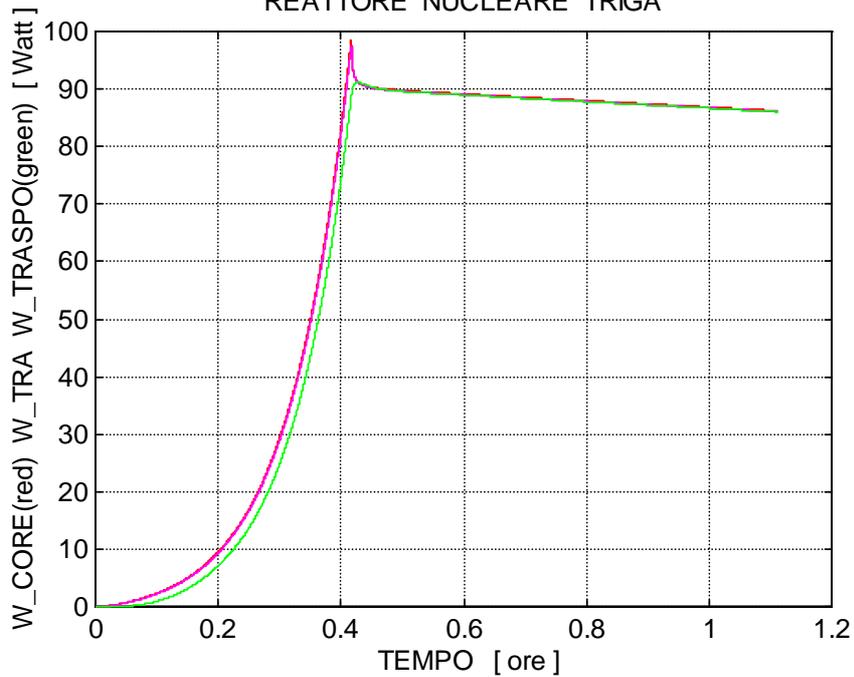


Figura 3-27 Le potenze del nocciolo

REGIME A POTENZA ZERO

PROVA 3 : 400 watt

REATTORE NUCLEARE TRIGA

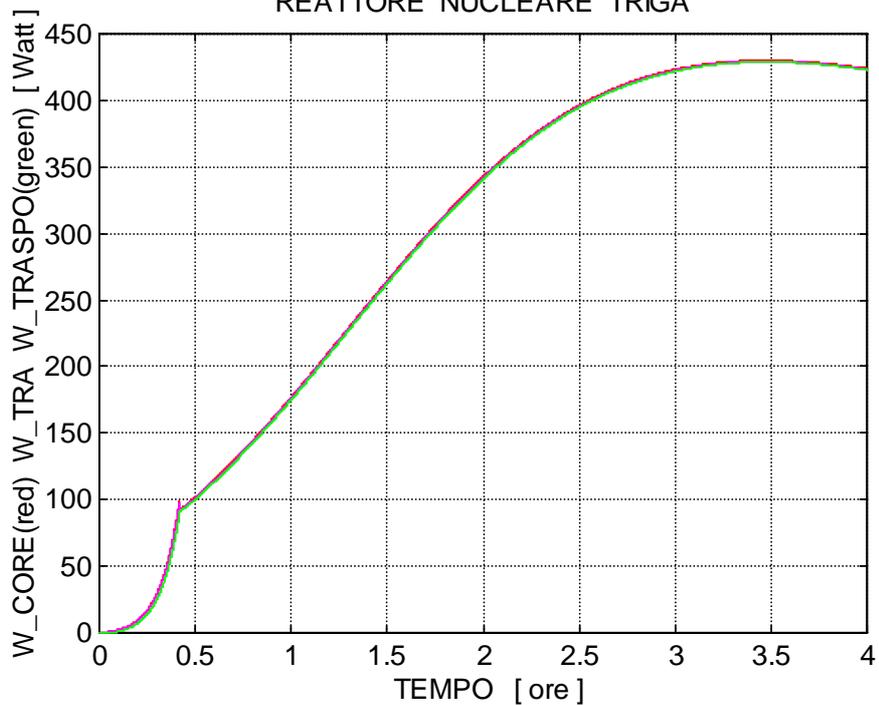


Figura 3-28 Le potenze del nocciolo

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 57 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	--------------

3.5. Salita a Potenza e Controllo della Reattività di Barra

Di particolare interesse è la regolazione della velocità con cui si muovono le barre di controllo, ovvero la velocità con cui si inserisce la reattività nel reattore.

Questa azione viene esercitata dal Sistema di Controllo che opera in simbiosi con il Sistema di Sicurezza del Triga, il quale interviene nei casi di anomalo funzionamento spegnendo il reattore rapidamente (scram).

Quando l'operatore aziona dalla consolle di esercizio le barre di controllo, per esempio le estrae, l'indicatore di potenza segnala una crescita della potenza. L'indicatore, di tipo lineare, è dotato di quindici scale di misura per poter seguire l'evoluzione del reattore in tutto l'intervallo di potenza e presenta un tempo di commutazione per ciascuna scala non inferiore a 50 sec. (non si può commutare prima dei 50 sec.) . Questo interblocco costituisce una sicurezza per il reattore. Infatti se la salita della potenza è veloce, come indicato qualitativamente dalla curva C1 della **fig. 3.29**, la curva incontrerà inesorabilmente il 90% del fondo scala (valore di scram) prima dei 50 sec, inserendo lo scram del reattore. Al contrario, se la salita è lenta, come rappresentato dalla curva C2 nella stessa figura, l'operatore può commutare scala comodamente dopo i 50 sec. senza inciampare nello scram .

E' evidente dunque la funzione del Sistema di Controllo.

A fronte di quanto detto, la simulazione di un transitorio di salita a potenza del reattore senza scram (NO intervento Sistema di Sicurezza) ha evidenziato il corretto funzionamento del modello del Sistema di Controllo. Infatti le curve della potenza, **fig. 3.30, 3.31, 3.32, 3.33** , aumentano regolarmente permettendo all'operatore di cambiare scala senza difficoltà dopo avere atteso il tempo di commutazione e prima del limite di scram.

In particolare si segnala che il reattore raggiunge la prima criticità nell'intervallo $0.4 < \text{power} < 0.8 \text{ watt}$ come riportato nel R.S.T. .

SALITA A POTENZA : CONTROLLO VELOCITA' BARRE

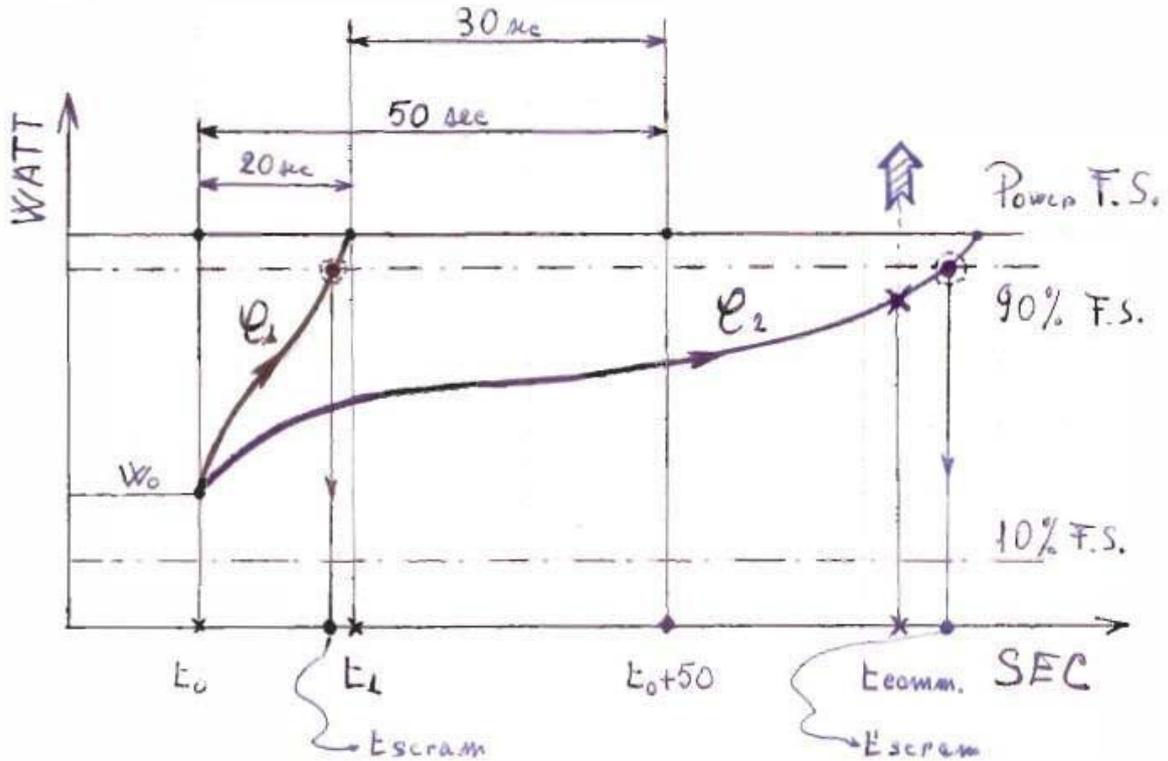


Figura 3-29 Indicatore di Potenza

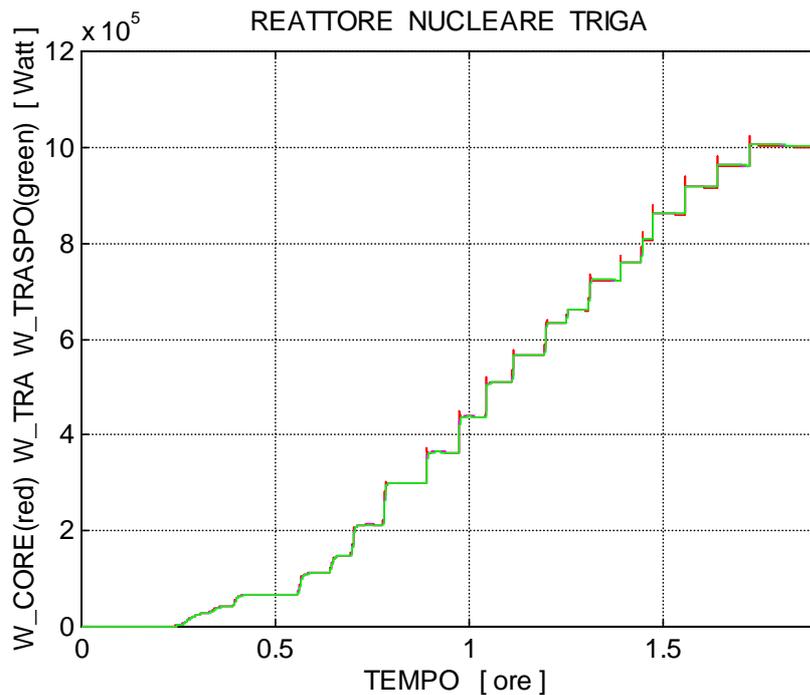


Figura 3-30 Salita a potenza

SALITA A POTENZA : CONTROLLO VELOCITA' BARRE

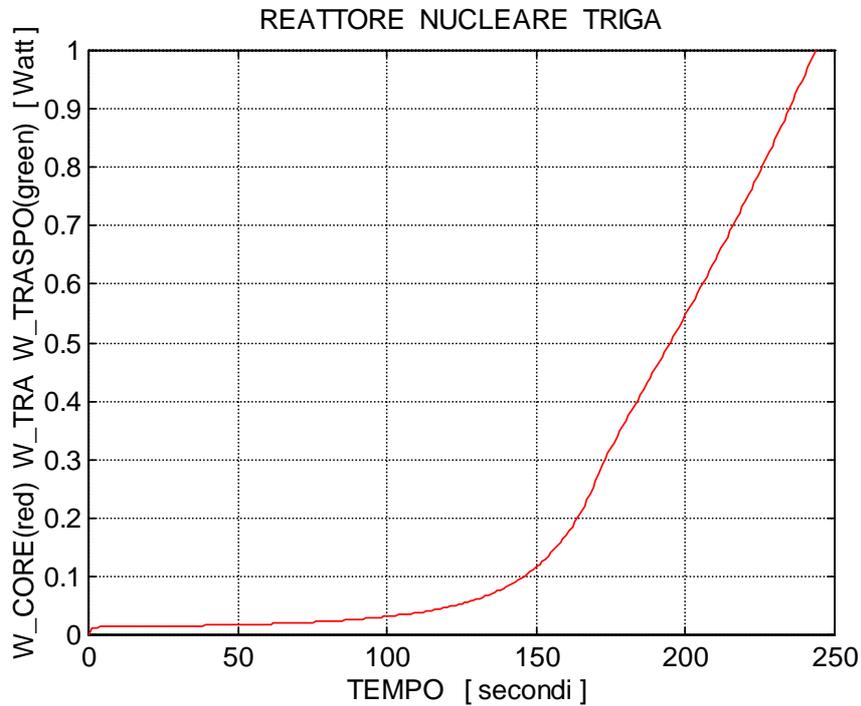


Figura 3-31 Particolare della salita a potenza . Scala 1 watt :

$t_{com} = 225 \text{ sec} \rightarrow W_{CORE}(225) = 0.8 < 0.9 \text{ watt}$
(R.S.T. : Prima criticità nell'intervallo 0.4 |--| 0.8 watt)

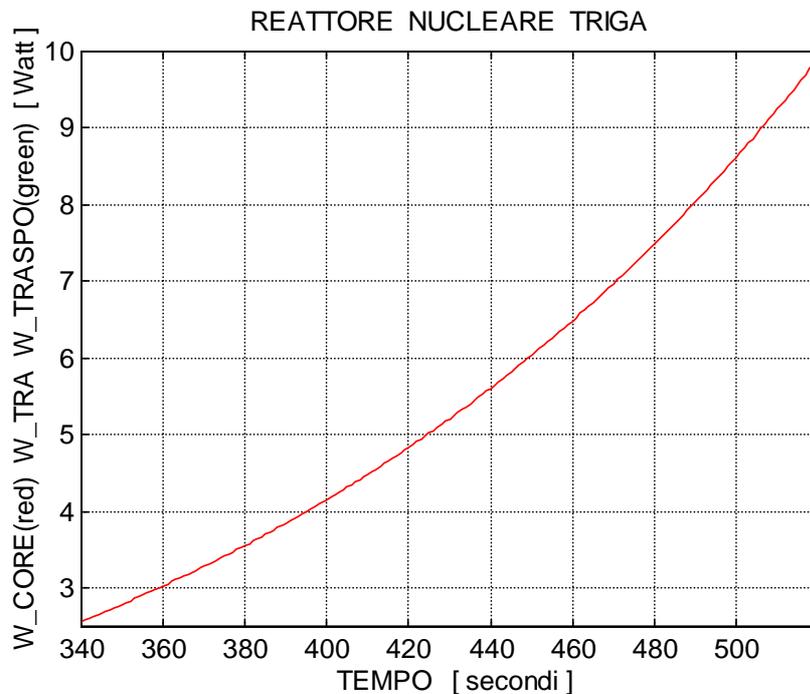


Figura 3-32 Particolare della salita a potenza . Scala 10 watt :

$t_{com} = 490 \text{ sec} \rightarrow W_{CORE}(490) = 8 < 9 \text{ watt}$

SALITA A POTENZA : CONTROLLO VELOCITA' BARRE

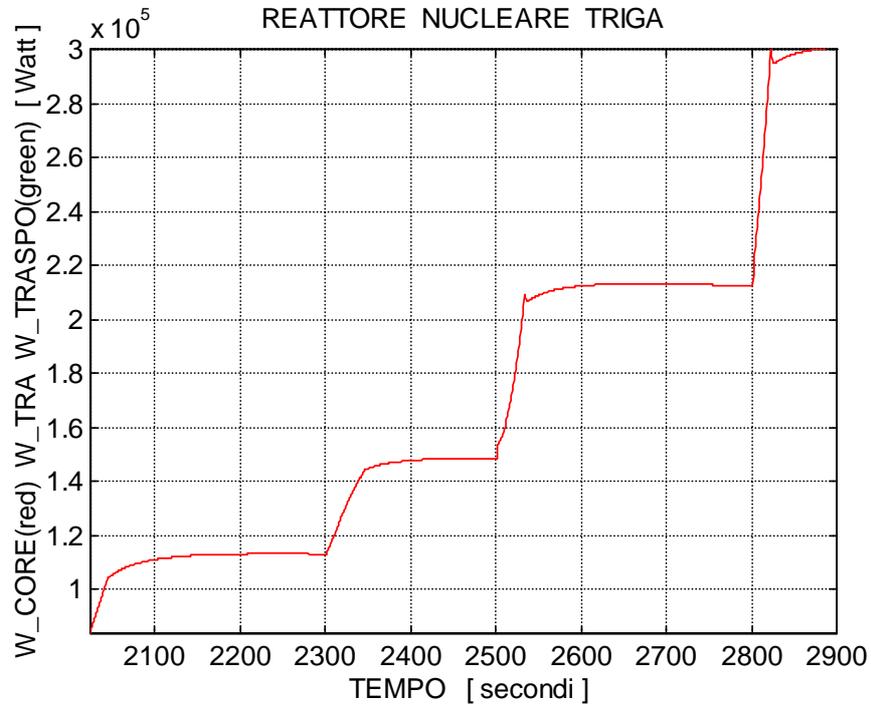


Figura 3-33 Particolare della salita a potenza . Scala 300 kW :

$t_{com} = 2815 \text{ sec} \rightarrow W_{CORE}(2815) = 260 < 270 \text{ kW}$

3.6. Calcolo del Periodo Stabile e confronto con i valori della curva In-hour del reattore Triga

L'obiettivo di queste prove è la misura del periodo stabile calcolato dal modello e il confronto con quello sperimentale della curva In-hour del reattore.

Operatività delle prove simulate :

Il modello del reattore viene prima stabilizzato a potenza zero per evitare gli effetti di retroazione e successivamente viene sollecitato con un gradino di reattività contenuto.

Il modello inizia allora a salire di potenza e dopo avere atteso un tempo sufficientemente lungo affinché gli esponenziali negativi della potenza si siano estinti, si legge il valore del periodo stabile. Questa lettura è comunque non esente da incertezza, perché è legata al tempo di attesa della lettura stessa e agli effetti di reattività, che seppur minimi e trascurabili sperimentalmente, vengono comunque calcolati dal modello, modificando il periodo stabile (-> periodo istantaneo).

Sono state effettuate sei prove con gradini di reattività compresi tra 5 e 20 cents \$, di cui l'ultima riguarda lo scram, **tabella n. 3.4** .

I punti reattività-periodo stabile simulati cadono tutti sulla curva In-hour del reattore Triga, come si può osservare dalla **fig. 3.34** .

Misura Periodo Stabile e confronto con curva
Inhour TRIGA-RC1 : reattore a Potenza Zero

N° prova	Reattività (% \$)	Power (watt)	Pstab_sper (sec)	Pistant (sec)	Pstab (sec)
1	20.55	1100	36	36.17	43.12
2	18.69	981	38	37.84	48.60
3	10.93	100 398	82	75.50 80.40	92.04
4	6.20	355 543	172	167.50 173	230.50
5	4.83	178 349 538	230	218 227.5 237.4	295.50
6 (*)	scram		- 80 (*)	- [95 - 85]	

(*) Prova sper. del 19-10-2011 con reattore a potenza e scram

Tabella 3-4 Misura del periodo stabile e confronto con la curva inhour

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 63 di 73
---	---------------------------	--	--------	----------	--------------

4. Espulsione barra di controllo con TRIGA a potenza per guasto all'apparato di movimentazione .

→

Il R.S.T. afferma che il reattore non raggiunge mai la pronta criticità per effetto della reazione Doppler

A fronte di quanto detto, vengono simulate due situazioni incidentali con gradino di 2 \$: reattore a potenza max e reattore a potenza zero.

Viene inoltre simulato il transitorio di espulsione della barra (punto 4) per verificare se il modello raggiunge la pronta criticità.

Inserzione gradino 2 \$ con reattore a potenza max di 1 MWt :

Il modello raggiunge il picco di potenza di 570 MWt in circa 20 msec e la corrispondente variazione istantanea della temperatura media del combustibile è di 170°C → 265°C Elemento Centrale (Fattore di Picco = 1.5)

Da R.S.T. : $P_{max} = 570 \text{ MWt}$ $DT = 270 \text{ °C}$ Elemento Centrale

Inserzione gradino 2 \$ con reattore a potenza zero:

Valore simulato : $P_{max} = 500 \text{ MWt}$ circa **da R.S.T.** : $P_{max} = 500 \text{ MWt}$

Transitorio di espulsione barra

Il modello non raggiunge la pronta criticità : reattività max = 75 cents \$ < 1 \$

INCIDENTE DI REATTIVITA'

Reattore a potenza di 1 MW ← gradino reattività = 200 cents \$

RUN2 : Fuchs ($\tau=10^{-6}$ e $\tau_{\text{one}} = 10^{-3}$ sec)

FUCHS : barre [--- red]

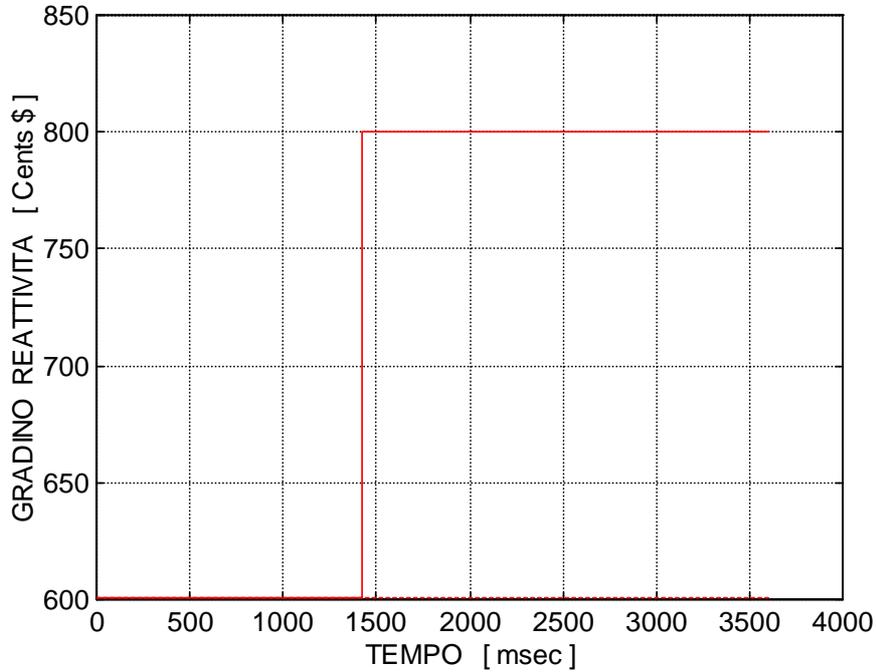


Figura 3-35 Il gradino di reattività : caduta provino

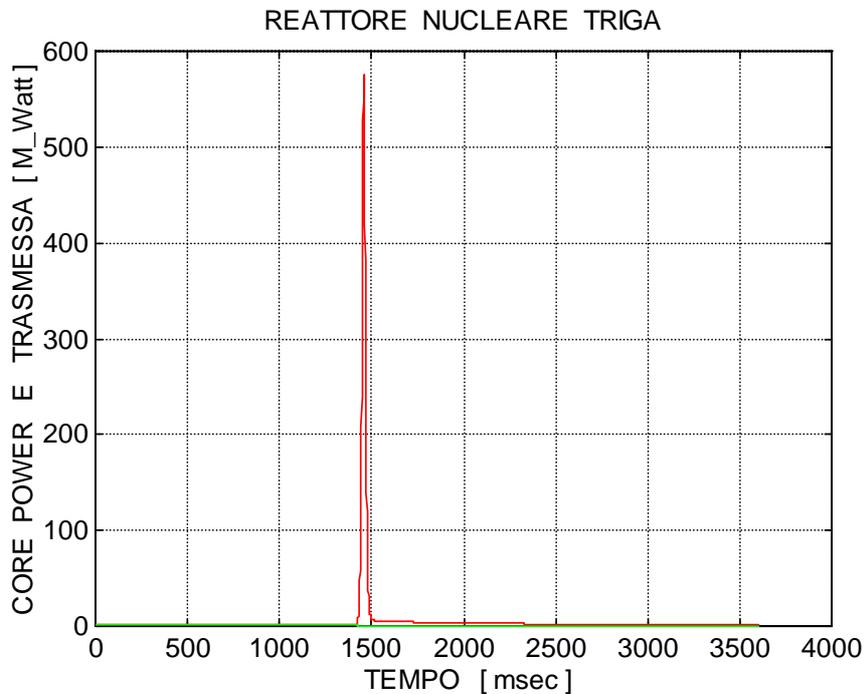


Figura 3-36 Risposta del reattore nel dominio del tempo

(da R.S.T. : $P_{\text{max}} = 570$ MW)

INCIDENTE DI REATTIVITA'
RUN2 : Fuchs

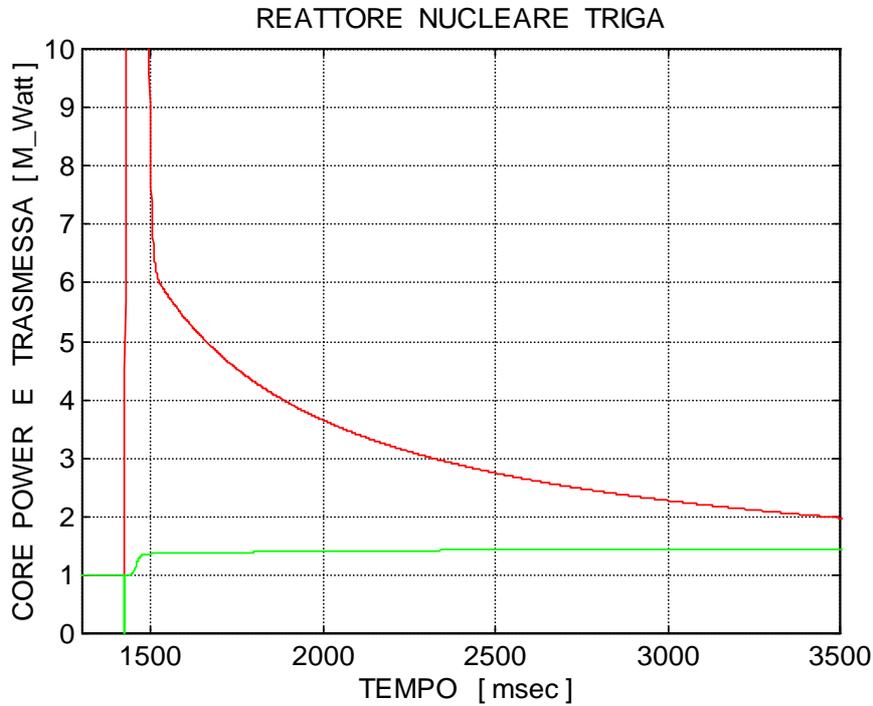


Figura 3-37 Tipica coda dei neutroni ritardati (rosso)

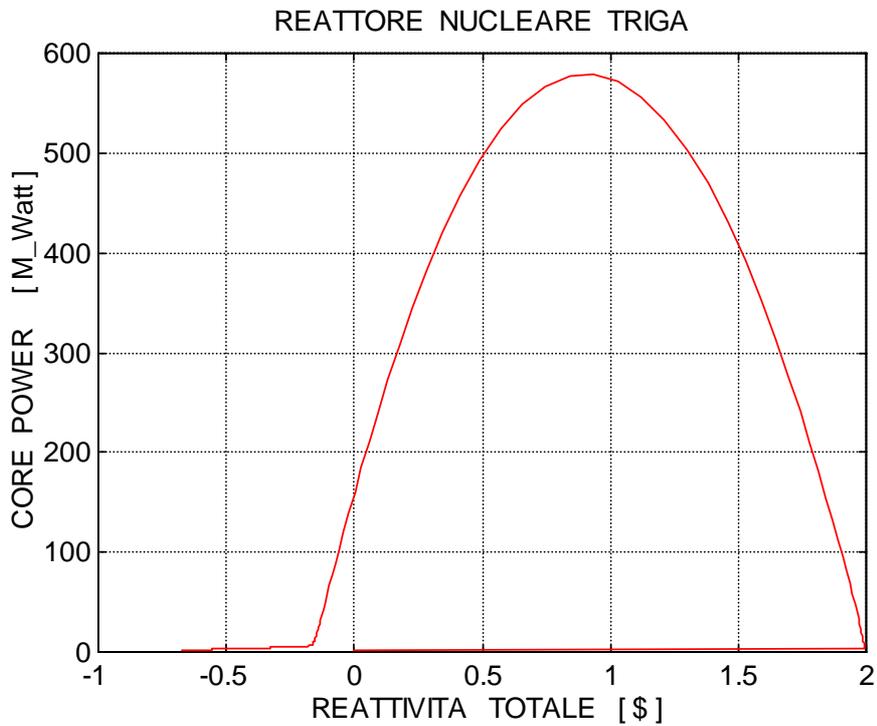


Figura 3-38 Risposta del reattore nel piano delle fasi potenza-reattività

INCIDENTE DI REATTIVITA'

RUN2 : Fuchs

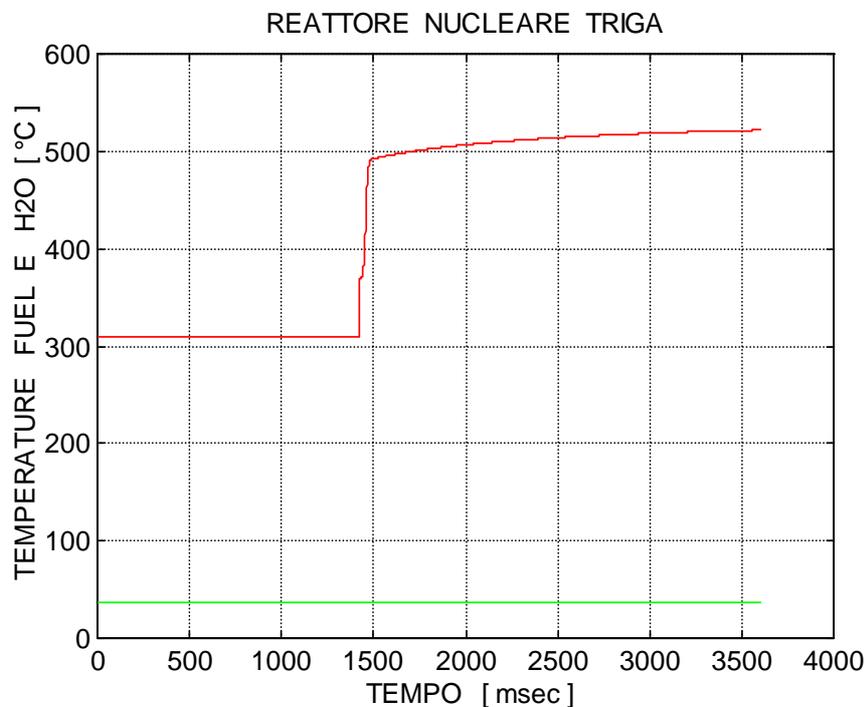


Figura 3-39 Variazione istantanea temperatura media combustibile : 170 °C

R.S.T. : $DT = 270\text{ °C}$ Elemento Centrale (Fattore di Picco = 1.5)
 $T_{media,max} = 520\text{ °C}$
Elemento più caldo : $T_{c,max} = 1.5 \times (520 + 273) = 1189.5\text{ °K} = 916.5\text{ °C}$

INCIDENTE DI REATTIVITA'

Reattore a potenza zero : 15 watt ← gradino reattività = 200 cents \$
RUN2 : Fuchs ($\tau=10^{-6}$ e $\tau_{\text{one}} = 10^{-3}$ sec)

REATTORE NUCLEARE TRIGA

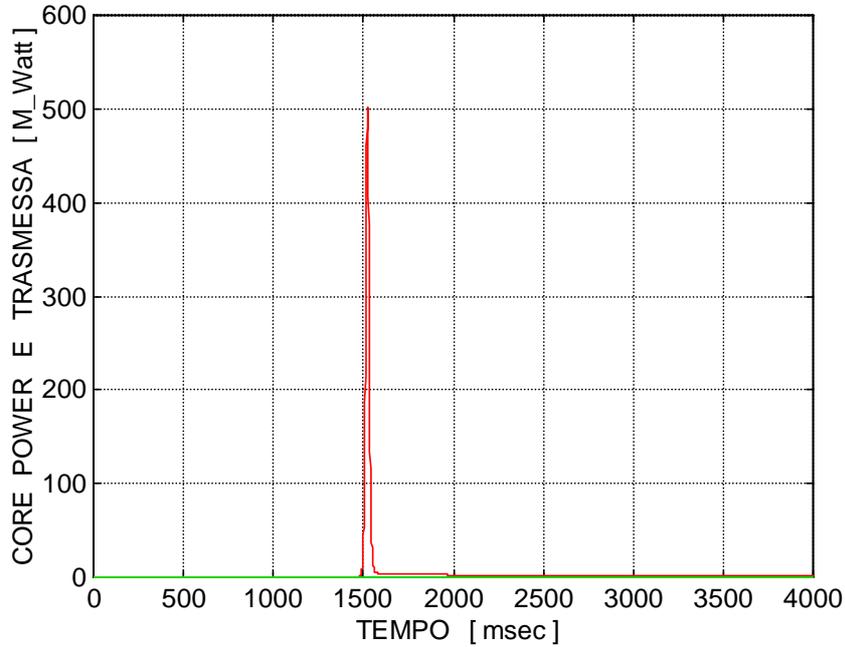


Figura 3-40 Risposta del reattore nel dominio del tempo

(**R.S.T.** : $P_{\text{max}} = 500$ MW circa)

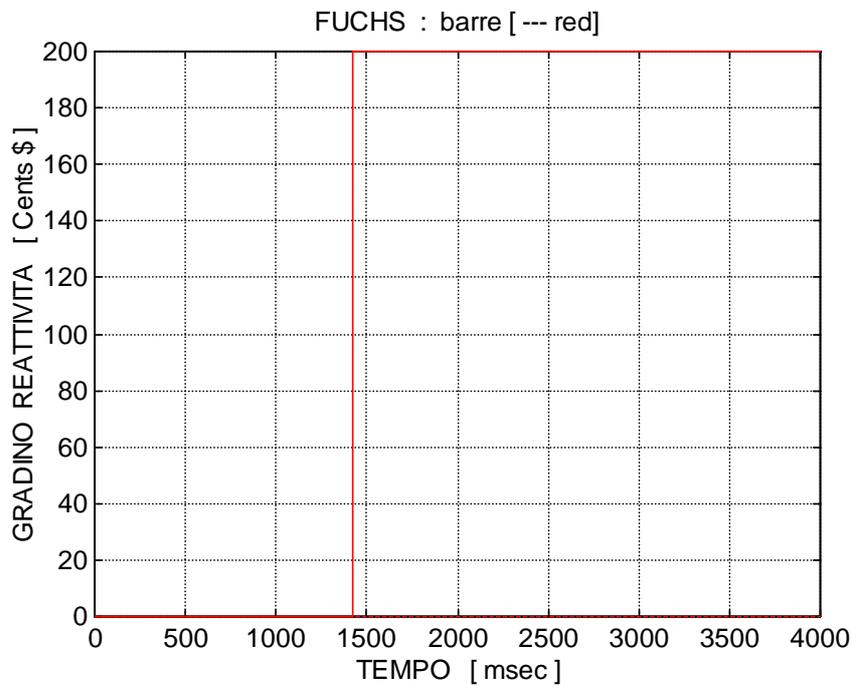


Figura 3-41 Il gradino di reattività

INCIDENTE DI ESTRAZIONE DELLA BARRA

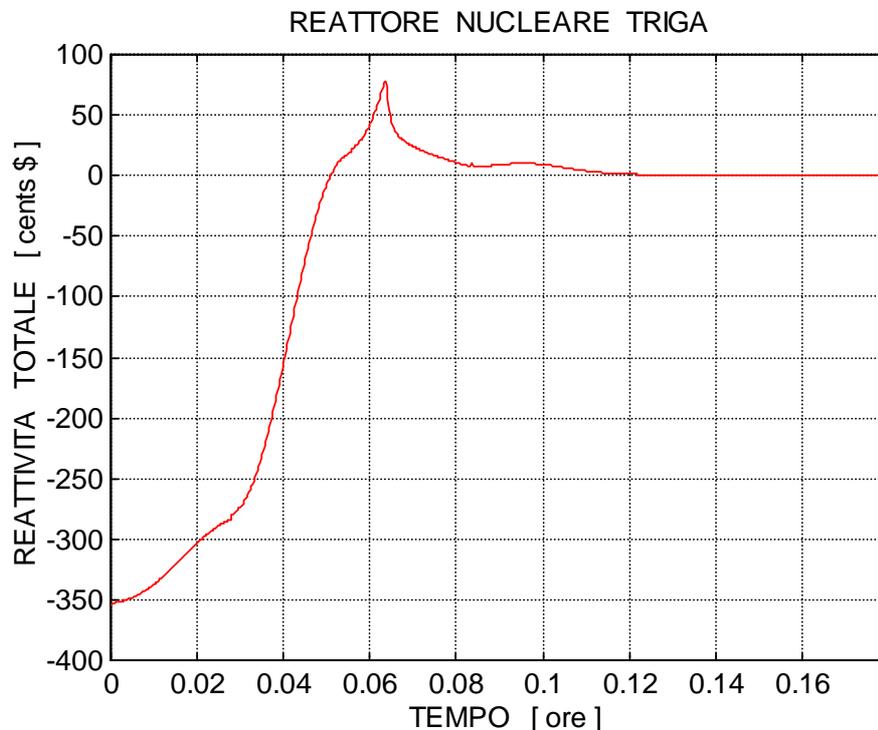


Figura 3-42 La reattività totale : vengono estratte tutte le barre alla max velocità consentita

3.7.2. Incidente di Perdita del Refrigerante : Svuotamento Istantaneo della Piscina (General Atomic)

Viene simulato il transitorio di Svuotamento Istantaneo della Piscina, secondo la General Atomic, del Rapporto di Sicurezza del Triga.

In R.S.T. si suppone che il reattore abbia funzionato per lunghissimo tempo .

Lo svuotamento istantaneo della piscina equivale a uno scram del reattore e il calore di decadimento, dovuto ai raggi gamma e beta, viene asportato dal flusso di aria che investe il nocciolo caldo. Occorre verificare se l'innalzamento della temperatura del nocciolo provochi la fusione degli elementi di combustibile.

Secondo **R.S.T.** : T_{max} Elemento Centrale = 780 °C

Il modello calcola una $T_{media,max} = 440^{\circ}C$ del nocciolo a cui corrisponde una T_{max} Elemento Centrale = 796 °C avendo adoperato nella stima il Fattore di Picco = 1.5 . Si vedano le **Fig. 3.43** e **3.44** .

SVUOTAMENTO Istantaneo PISCINA (General Atomic)

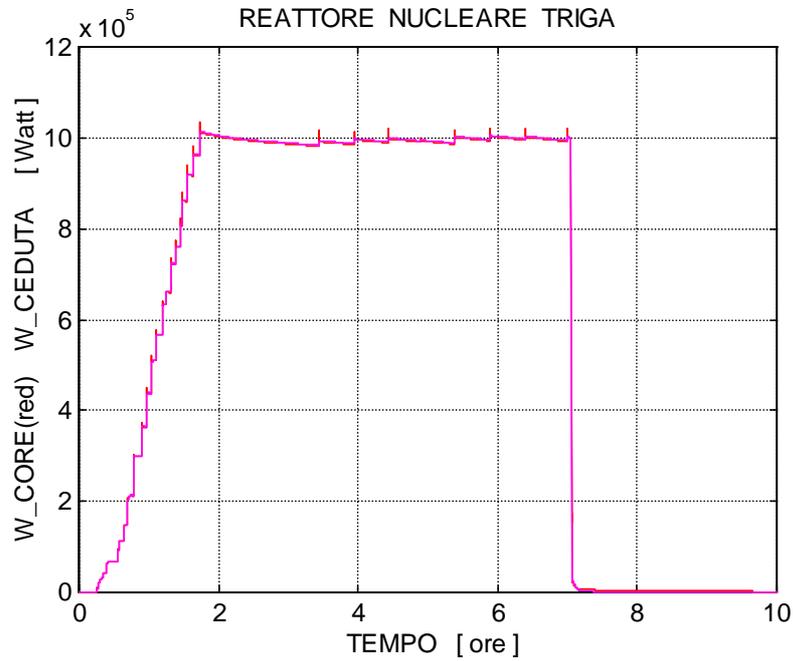


Figura 3-43 Potenze nocciolo

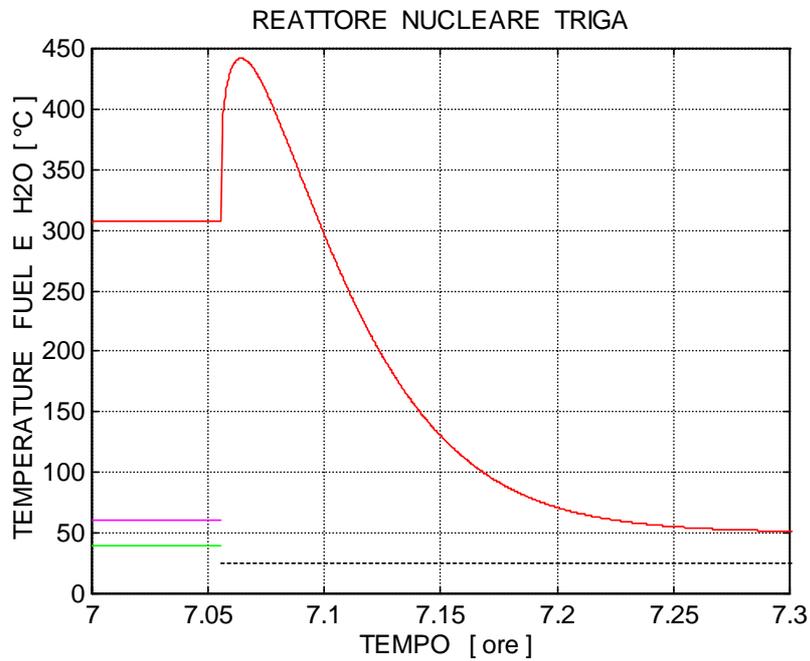


Figura 3-44 Temperatura combustibile dopo svuotamento : scambio termico con aria

$T_{media,max} = 440 \text{ } ^\circ\text{C}$ nocciolo

$T_{c,max} = 1.5 \times (440 + 273) = 1069 \text{ } ^\circ\text{K} = 796 \text{ } ^\circ\text{C}$ Fattore Picco = 1.5

R.S.T. : $T_{c,max} = 780 \text{ } ^\circ\text{C}$

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 70 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	--------------

3.8. Stabilità del Combustibile

Le prove incidentali di reattività e di perdita del refrigerante, miranti a verificare l'incolumità delle barre di combustibile, hanno dimostrato quanto segue dal punto di vista meccanico e nucleare .

Meccanica : sollecitazioni termiche

La Temperatura max raggiunta dalla barra più calda è stata di 850 °C circa

1. General Atomic afferma di avere sottoposto le barette a un processo termico ciclico con $T_{max} = 1000 \text{ °C}$ senza osservare rigonfiamenti, che avrebbero indotto nelle guaine forti sollecitazioni
2. Il diagramma di fase dell'Idruro di Zirconio per $H/Zr = 1.7$ assicura che non sono presenti cambiamenti di fase per temperatura, **fig. 3.45** .

(=> variazioni di volume)

Nucleare : produzione di idrogeno

La potenziale produzione di idrogeno nelle barrette risulta da calcoli (General Atomic) trascurabile rispetto all'idrogeno presente sotto forma di idruro

=> Coefficiente Doppler non viene influenzato

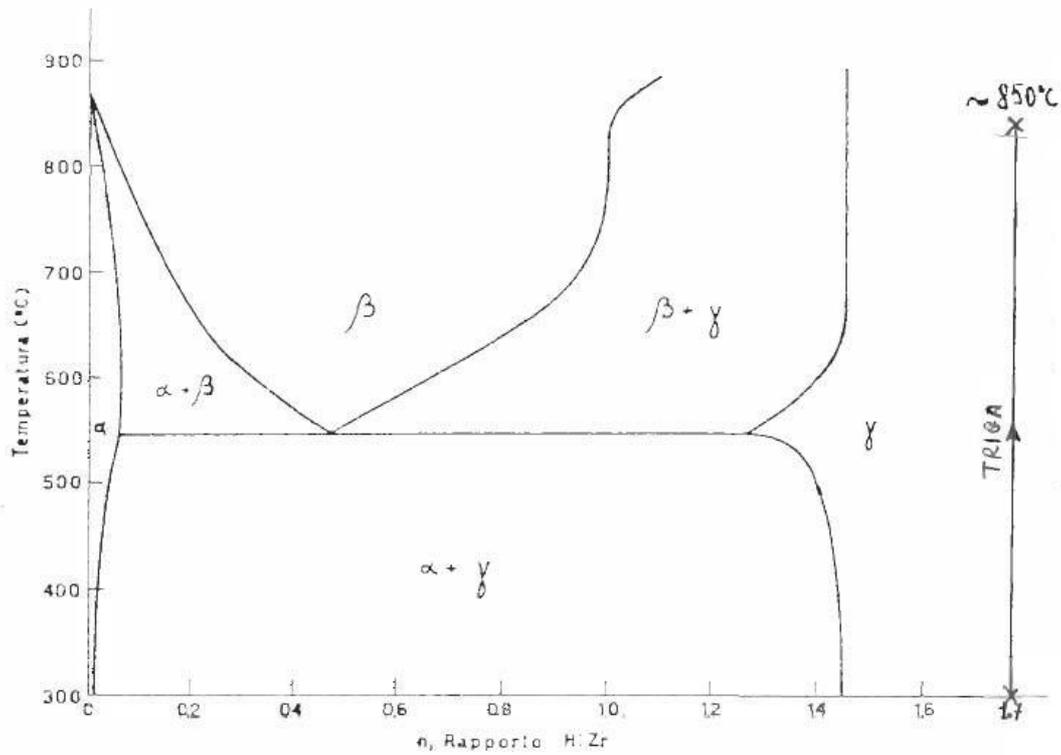


Figura 3-45 Diagramma di fase dell'Idruro di Zirconio

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 72 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	--------------

4. Conclusioni

Le caratteristiche principali del modello TRIGA RC-1 si possono riassumere in termini di :

- Stabilità :

Il modello raggiunge sempre una condizione stazionaria (reattore critico) a partire da qualunque punto di funzionamento

- Affidabilità della soluzione :

Risultati ingegneristici in linea con dati sperimentali e con le specifiche del R.S.T.

- Stiff system : dinamiche veloci e lente
- Tempo di calcolo : circa il 45% dell'intervallo simulato
- Maneggevolezza per l'operatore

Il modello è dotato di Restart

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 73 di 73
---	---------------------------	--	---------------	----------	--------------

5. Bibliografia

- /1/ **Rapporto di Sicurezza del Reattore TRIGA-RC1 dell'ENEA**
- /2/ **Carlo Innarella. Seminario “ Il Modello Dinamico del Reattore Nucleare TRIGA-RC1 dell'ENEA “. ENEA C.R.CASACCIA , Dicembre 2011**
- /3/ **Carlo Innarella . Il modello del reattore BWR4 di Caorso . Modello implementato su calcolatore analogico dell'ENEA. Rapporto Tecnico NRAF 1TP4B 84043 Dicembre 1984**

6. Simbologia

R.S.T. = Rapporto di Sicurezza del TRIGA-RC1

7. Elenco allegati

Appendice A : Locandina Seminario

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 1 di 5
---	---------------------------	--	---------------	----------	------------

APPENDICE A

Locandina Seminario

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 2 di 5
---	---------------------------	--	---------------	----------	------------

ENEA
UNITA' TECNOLOGIA DELLA
FISSIONE

SEMINARIO

**IL MODELLO DINAMICO DEL
REATTORE
NUCLEARE TRIGA-RC1 DELL' ENEA**

**Ing. Carlo Innarella
Lab. SIMING**

**C.R.Casaccia 22 Dicembre 2011
Sala Mimose Ore 9.30**

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 3 di 5
---	---------------------------	--	--------	----------	------------

SEMINARIO

- 9.30 - Introduzione** **Ing. M. Sepielli**
- 9.40 - Attività di Simulazione di Impianti Nucleari**
Ing. E. Negrenti
- 9.50 - Simulazione su reattori di ricerca** **Ing. R. Bove**
- 10.00 - Il reattore TRIGA-RC1** **Dott. E. Santoro**
- 10.10 - Il modello dinamico del reattore nucleare TRIGA-RC1 dell'ENEA**
Ing. C. Innarella

Parte teorica

1. Elementi impiantistici del Reattore TRIGA per il modello
2. Aspetti teorici del modello TRIGA RC1
 - 2.1 Obiettivi
 - 2.2 La struttura del modello
 - 2.3 Assunzioni e ipotesi di base per
 - la Parte Neutronica del Nocciolo
 - la Parte Termica del Nocciolo :
 - . modello a TRE temperature con circolazione naturale
 - . modello a DUE temperature
 - l' Impianto di Raffreddamento
 - 2.4 L'ambiente Matlab di sviluppo del modello
 - 2.5 Interfaccia del Modello

Parte sperimentale

1. Funzionamento TRIGA in Condizioni Nominali : Rapporto Sicurezza Triga

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 4 di 5
---	---------------------------	--	---------------	----------	------------

2. Prova Sperimentale con Scram Automatico del 19 Ottobre 2010
3. Prove Sperimentali di Perdita di Reattività per Avvelenamento da Xenon :
 - 3.1 Prove da 7 a 11 Luglio 2003
 - 3.2 Prove da 1 a 4 Luglio 2003
4. Prove a Potenza Zero (Regime Pulito) : Zona di Instabilità
5. Salita a Potenza e Controllo della Reattività di Barra
6. Incidente di Reattività : Fuchs
7. Incidente di Perdita del Refrigerante : Svuotamento Istantaneo della Piscina (General Atomic)

12.30 - Conclusioni

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2011-ENEA-L1C4-010	Rev. 0	Distrib.	Pag 5 di 5
---	---------------------------	--	---------------	----------	------------

Reattore Nucleare TRIGA dell'ENEA



Vista del nocciolo del reattore TRIGA RC-1 dell'ENEA