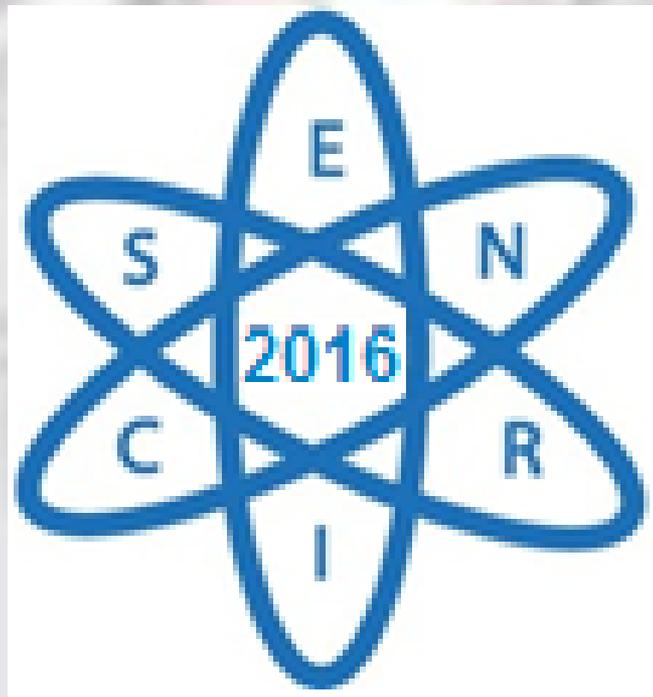




# Análise Determinística de Segurança



A radioatividade é um fenômeno natural, e fontes naturais de radiação são características do meio ambiente.

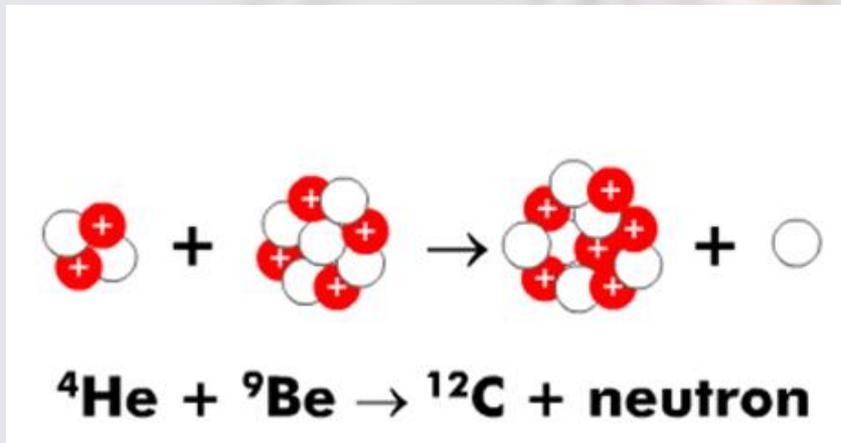
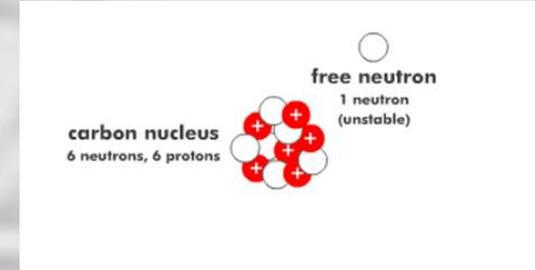
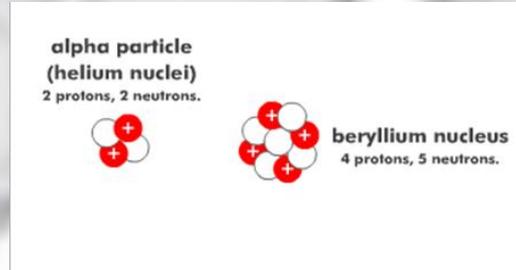
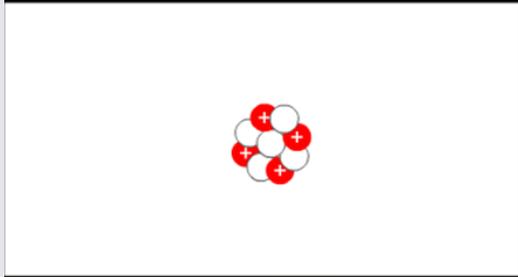
A radiação e substâncias radioativas têm muitas **aplicações benéficas**, que vão desde a **geração de energia**, aplicações na medicina, indústria e agricultura.

Os riscos de radiação para os trabalhadores, para o público e para o ambiente que podem surgir a partir destas aplicações devem ser avaliados e, se necessário, controlados

Falaremos aqui sobre análise determinística de segurança  
aplicada a reatores nucleares

**Voltando ao início !!!!!!!**

Convencido da existencia do neutron desde 1920, James Chadwick finalmente encontrou evidencias em 1932.



Chadwick

Em 1934, Fermi sugeriu a Rasetti que irradiasse vários elementos com nêutrons  
→ Fonte de Polônio Berílio



Fermi, com uma fonte de rádio-Berílio bombardeou, sistematicamente, diversos elementos em ordem crescente de número atômico.

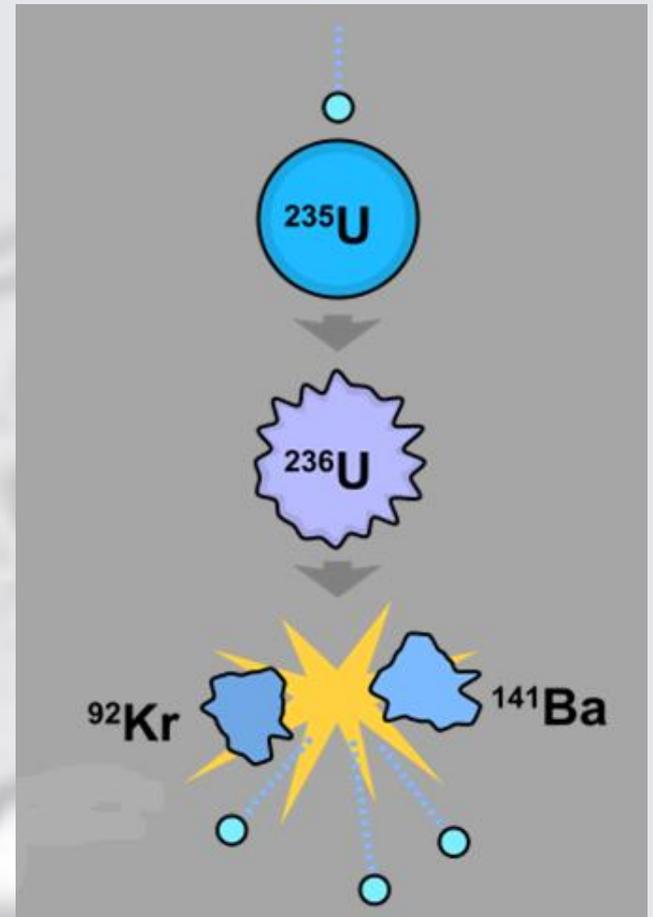
→ Concluiu que nêutrons lentos eram mais eficazes que os rápidos na produção de reações nucleares em certos elementos!

Em 1938, enquanto estava em Estocolmo recebendo o premio Nobel por seu trabalho : ***“Produção de elementos transurânicos resultantes do bombardeamento de urânio por nêutrons”***,

na Alemanha,

Otto Hanhn e Fritz Strassman detectaram a presença de bário como resultado do bombardeio do urânio com nêutrons

Lise Meitner concluiu que o bário era um dos fragmentos que resultavam da fissão do urânio



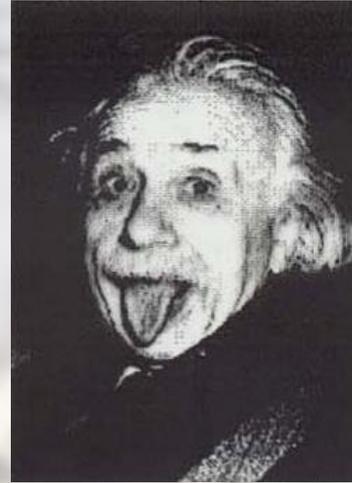
## A FISSÃO NUCLEAR !!!

A comunicação foi apresentada à revista “Naturwissenschaften” no dia 22 de dezembro de 1938

16/01/1939



Apresentou trabalhos  
de Fritz e Meitner



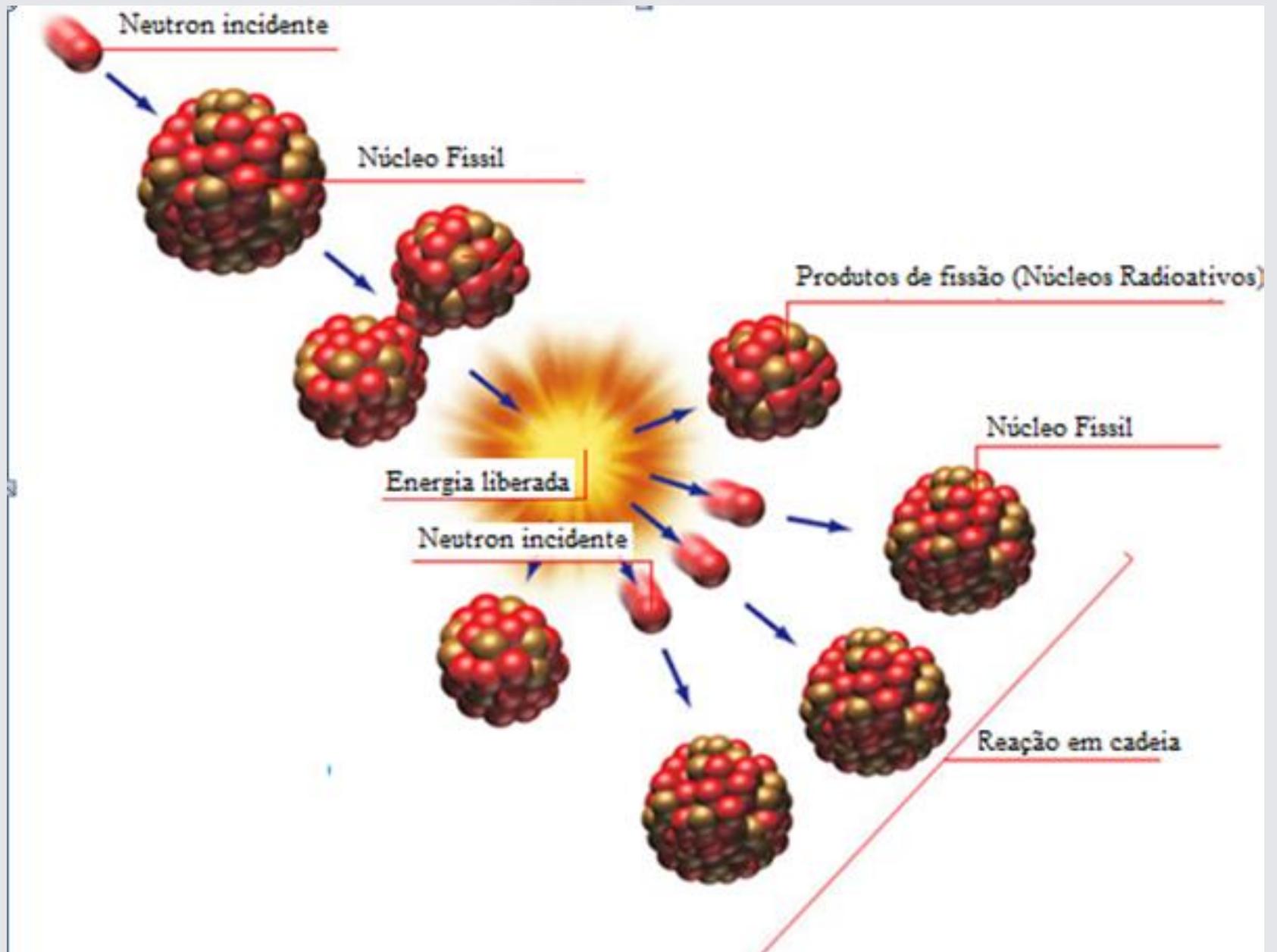
Possibilidade da utilização da  
energia liberada na fissão

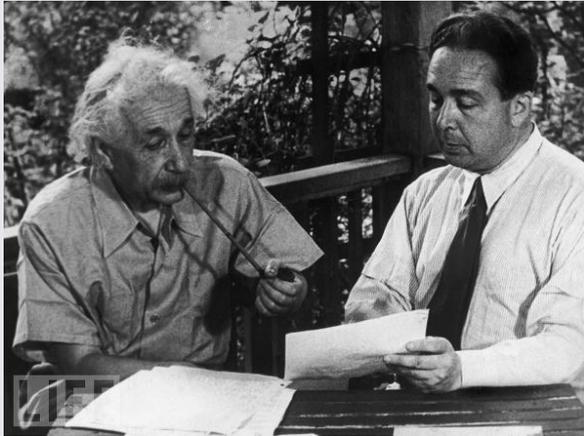


Possibilidade da  
emissão de  
nêutrons na  
fissão do urânio



**Reação em cadeia!!!**





Na foto, Albert Einstein e Léo Szilard em 1946 recriando o momento em que prepararam a carta

Albert Einstein  
Old Grove Rd.  
Hassau Point  
Peconic, Long Island

August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,  
President of the United States,  
White House  
Washington, D.C.

Sir:

Some recent work by E.Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and, if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations:

In the course of the last four months it has been made probable - through the work of Joliot in France as well as Fermi and Szilard in America - that it may become possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium, by which vast amounts of power and large quantities of new radium-like elements would be generated. Now it appears almost certain that this could be achieved in the immediate future.

This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable - though much less certain - that extremely powerful bombs of a new type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove to be too heavy for transportation by air.

The United States has only very poor ores of uranium in moderate quantities. There is some good ore in Canada and the former Czechoslovakia, while the most important source of uranium is Belgian Congo.

In view of this situation you may think it desirable to have some permanent contact maintained between the Administration and the group of physicists working on chain reactions in America. One possible way of achieving this might be for you to entrust with this task a person who has your confidence and who could perhaps serve in an unofficial capacity. His task might comprise the following:

a) to approach Government Departments, keep them informed of the further development, and put forward recommendations for Government action, giving particular attention to the problem of securing a supply of uranium ore for the United States;

b) to speed up the experimental work, which is at present being carried on within the limits of the budgets of University laboratories, by providing funds, if such funds be required, through his contacts with private persons who are willing to make contributions for this cause, and perhaps also by obtaining the co-operation of industrial laboratories which have the necessary equipment.

I understand that Germany has actually stopped the sale of uranium from the Czechoslovakian mines which she has taken over. That she should have taken such early action might perhaps be understood on the ground that the son of the German Under-Secretary of State, von Weizsäcker, is attached to the Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin where some of the American work on uranium is now being repeated.

Yours very truly,

*A. Einstein*

(Albert Einstein)

## Início da era nuclear

Chicago Pile-1.



Enrico Fermi liderou o grupo de cientistas na construção do primeiro reator nuclear (primeira reação em cadeia auto sustentável).

**No dia 2 de dezembro de 1942 entrou em operação.**

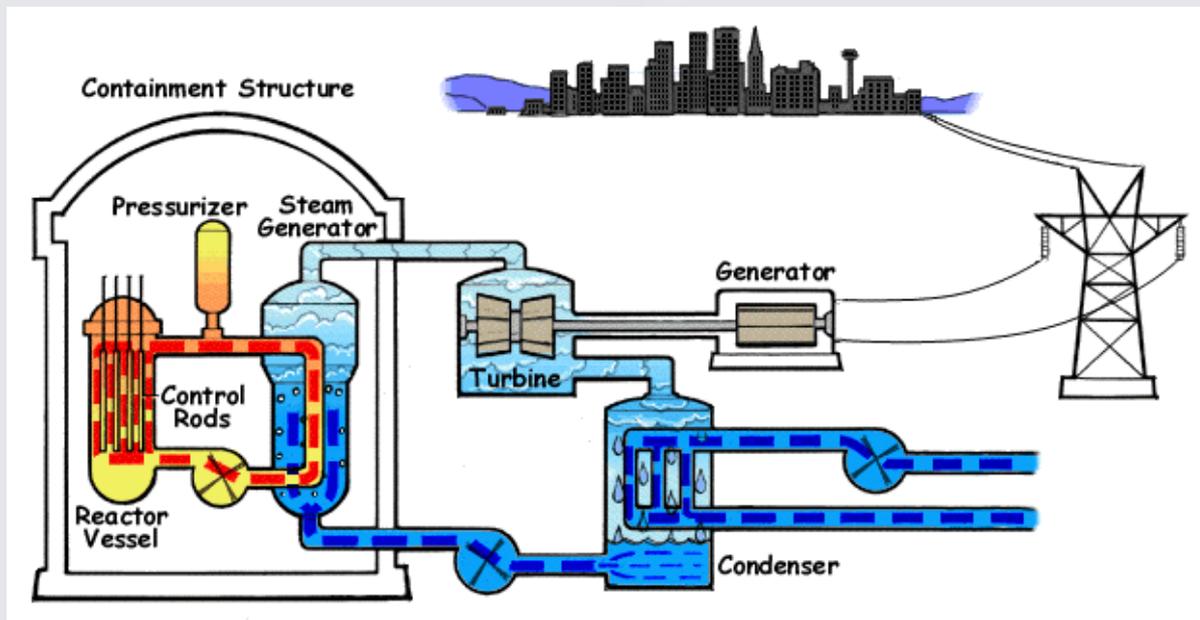
Os primeiros reatores nucleares para a produção de plutônio foram construídos entre 1943- 5 com potência da ordem de MW.

→ Em locais isolados com água abundante

Depois de 1945, foram iniciados estudos da possibilidade de **geração de eletricidade** com um reator nuclear como fonte de calor.

→Grandes margens de segurança para compensar a falta de conhecimento detalhado.

O primeiro reator nuclear para a produção de eletricidade foi comissionado em 1960, sendo um protótipo para uma série de reatores com aumentos sucessivos de capacidade.



A comissão de energia atômica, promulgou em 1971 critérios gerais de projeto, básicos para projetar os sistemas de segurança em usinas nucleares com reatores de água leve.

→ envolviam a postulação de acidentes limitantes que deviam ser previstos nos projetos.

***Os princípios dos acidentes básicos de projeto refletem uma filosofia de segurança determinística***

## Análise de segurança

*Análises de segurança são **avaliações analíticas** de fenômenos físicos que ocorrem em plantas nucleares, feitas com o propósito de demonstrar que **os requisitos de segurança são atendidos** para todos os eventos postulados que podem ocorrer ao longo de uma ampla gama de estados operacionais, incluindo níveis diferentes de disponibilidade dos sistemas de segurança.*

O projeto, fabricação, construção, operação e comissionamento devem ser integrados com a análise de segurança para garantir que a intenção do projeto foi incorporada na planta.

**TABLE 1. PLANT STATES [1, 3]**

Operational states		Accident conditions		
		Within design basis accidents	Beyond design basis accidents	
Normal operation	Anticipated operational occurrences	a	Design basis accidents	b   Severe accidents
				Accident management

<sup>a</sup> *Accident conditions* that are not *design basis accidents* as explicitly considered but which are encompassed by them.

<sup>b</sup> *Beyond design basis accidents* without significant core degradation.

Definida como operação dentro dos limites e condições de operação especificados

TABLE 1. PLANT STATES [1, 3]

Operational states		Accident conditions		
		Within design basis accidents	Beyond design basis accidents	
Normal operation	Anticipated operational occurrences	a	Design basis accidents	b   Severe accidents
				Accident management

<sup>a</sup> *Accident conditions that are not design basis accidents as explicitly considered but which are encompassed by them.*

<sup>b</sup> *Beyond design basis accidents without significant core degradation.*

Processo operacional, fora da operação normal, mas não causa nenhum dano significativo para itens de segurança importantes ou conduz a condições de acidente. Podendo resultar em um desligamento do reator.

TABLE 1. PLANT STATES [1, 3]

Operational states		Accident conditions		
		Within design basis accidents	Beyond design basis accidents	
Normal operation	Anticipated operational occurrences	a	Design basis accidents	b   Severe accidents
				Accident management

<sup>a</sup> *Accident conditions that are not design basis accidents as explicitly considered but which are encompassed by them.*

<sup>b</sup> *Beyond design basis accidents without significant core degradation.*

Condições de acidente, estabelecidas em projeto, no qual os danos ao combustível e a liberação de materiais radioativos são mantidos dentro de limites autorizados.

TABLE 1. PLANT STATES [1, 3]

Operational states		Accident conditions			
		Within design basis accidents		Beyond design basis accidents	
Normal operation	Anticipated operational occurrences	a	Design basis accidents	b	Severe accidents
				Accident management	

<sup>a</sup> *Accident conditions that are not design basis accidents as explicitly considered but which are encompassed by them.*

<sup>b</sup> *Beyond design basis accidents without significant core degradation.*

Para todas as plantas, uma lista de eventos postulados é preparada para garantir que a análise do comportamento da planta está completa

Deve incluir erros de operação, falhas de equipamentos eventos induzidos por humanos ou eventos naturais

TABLE 1. PLANT STATES [1, 3]

Operational states		Accident conditions		
Normal operation	Anticipated operational occurrences	Within design basis accidents		Beyond design basis accidents
		a	Design basis accidents	b   Severe accidents
				Accident management

<sup>a</sup> *Accident conditions that are not design basis accidents as explicitly considered but which are encompassed by them.*

<sup>b</sup> *Beyond design basis accidents without significant core degradation.*

São tratados separadamente na análise determinística de segurança.

TABLE 1. PLANT STATES [1, 3]

Operational states		Accident conditions		
		Within design basis accidents	Beyond design basis accidents	
Normal operation	Anticipated operational occurrences	a	Design basis accidents	b   Severe accidents
				Accident management

<sup>a</sup> *Accident conditions* that are not *design basis accidents* as explicitly considered but which are encompassed by them.

<sup>b</sup> *Beyond design basis accidents* without significant core degradation.

Ocorrências operacionais antecipadas incluem:

Perda de potência

Falha na turbina

Falha de controle de equipamentos

Perda de potencia da bomba.

As categorias de eventos postulados para os acidentes de base de projeto tipicamente incluem :

Aumento ou diminuição da remoção de calor pelo sistema de refrigeração do reator.

Aumento ou diminuição da vazão do refrigerante

Anomalias na reatividade e na distribuição de potência

Liberação de material radioativo de um subsistema ou componente

## Análise Determinística de segurança

*A análise determinística de segurança prevê a resposta aos eventos postulados.*

Um conjunto específico de regras e critérios de aceitação são aplicados.

Tipicamente é utilizada em cálculos neutrônicos, termo-hidráulicos, radiológicos e estruturais, com diferentes ferramentas computacionais

## → **Análise Neutrônica**

→ Distribuição espacial e temporal do fluxo de nêutrons no núcleo,

→ Código utilizado

→ Parcs

## → **Análise Termo-hidráulica**

→ Capacidade de retirar calor do sistema de refrigeração do reator.

→ Código utilizado

→ RELAP5

## Análise Termo-Hidráulica:

### ❖ RELAP5

#### *Reactor Excursion and Leak Analysis Program*

→ Desenvolvido no laboratório Nacional de Engenharia Idaho (INEL) para a *U. S. Nuclear Regulatory Commission* (NRC) .

O uso do código inclui análises requeridas para suporte, cálculos para licenciamento, avaliação de acidentes, análises de planejamento de experimentos, entre várias outras aplicações.

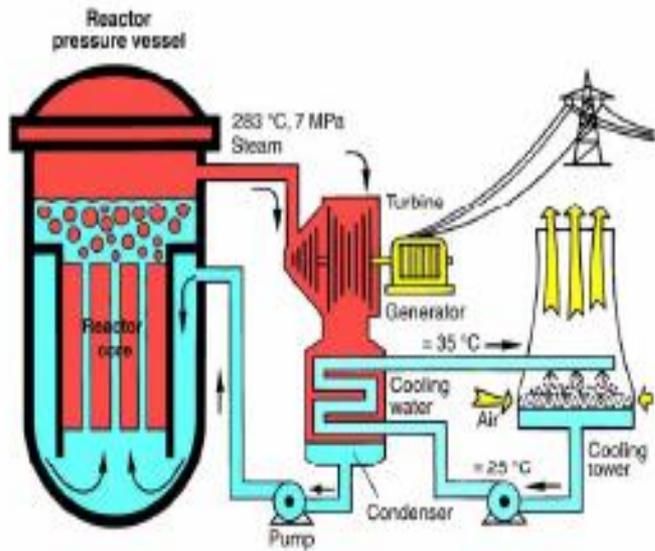
### ❖ RELAP5 – 3D

O maior atributo distinguindo o código RELAP5-3D das prévias versões é a **capacidade de modelagem termo-hidráulica e cinética multidimensional totalmente integrada internamente.**

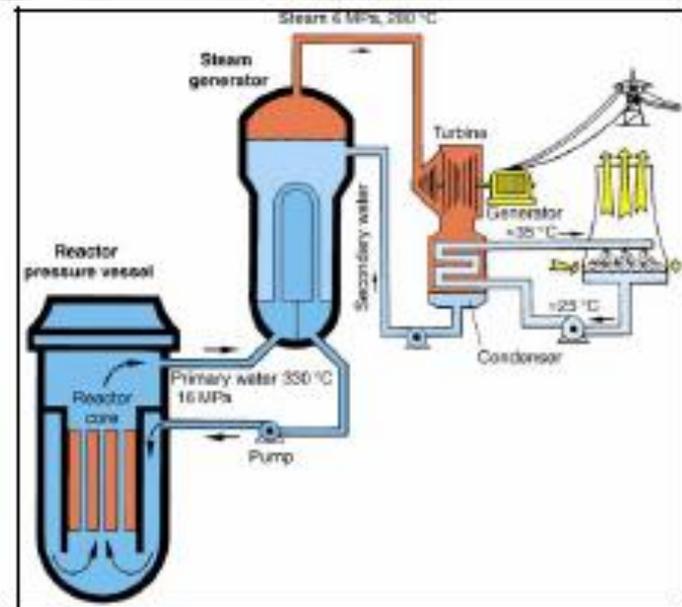
Foi desenvolvido para simular cenários transitórios em reatores de potência tais como

BWR

PWR

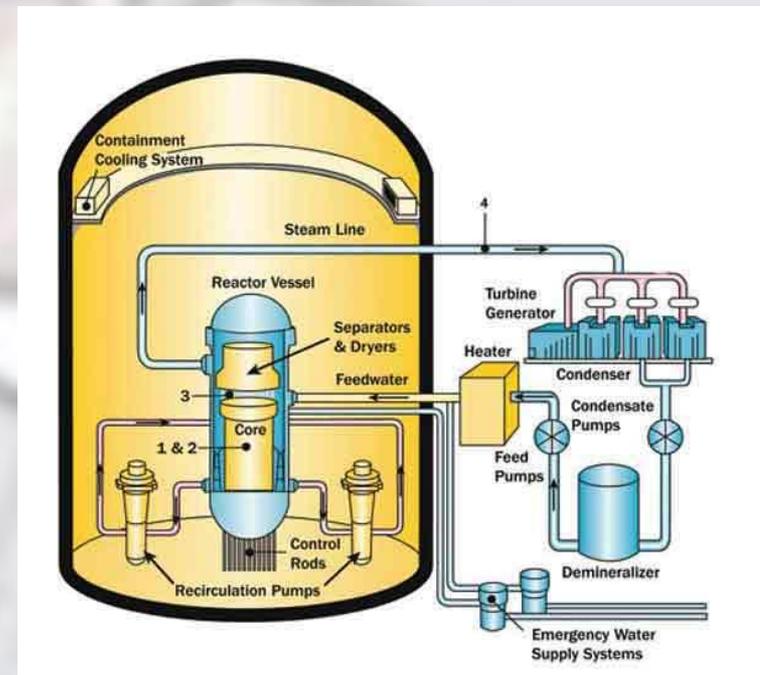
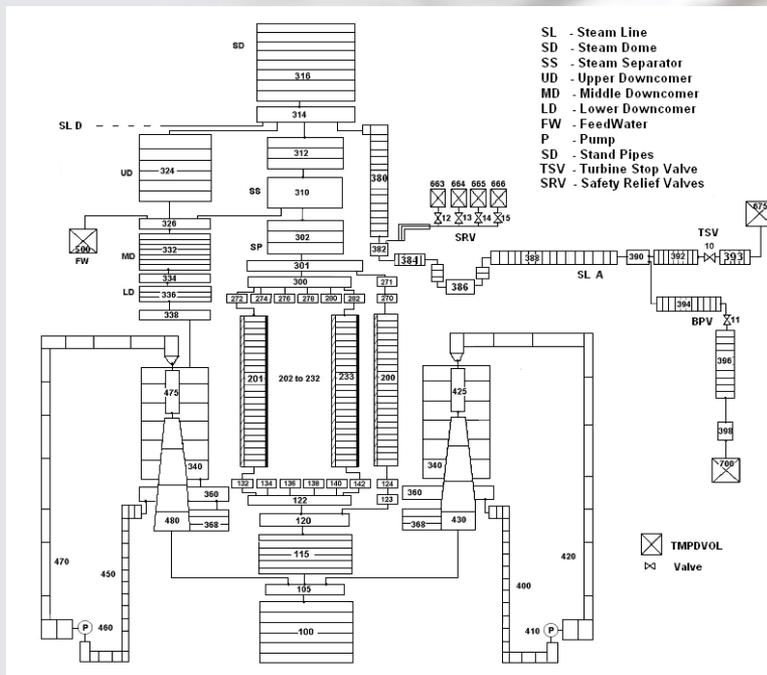


Principle of a nuclear power plant with boiling water reactor



Nuclear power plant with pressurized water reactor

Um sistema físico constituído por caminhos de fluxo, volumes, áreas, etc, é simulado através da construção de uma rede de volumes conectados por junções. A transformação do sistema físico a um sistema de volumes e junções é um processo aproximado e não há substituto para a experiência.



Nodalização do reator PB2 para o código RELAP5

## Análise Neutrônica:

### ❖ PARCS

*Pardue Advanced Reactor Core Simulator*

→ É um programa de análise neutrônica 3D que resolve a equação da difusão de nêutrons para casos estacionários e transitórios.

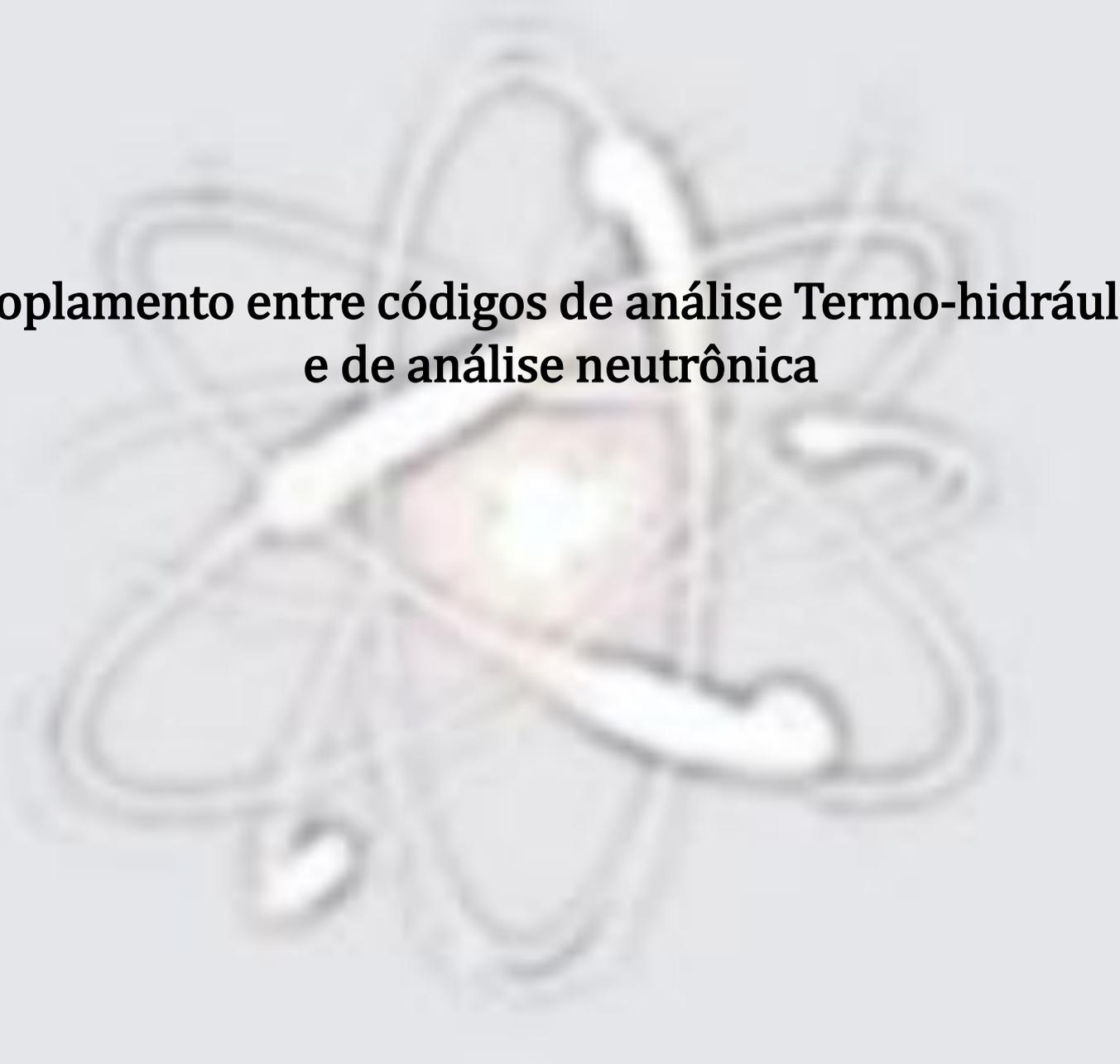
Como saída, fornece a resposta dinâmica do reator a perturbações de reatividade tais como:

- movimento das barras de controle
- variações nas condições de temperatura e densidade do refrigerante no núcleo do reator.

Código para a geração de seções de choque WIMSD5B

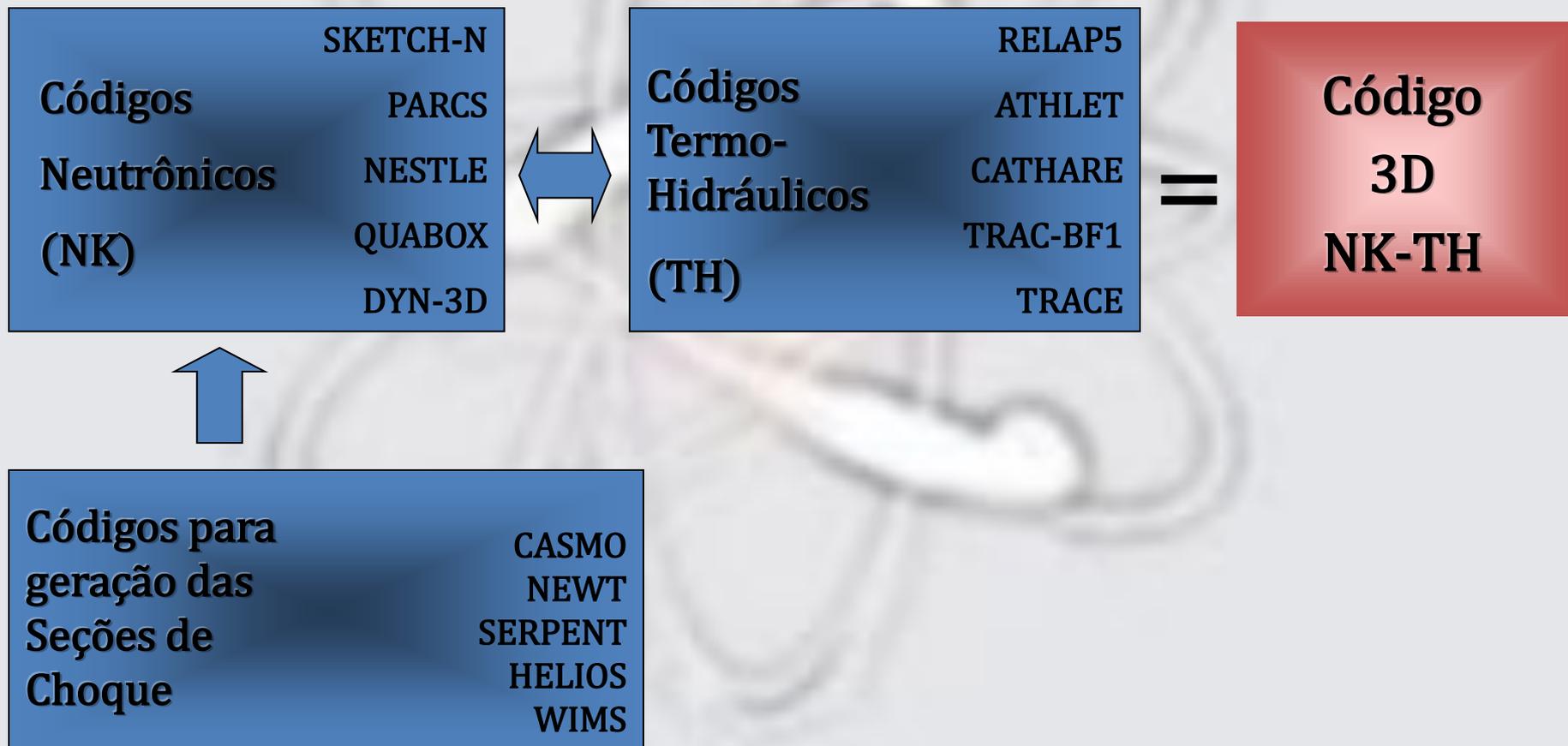
*Winfrith Improved Multigroup Scheme*

Fornece o valor do fator de multiplicação infinito e efetivo, e as constantes de poucos grupos para serem usadas como entrada em códigos de difusão com multigrupo.

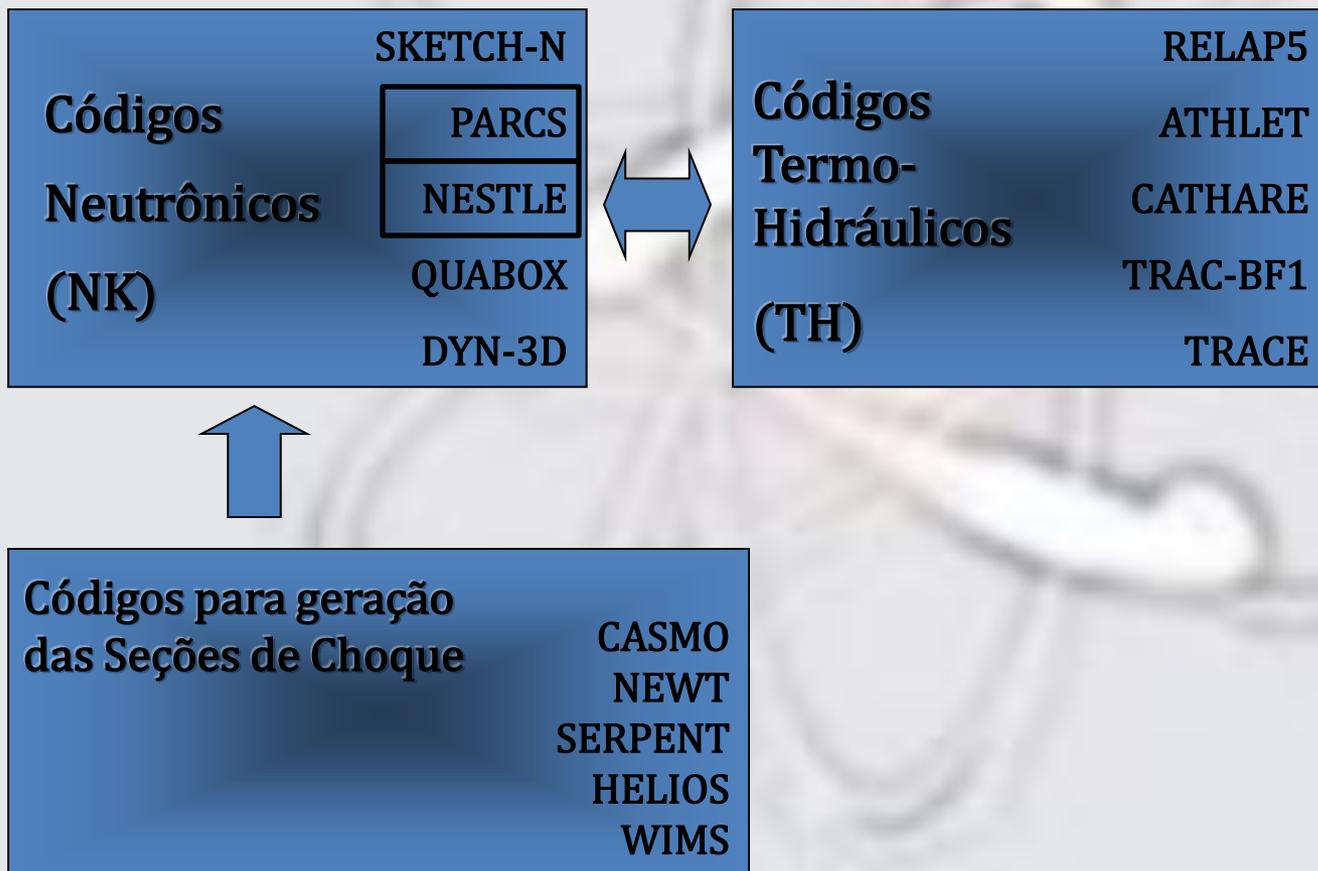


**Acoplamento entre códigos de análise Termo-hidráulica  
e de análise neutrônica**

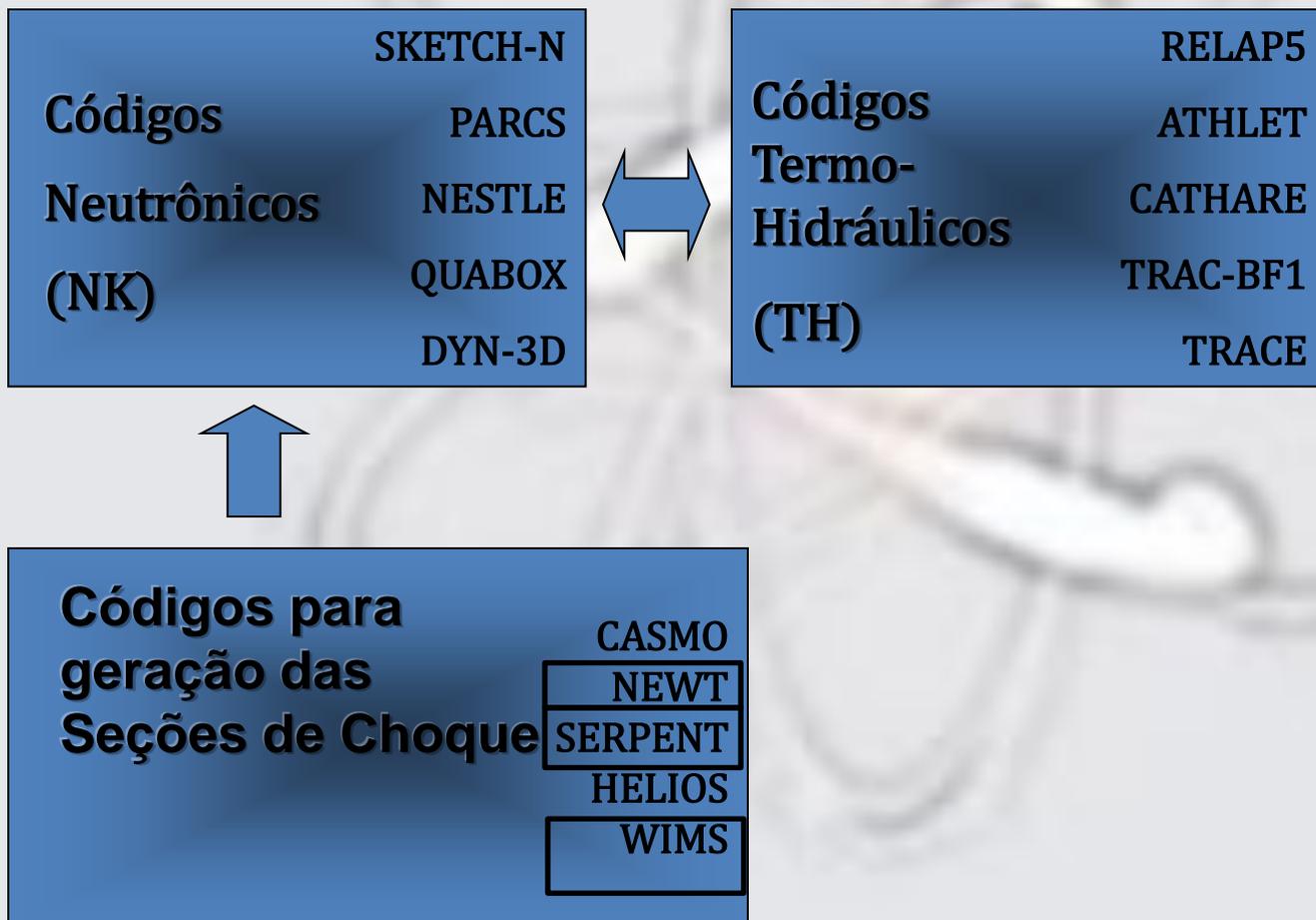
# Esquema geral de Acoplamento entre códigos de cinética neutrônica (NK) e de termo hidráulica (TH)



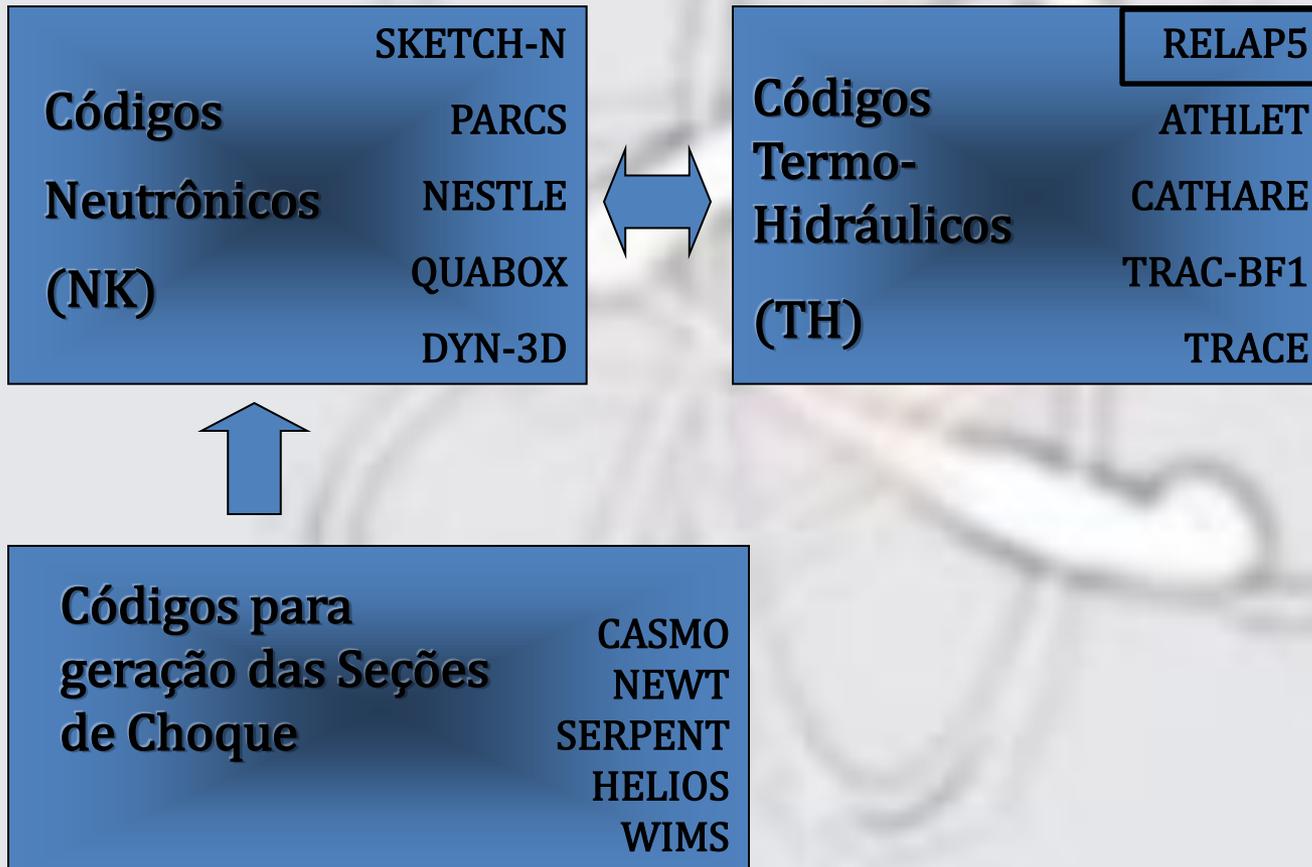
# Esquema geral de Acoplamento entre códigos de cinética neutrônica (NK) e de termo hidráulica (TH)

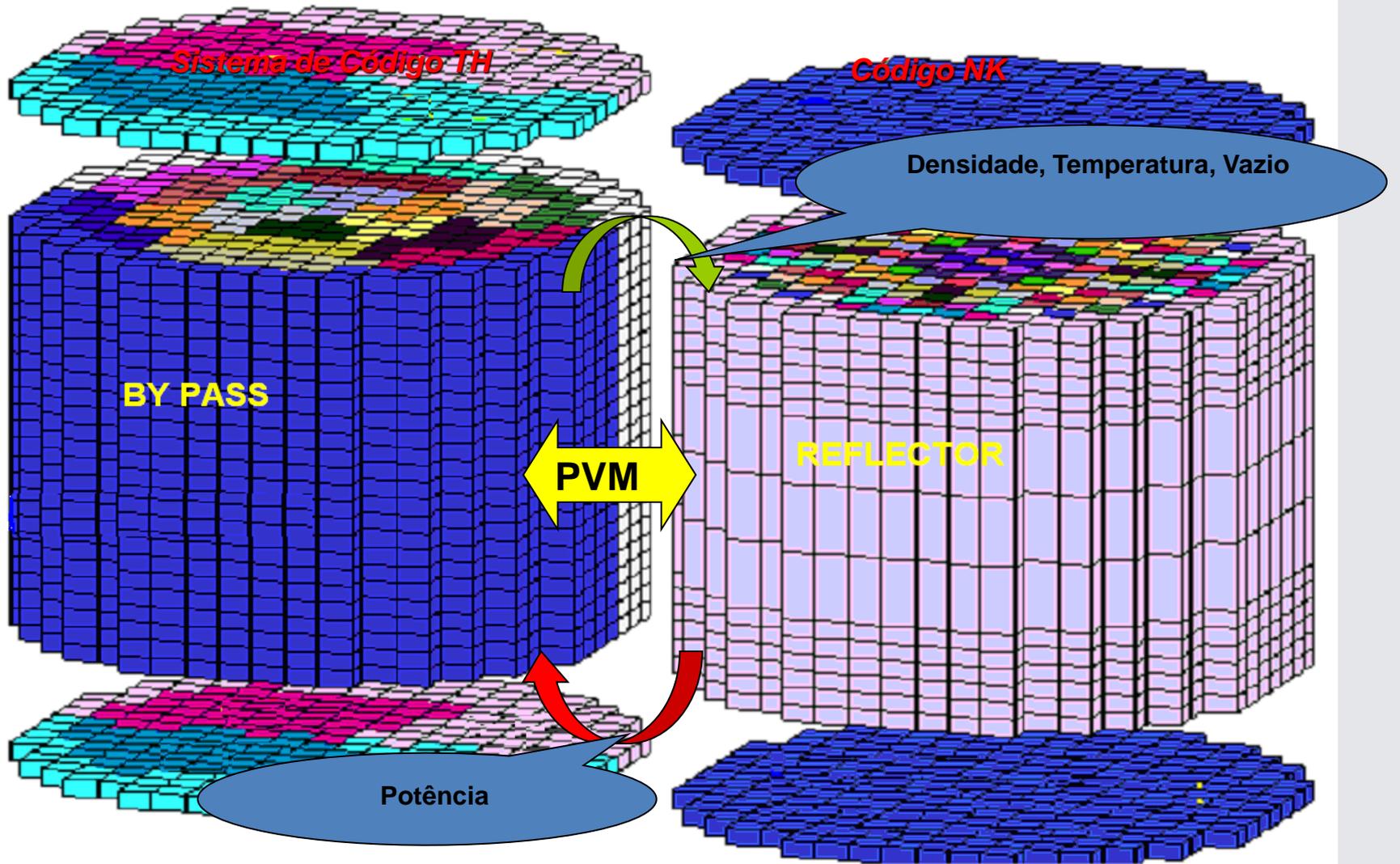


# Esquema geral de Acoplamento entre códigos de cinética neutrônica (NK) e de termo hidráulica (TH)



# Esquema geral de Acoplamento entre códigos de cinética neutrônica (NK) e de termo hidráulica (TH)

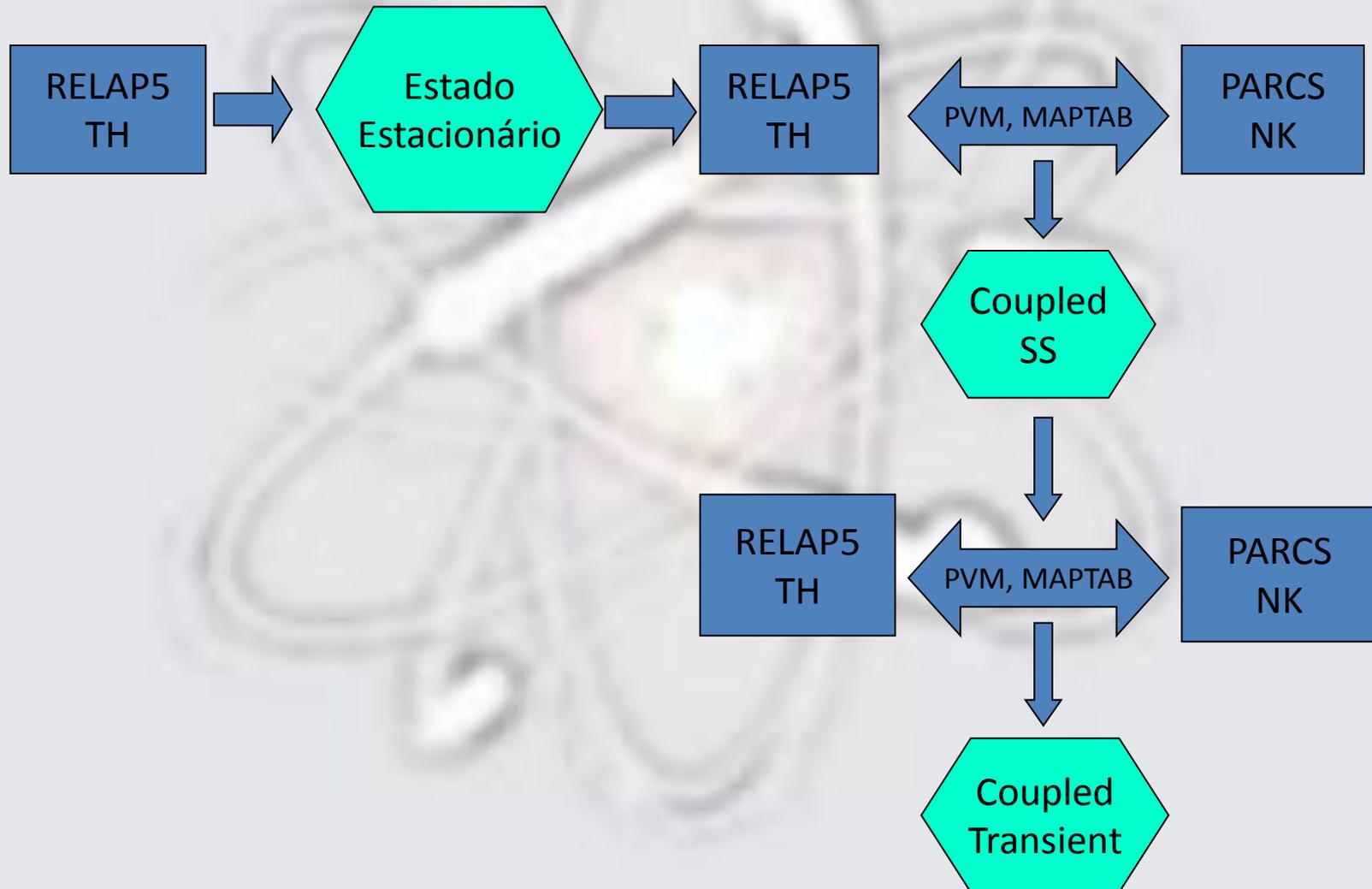




Nós Termo-hidráulicos

Nós neutrônicos

# Exemplos de Processos de Acoplamento RELAP5/PARCS



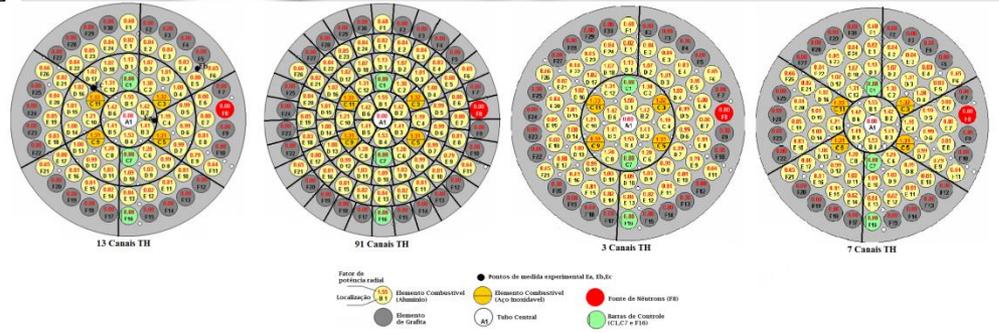
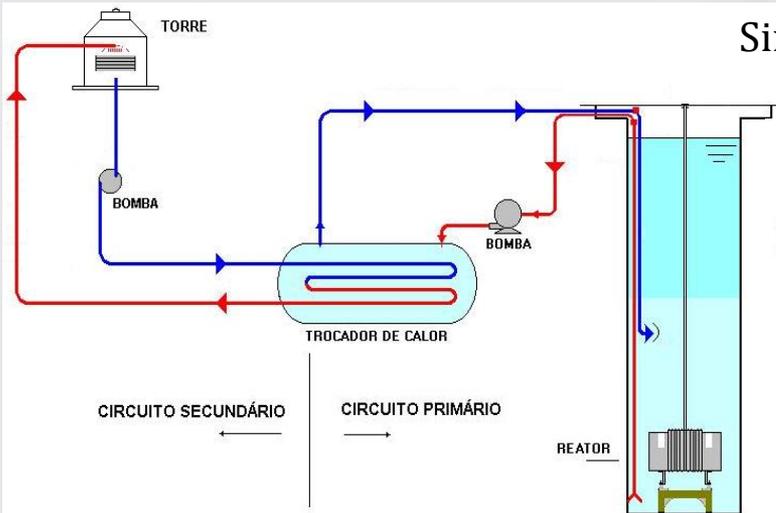
Exemplos de trabalhos desenvolvidos no departamento de Engenharia nuclear:

## Reatores

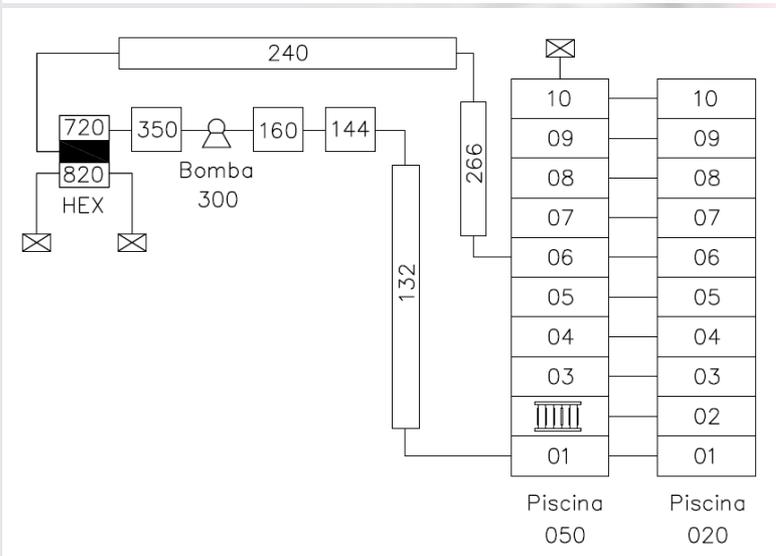
- TRIGA IPR-R1
- Angra 1
- Angra 2
- Peach Bottom
- HTTR
- LS-VHTR

# TRIGA IPR-R1

Simulações → Código de análise termo-hidráulica RELAP5



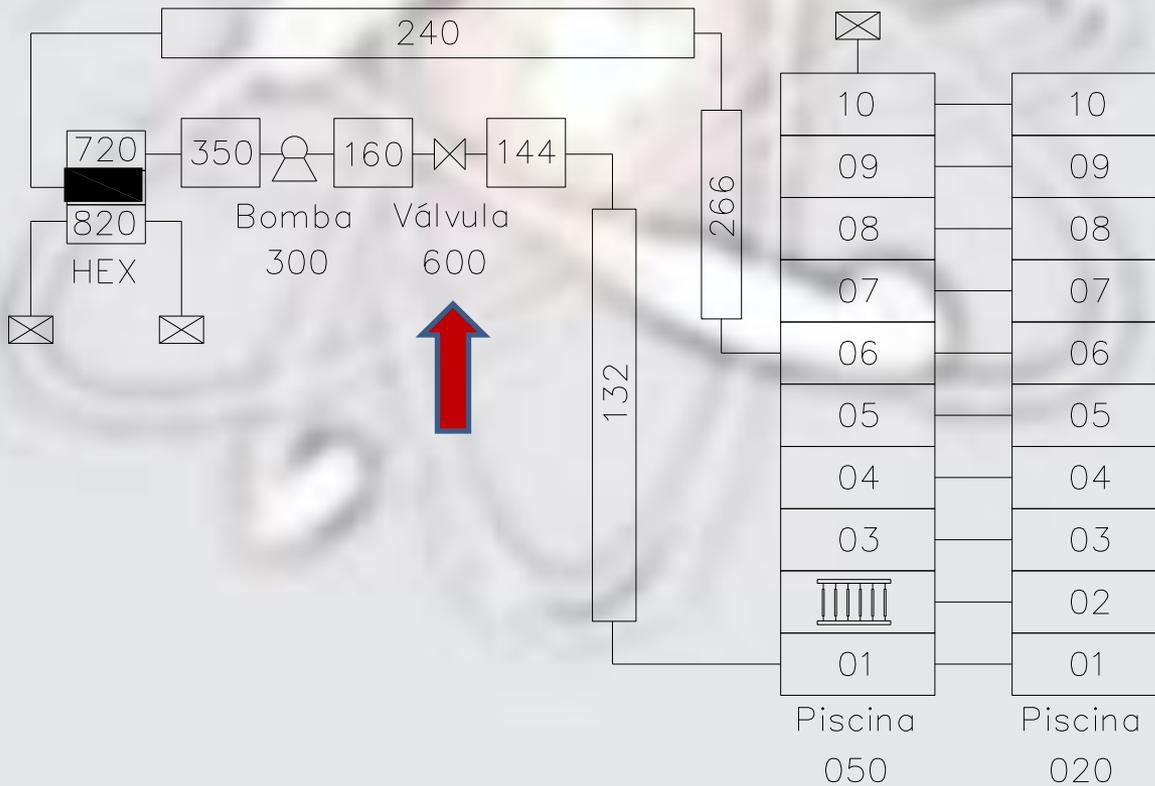
modelagens, considerando 3, 7, 13 e 91 canais termo-hidráulicos.



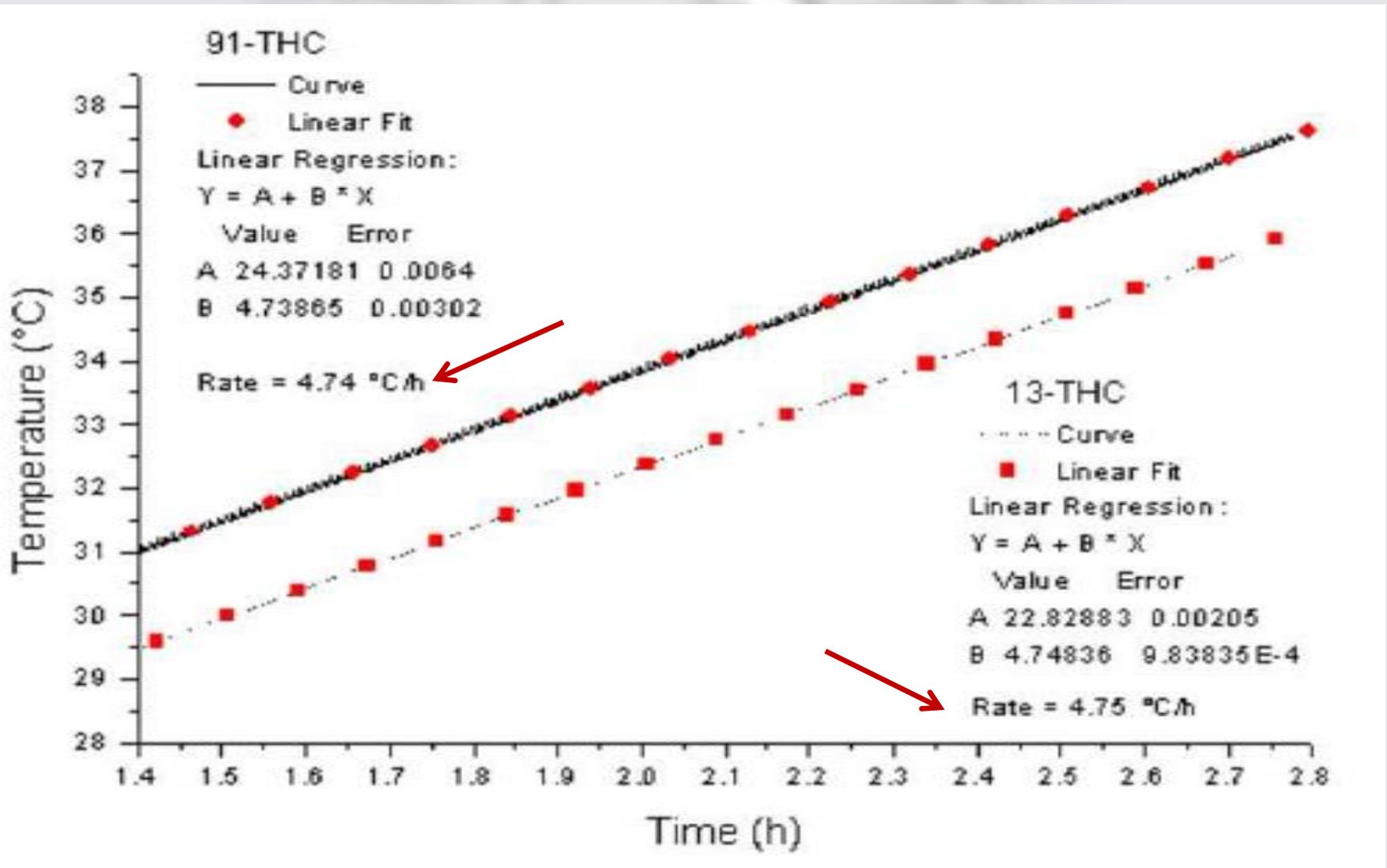
# 1- Falha na Bomba de Recirculação

Depois de atingir a condição estacionária, a válvula, componente n<sup>o</sup> 600 nesta nodalização, é fechada impedindo o funcionamento do sistema de refrigeração forçada.

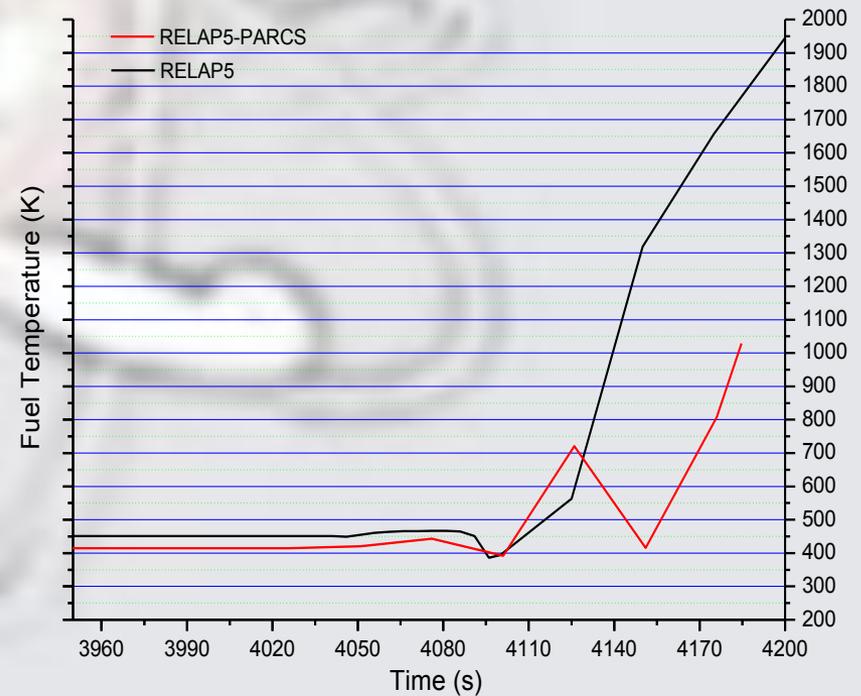
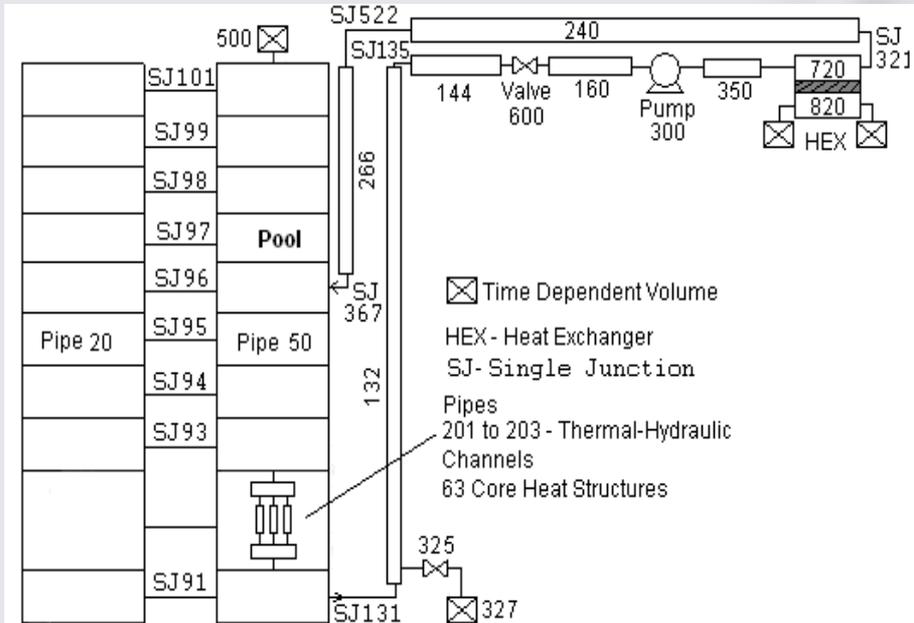
Como consequência há um aquecimento gradual da água da piscina. Este aquecimento foi determinado experimentalmente sendo igual a  $(4,8 \pm 0,2) \text{ } ^\circ\text{C/h}$  (Mesquita 2009-B)



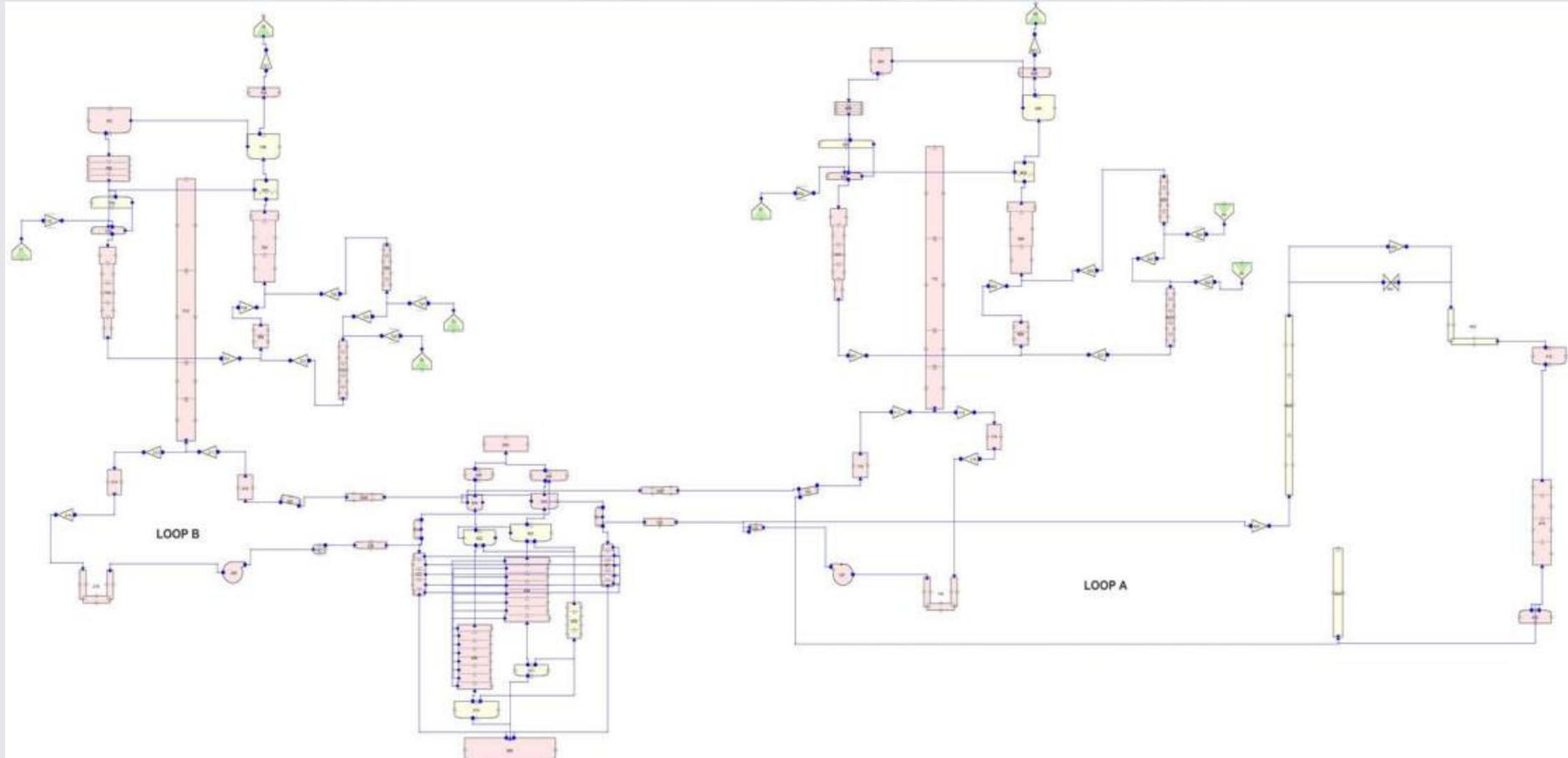
Nesta análise, a modelagem no RELAP5 reproduziu o aumento da temperatura do refrigerante, apresentando a mesma taxa obtida experimentalmente.



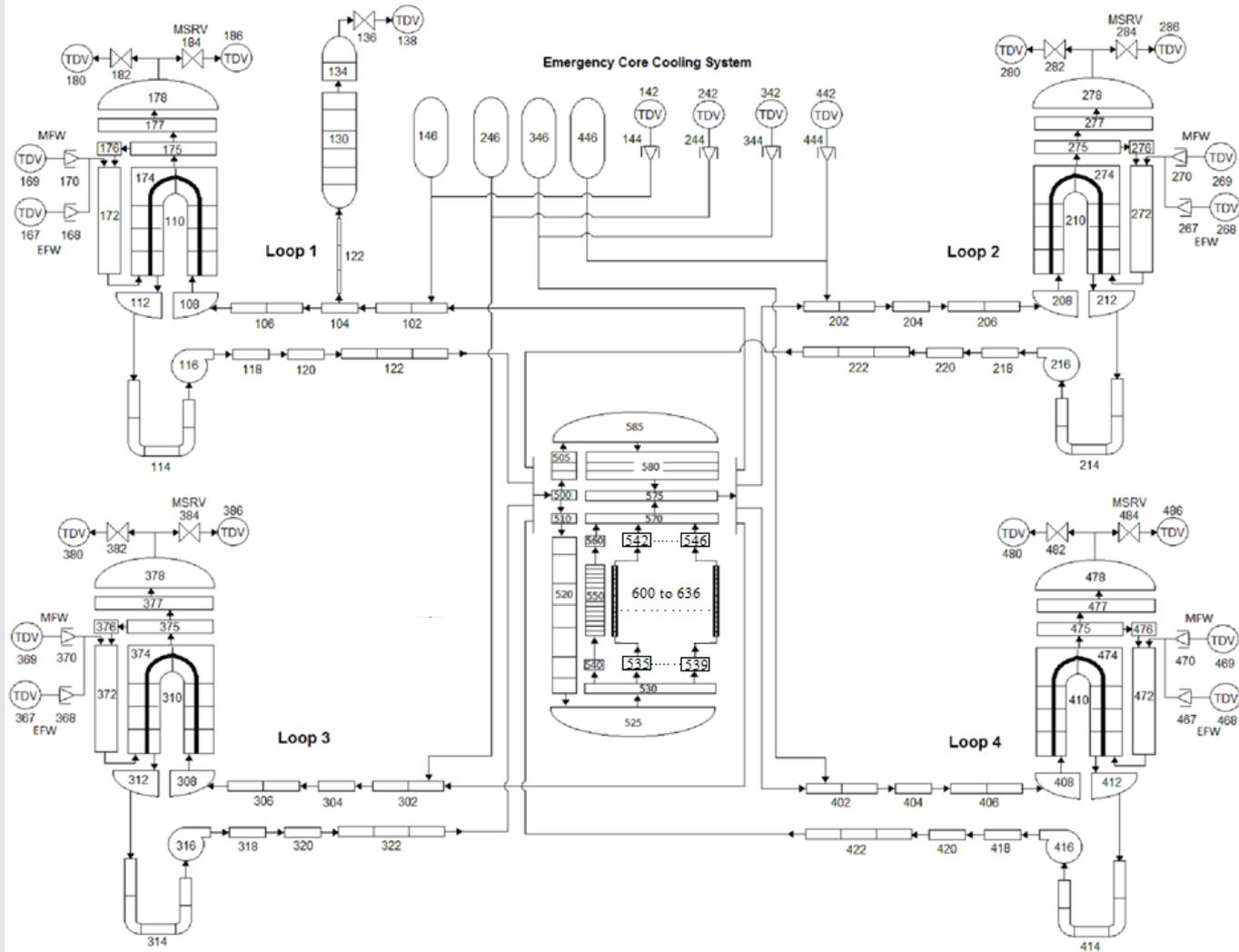
# Resultados de cálculos neutrônico e termo-hidraulico acoplados



# ANGRA 1



# Angra 2



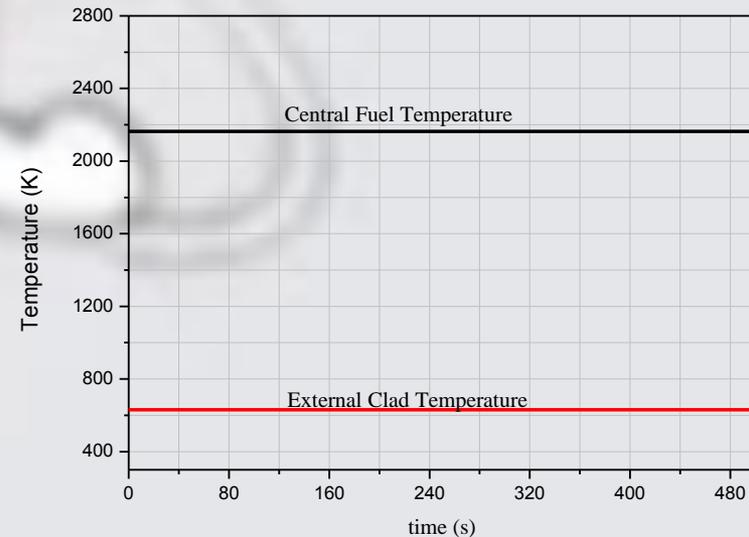
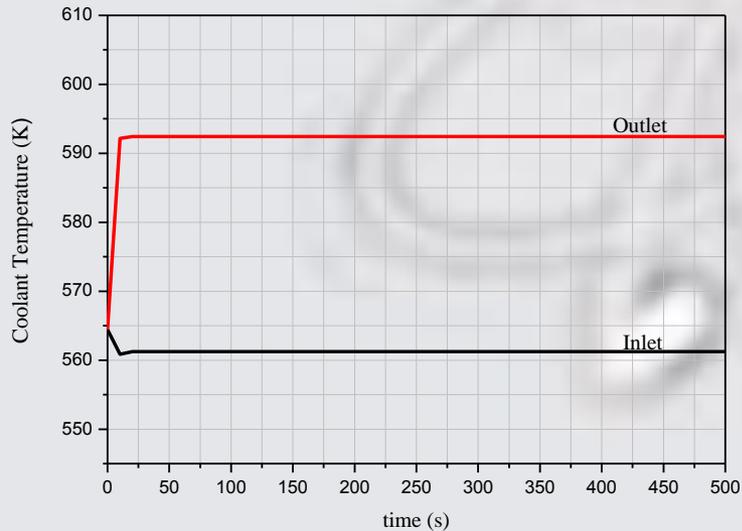


# Angra 2 – Acoplamento Termo-Hidráulico/Neutrônico

## Barras de controle parcialmente inseridas

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
			0.5327	0.8654	0.6768	0.7829	0.7627	0.6664	0.5558	0.4282	0.3098				
		0.4320	0.9877	1.1093	1.1095	1.4285	1.2736	1.1033	0.9057	0.7118	0.5555	0.4123	0.3672		
		0.5359	0.7210	0.6905	1.1648	1.6675	1.0666	0.5629	0.7810	1.0038	0.6063	0.6149	1.0257	0.8172	
	0.4756	0.8346	0.3872	0.6985	0.5410	1.1545	1.0730	1.1009	0.9282	0.9301	0.4905	1.0638	1.0200	1.3767	0.6217
	0.6574	1.0382	0.9916	1.1841	1.0399	1.6878	1.3841	1.1335	1.2970	1.5690	1.0779	1.5497	1.5694	1.3261	0.7268
	0.7683	1.2236	0.9354	0.9358	1.0408	1.3999	1.2268	1.4126	1.1734	1.3189	1.0207	1.0090	0.9852	1.2138	0.7284
	0.9265	1.5089	1.3219	0.6918	1.2455	1.2245	1.4710	0.7713	1.3953	1.1135	1.0773	0.5499	0.9737	1.0828	0.6555
	1.0932	1.7857	1.4024	1.3510	1.2411	1.4984	1.2627	1.4428	1.1933	1.3099	0.9349	0.7895	0.7359	0.9265	0.5729
	1.2820	2.2225	2.3135	2.1413	1.3525	1.8067	1.4181	1.1720	1.3675	1.6144	0.9528	1.0278	0.8152	0.8249	0.5146
	1.1353	2.4630	1.5541	1.5131	0.6234	1.0708	1.0201	1.1474	1.0728	1.1302	0.5139	0.6345	0.3368	0.6970	0.3901
		1.2995	1.5584	0.8781	0.7687	1.1569	0.8653	0.5892	1.0735	1.6562	1.1415	0.6603	0.6712	0.4799	
		0.7320	1.2891	0.8466	0.3888	0.8957	0.7936	1.0439	1.0546	1.6909	1.0970	1.0797	0.9440	0.4041	
			0.5300	0.5597	0.6779	0.8072	0.9834	1.1567	1.3012	1.4357	1.4920	0.8505	0.5159		
					0.3718	0.4840	0.6019	0.6989	0.7814	0.7894	0.6754				

## Distribuição de potência por assembly





OBRIGADA !