

**Análise de Transientes Devido a Inserção de Reatividade no Reator
SPERT IV.**

Richard Mc Donnell Cotrim

Departamento de Desenvolvimento de Sistemas
Coordenadoria para Projetos Especiais - COPESP
Ministério da Marinha - MM

Roberto Longo Freitas

Departamento de tecnologia de Reatores
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN
Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN/SP

RESUMO - Este trabalho apresenta uma comparação teórica-experimental dos transientes de inserção de reatividade no reator SPERT IV através de simulações realizadas com a última versão do código PARET. Foram analisados os transientes com período de 50 ms para quatro vazões diferentes e para convecção natural. Os resultados obtidos apresentaram desvios de até 30%, os quais são considerados como satisfatórios numa primeira análise, lembrando que qualitativamente a evolução temporal da potência foi bem representada.

ABSTRACT - This paper presents the theoretical-experimental confrontation of the reactivity insertion tests in the SPERT IV reactor with the last version of the PARET code. It were analysed the 50 ms period tests with four different flow rates and with natural convection. The results showed a maximum deviation of 30%, wich is very satisfactory in a first analysis, since the time evolution of the reactor power was well represented.

1. INTRODUÇÃO

O Projeto SPERT (*Special Power Excursion Reactor Transient*) desenvolvido pela *Phillips Petroleum Company* na Estação de Testes de Reatores em Idaho - USA, fez parte do programa de segurança de reatores nucleares da Comissão de Energia Atômica dos Estados Unidos, tendo como objetivo principal a compreensão mais completa dos parâmetros que influenciam numa excursão de potência auto limitante. Informações sobre o comportamento de parâmetros cinéticos e termohidráulicos são essenciais na avaliação da segurança inerente de reatores nucleares.

Nesta linha de estudos, foi construído no final da década de 50 o Reator tipo piscina SPERT IV [1], projetado para investigações experimentais do comportamento cinético de diferentes configurações de reatores. Deste modo, este trabalho objetiva avaliar os resultados obtidos com a última versão do código PARET relativamente aos testes de inserção de reatividade efetuados no núcleo D-12/25 do reator SPERT IV [2].

2. DESCRIÇÃO DO REATOR SPERT IV

O Reator SPERT IV foi uma instalação tipo piscina, composto por dois tanques de 6,1 metros de diâmetro por 7,6 metros de profundidade, conectados na parte superior por uma grade removível de 1,8 x 1,8 metros. O tanque de operação possuía tubulações localizadas no seu centro inferior capazes de permitir circulação forçada a taxas de até 1135 m³/s. O sistema de resfriamento incluía um trocador de calor de 1 MW para estabilizar a temperatura da piscina durante a operação e resfriamento da mesma após os testes de excursão de potência. O controle da instalação era todo realizado por controle remoto a partir do centro de controle do SPERT a aproximadamente 900 metros de distância.

O primeiro núcleo usado no SPERT IV, caracterizado como D-12/25, era um núcleo de alto enriquecimento de urânio alumínio, tipo placa, composto por 20 conjuntos combustíveis, 4 barras de controle e uma barra de transiente, conforme mostrado na figura 1, cujas características de projeto encontram-se na tabela 1.

Nos testes de excursão de potência iniciados por adição de reatividade tipo degrau no núcleo D-12/25, o reator foi inicialmente criticalizado a uma potência de aproximadamente 50 W pela retirada de barras de controle. A posição exata da barra de controle necessária para a inserção do excesso de reatividade desejado foi determinado pela curva de valor da barra de controle. A região absorvedora da barra de transiente foi colocada no núcleo para deixá-lo subcrítico, e as barras de controle levantadas para a posição predeterminada para o teste. O início do teste foi feito pela ejeção da parte absorvedora da barra de transiente do núcleo, levando o reator a supercriticalidade. Estes testes no SPERT IV foram realizados sob várias condições, sendo as variáveis controladas, a potência inicial do reator, inserção de reatividade, temperatura do refrigerante, pressão hidrostática e taxa de circulação do moderador.

A maioria das séries de testes foi iniciada com o reator crítico a níveis de potência de aproximadamente 1 Watt. Para os testes com períodos inferiores a 15 ms, foi necessário total inserção de reatividade antes da potência atingir níveis significativos.

A inserção de reatividade variou de 0,8 a 2,14 dólares, resultando em períodos assintóticos de aproximadamente 1 segundo a 7 milissegundos. A temperatura média do refrigerante era de 20°C no início de cada teste.

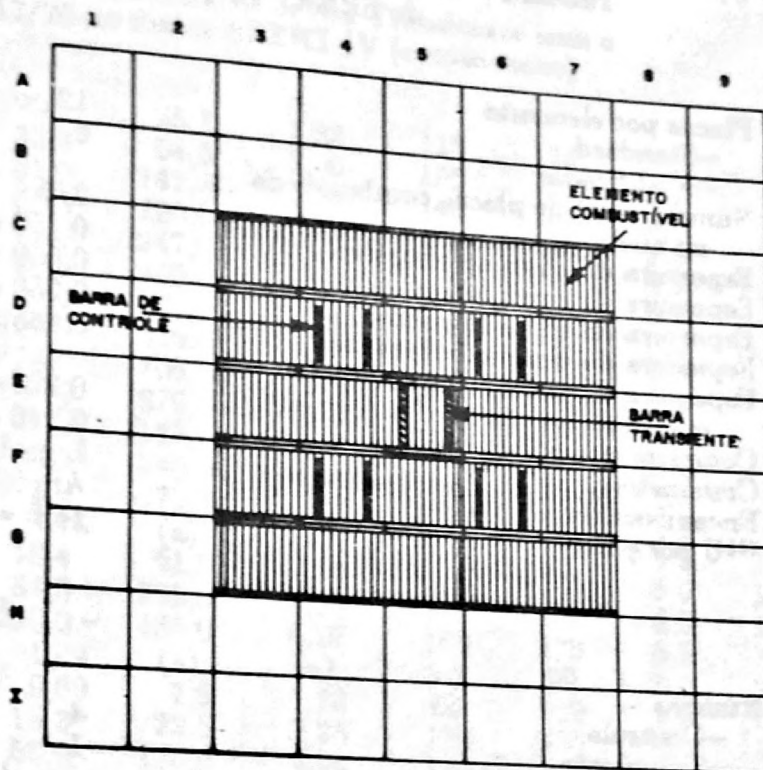


Figura 1. Vista do Núcleo D-12/25 do SPERT IV

Tabela 1 - Características de Projeto do Núcleo D-12/25 do SPERT IV

		<u>Núcleo</u>
Tamanho		38,1 X 38,1 X 61 cm
Volume total do núcleo		$88,50 \times 10^3 \text{ cm}^3$
Volume do moderador		$53,24 \times 10^3 \text{ cm}^3$
Volume de metal		$35,07 \times 10^3 \text{ cm}^3$
Área de transferência de calor		21,36 m ²
Razão metal-água		0,66
Razão H/U		360
		<u>Elemento Combustível</u>
		Placa
Tipo		
Número		20
-Standard		5
-Modificados (de controle)		7,6 X 7,6 X 63,8 cm
Tamanho		

Tabela 1 - Características de Projeto do Núcleo D-12/25 do SPERT IV (continuação)

Placas por elemento	12
-Standard	6
-Modificados	
Número total de placas combustíveis no núcleo	270
Espessura da placa combustível	0,152 cm
Espessura do combustível	0,050 cm
Espessura do encamisamento	0,050 cm
Espessura do canal refrigerante	0,455 cm
Espessura do canal refrigerante externo	0,228 cm
Comprimento ativo da placa	60,96 cm
Combustível	Liga U-Al, 93% de enriquecimento
Encamisamento	Al (6061)
²³⁵ U por placa	14,0 ± 0,2 g

Barras de Controle

Número	4
-Controle	1
-Transiente	1
Composição	Binal (7 wt% liga Boro-Alumínio)
Valor total de barra	20 \$
Taxa de retirada	0 a 30,5 cm/minuto
Tempo de desligamento	Aproximadamente 300 ms do limite superior

Os testes foram realizados com taxas de circulação de refrigerante de 0, 0,36, 0,73, 1,83 e 3,65 m/s, através do núcleo. A pressão hidrostática do núcleo para a maioria dos testes foi de 5,5 metros, sendo realizados alguns teste para períodos curtos com 0,6 metros.

Na tabela 2 encontram-se o resumo dos resultados da série de testes realizados no reator SPERT IV com o núcleo D-12/25.

Tabela 2 - Resumo dos Resultados dos Transientes com o Núcleo D-12/25 no reator SPERT IV

Número do teste	R _i (\$)	τ (ms)	α (s ⁻¹)	$\phi(t_m)$ (MW)	E(t _m) (MJ)	$\theta(t_m)$ (°C)	θ_{max} (°C)	Head (m)	vasão (m ³ /s)
B-1	0,80	80,0	1,02	0,77	2,18	71	93	5,5	0
B-2	0,88	598,0	1,67	1,12	1,56	68	103	5,5	0
B-3	0,92	374,0	2,67	1,55	1,27	68	113	5,5	0
B-4	0,98	190,0	5,26	3,32	1,08	63	121	5,5	0
B-5	1,04	107,0	9,35	6,9	1,18	73	122	5,5	0
B-6	1,11	62,4	16,0	17,5	1,64	99	128	5,5	0

Tabela 2 - Resumo dos Resultados dos Transientes com o Núcleo D-12/25 no reator SPERT IV (continuação)

B-7	1,15	49,8	20,1	25,1	1,83	113	124	5,5	0
B-8	1,26	29,6	33,8	68,5	3,00	136	141	5,5	0
B-9	1,40	19,6	51,0	147,0	3,23	148	162	5,5	0
B-10	1,53	15,8	66,3	220,0	4,40	160	165	5,5	0
B-11	1,54	14,5	69,0	247,0	4,40	165	178	5,5	0
B-12	1,68	11,7	85,5	350,0	4,84	175	179	5,5	0
B-13	1,82	10,1	99,0	467,0	4,94	183	191	5,5	0
B-14	1,91	8,48	118,0	615,0	5,66	170	212	5,5	0
B-15	2,00	7,8	128,0	705,0	6,35	167	270	5,5	0
B-16	2,14	7,0	143,0	875,0	8,50	170	338	5,5	0
B-17	1,40	21,3	47,0	145,0	3,49	131	138	0,6	0
B-18	1,68	12,0	83,4	340,0	4,43	155	156	0,6	0
B-19	1,91	8,8	113,0	570,0	5,18	165	184	0,6	0
B-20	0,88	560,0	1,79	(a)	(a)	(a)	97	5,5	113,5
B-21	1,14	54,2	18,4	21,5	2,32	103	125	5,5	113,5
B-22	1,66	11,9	84,0	322,0	5,26	163	169	5,5	113,5
B-23	1,80	10,1	99,0	435,0	5,97	165	173	5,5	113,5
B-24	0,88	529,0	1,89	(a)	(a)	(a)	99	5,5	227,0
B-25	1,04	103,0	9,60	7,5	1,30	64	110	5,5	227,0
B-26	1,14	54,5	18,3	22,5	2,35	124	136	5,5	227,0
B-27	1,39	20,0	50,0	130,0	4,94	138	144	5,5	227,0
B-28	1,66	12,3	81,3	292,0	5,49	160	168	5,5	227,0
B-29	1,80	10,4	96,1	425,0	6,05	167	184	5,5	227,0
B-30	0,88	531,0	1,89	(a)	(a)	(a)	105	5,5	567,5
B-31	1,14	52,1	19,2	22,5	2,51	191	110	5,5	567,5
B-32	1,66	12,2	82,0	320,0	5,41	169	176	5,5	567,5
B-33	1,80	10,0	100,0	435,0	6,13	182	182	5,5	567,5
—	0,87	554,0	1,81	(a)	(a)	(a)	149 ^b	5,5	1135,0
B-34	0,88	516,0	1,94	(a)	(a)	(a)	93	5,5	1135,0
B-35	1,05	104,0	9,62	9,8	1,79	58	102	5,5	1135,0
B-36	1,14	49,3	20,3	30,2	2,71	90	108	5,5	1135,0
—	1,14	47,2	21,2	31,5	—	—	129 ^b	5,5	1135,0
B-37	1,39	20,7	48,3	169,0	4,78	149	152	5,5	1135,0
—	1,39	20,2	49,5	173,0	—	—	167 ^b	5,5	1135,0
—	1,53	14,3	70,0	267,0	—	—	177 ^b	5,5	1135,0
B-38	1,66	12,2	82,0	370,0	5,26	167	173	5,5	1135,0
—	1,66	11,5	87,0	373,0	—	—	184 ^b	5,5	1135,0
B-39	1,80	10,1	99,0	505,0	6,08	185	192	5,5	1135,0
—	1,80	10,0	100,0	481,0	—	—	200 ^b	5,5	1135,0
—	1,80	9,7	103,0	497,0	—	—	270 ^b	5,5	1135,0

onde:

- R_i = Inserção inicial de reatividade (da curva de valor de barra de controle)
- τ = Período do reator
- α = $1/\tau$
- $\Phi(t_m)$ = Pico de potência
- $\theta(t_m)$ = Temperatura da superfície da placa combustível no instante de pico de potência
- θ_{max} = Temperatura máxima da superfície da placa combustível
- $E(t_m)$ = Energia liberada no instante de pico de potência
- (a) - Potência não exibiu pico
- b - Todos os resultados de temperatura máxima para este teste são de canais

3. SIMULAÇÃO COM O CÓDIGO PARET

Para a comparação teórica foi utilizado o código PARET [3], que foi desenvolvido para analisar os resultados experimentais do reator pressurizado SPERT III. Modificações recentes [4] incluíram neste código a possibilidade de convecção natural, escoamento reverso e parada de bomba.

Para a simulação com o código PARET, foram escolhidos os transientes de período de 50 ms com taxas de vazão volumétrica de 113,5, 227,0, 567,6 e 1135,0 m³/s (testes B-21, B-26, B-31 e B-36), ver figura 2. Foi também realizado uma simulação, apenas com convecção natural com período de 50 ms (teste B-7), para comparação com o transiente com vazão volumétrica, figura 3.

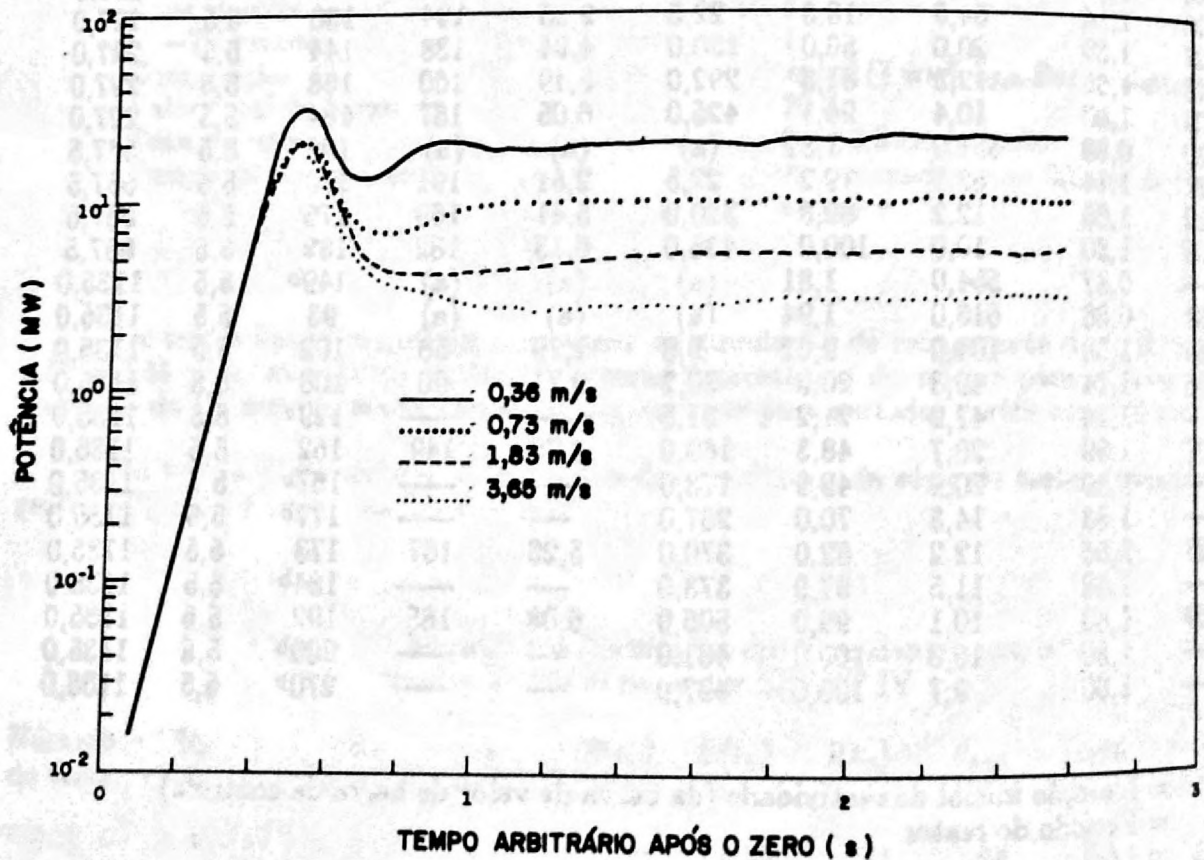


Figura 2. Potência em Função do Tempo para Excursão de 50 ms para Diferentes Vazões Volumétricas

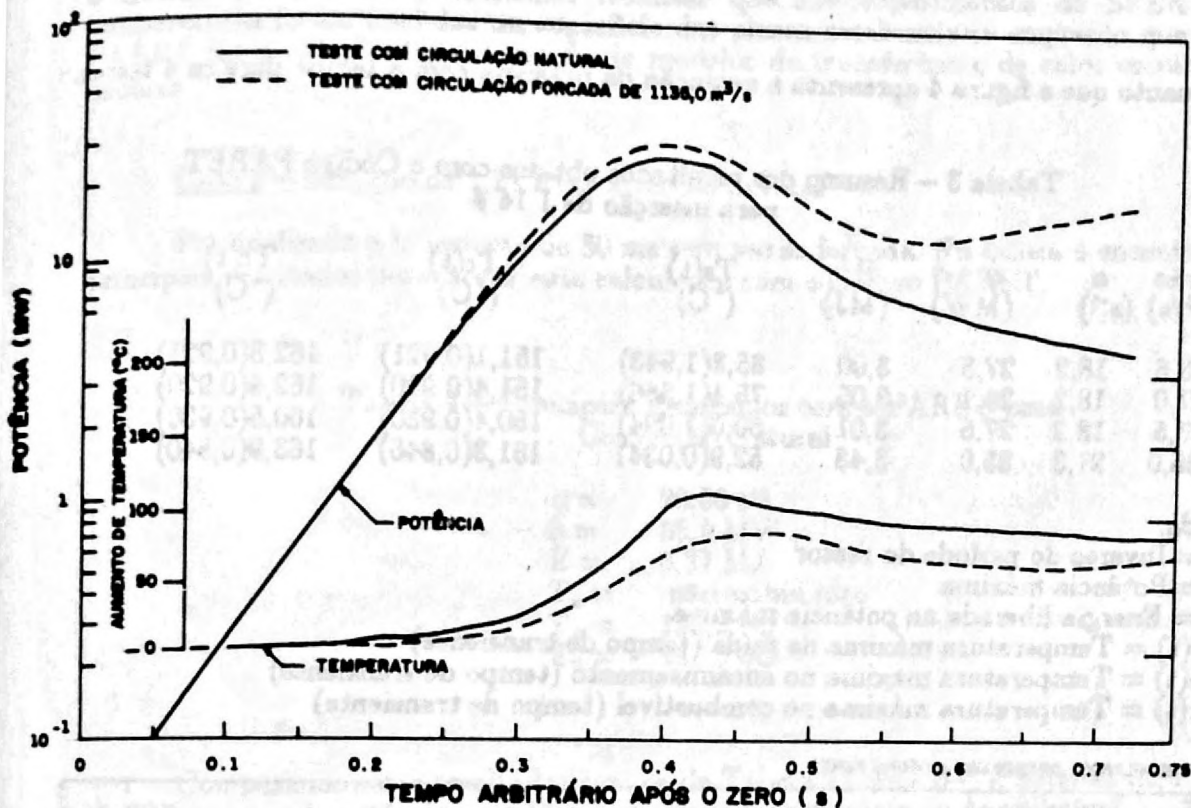


Figura 3. Potência e Temperatura da Placa Combustível para Teste com Período de 50 ms com e sem Vazão Forçada.

Todas as simulações foram realizadas usando as seguintes correlações de transferência de calor:

Ecoamento monofásica	Seider-Tate
Início ebulição nucleada	Bergles-Rohsenow
Ecoamento bifásico	Mc Adams
Fluxo de calor crítico	Tong

O núcleo foi dividido em duas regiões, representando um canal médio e um canal quente, sendo que os resultados aqui apresentados aqui são para o canal quente.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os transientes analisados foram divididos em dois casos, conforme a inserção de reatividade:

Caso 1 - inserção de 1.14 \$, com convecção forçada.

Foram analisados 4 transientes cujos resultados principais encontram-se na tabela 3

enquanto que a figura 4 apresenta a evolução da potência com o tempo para os 4 testes.

Tabela 3 - Resumo dos resultados obtidos com o Código PARET para inserção de 1.14 \$

Vazão (m ³ /s)	α (s ⁻¹)	ϕ (MW)	E (MJ)	T _s (t) (°C)	T _e (t) (°C)	T _c (t) (°C)
113,5	18,2	27,5	3,00	85,3(1,943)	151,1(0,921)	162,8(0,921)
227,0	18,2	28,1	3,05	75,1(1,386)	151,4(0,920)	162,4(0,920)
567,5	18,2	27,5	3,01	60,0(1,094)	150,4(0,930)	160,5(0,930)
1335,0	21,3	35,0	3,43	52,9(0,034)	151,3(0,845)	163,9(0,840)

onde:

α = Inverso do período do reator

ϕ = Potência máxima

E = Energia liberada na potência máxima

T_s(t) = Temperatura máxima de saída (tempo de transiente)

T_e(t) = Temperatura máxima no encamisamento (tempo de transiente)

T_c(t) = Temperatura máxima no combustível (tempo de transiente)

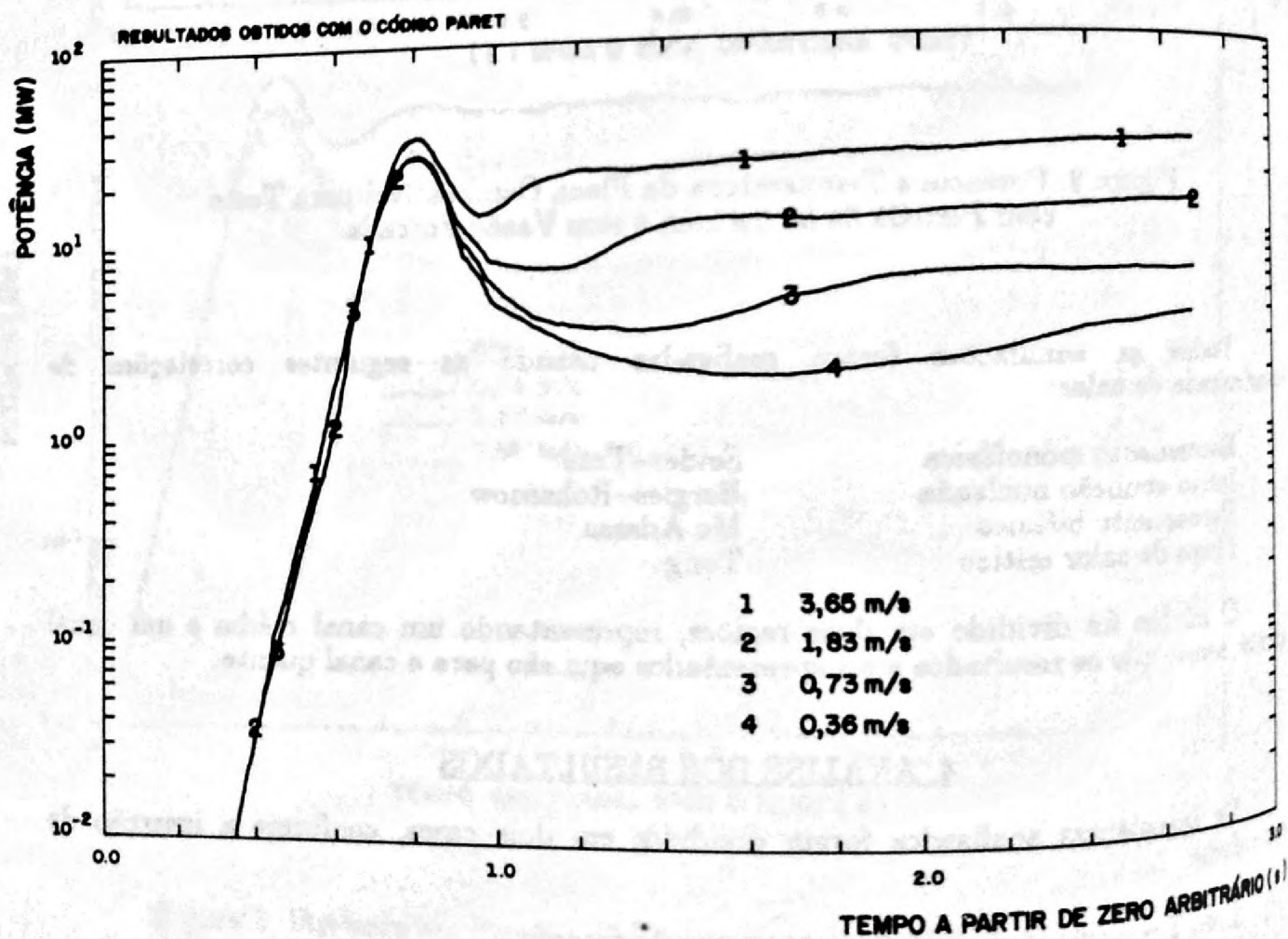


Figura 4. Evolução Temporal da Potência Obtida com o Código com o PARET

Comparando os resultados obtidos com o Código PARET (Figura 4) e os resultados experimentais (Figura 2), nota-se uma diferença no pico de potência da ordem de 15% para a vazão máxima, e da ordem de 20% para as outras vazões. Observa-se também a distinção do nível de equilíbrio para as diferentes vazões.

Com relação as temperaturas, observa-se uma diferença de 20% nos resultados com o Código PARET. É interessante ressaltar que nos experimentos do SPERT IV, as temperaturas foram medidas na superfície das placas combustíveis enquanto que o Código PARET faz o cálculo destas através de modelos de transferência de calor escolhidos pelo usuário.

Caso 2 - Inserção de 1.14 \$ - convecção natural.

Foi analisado o transiente de 50 ms sem vazão forçada. Na tabela 4 encontram-se os principais resultados deste transiente calculados com o Código PARET.

Tabela 4 - Principais Resultados com o PARET para Convecção Natural

$\alpha =$	20,80 s ⁻¹
$\phi =$	35,9 MW
$E =$	3,37 MJ
$T_s =$	não exibiu pico
$T_e =$	133,2 oC
$T_c =$	147,7 oC

Comparando estes resultados com os da Tabela 2 (teste B-7), nota-se uma diferença de 30% no pico de potência e de 16% na temperatura máxima do combustível.

A figura 5 apresenta uma comparação dos transientes sem vazão e com circulação forçada de 1135,0 m³/s. Pode-se notar que para convecção natural o pico de potência foi 2,5% maior, porem atingindo um nível de equilíbrio de potência inferior ao caso com vazão forçada, como indicado na Figura 3.

É importante ressaltar que para todos os casos analisados, o Código acusou a presença de ebulição nucleada ao longo do transiente. Qualitativamente, os resultados da simulação foram bem representados, lembrando que a diferença numérica encontrada pode ser devido a não ter sido levado em conta a contribuição proveniente do efeito Doppler.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho analisou os transientes de inserção de reatividade efetuados no reator SPERT IV comparando-os com os resultados obtidos com o Código PARET. O Código PARET reproduziu com desvios de 15 a 30% os resultados obtidos no núcleo D-12/25, para os transientes com circulação forçada e natural. A evolução temporal da potência foi qualitativamente bem representada atingindo um nível de equilíbrio de potência igual ao obtido nos experimentos. Os desvios nos picos de potência podem estar associados à não consideração do efeito Doppler nesta análise.

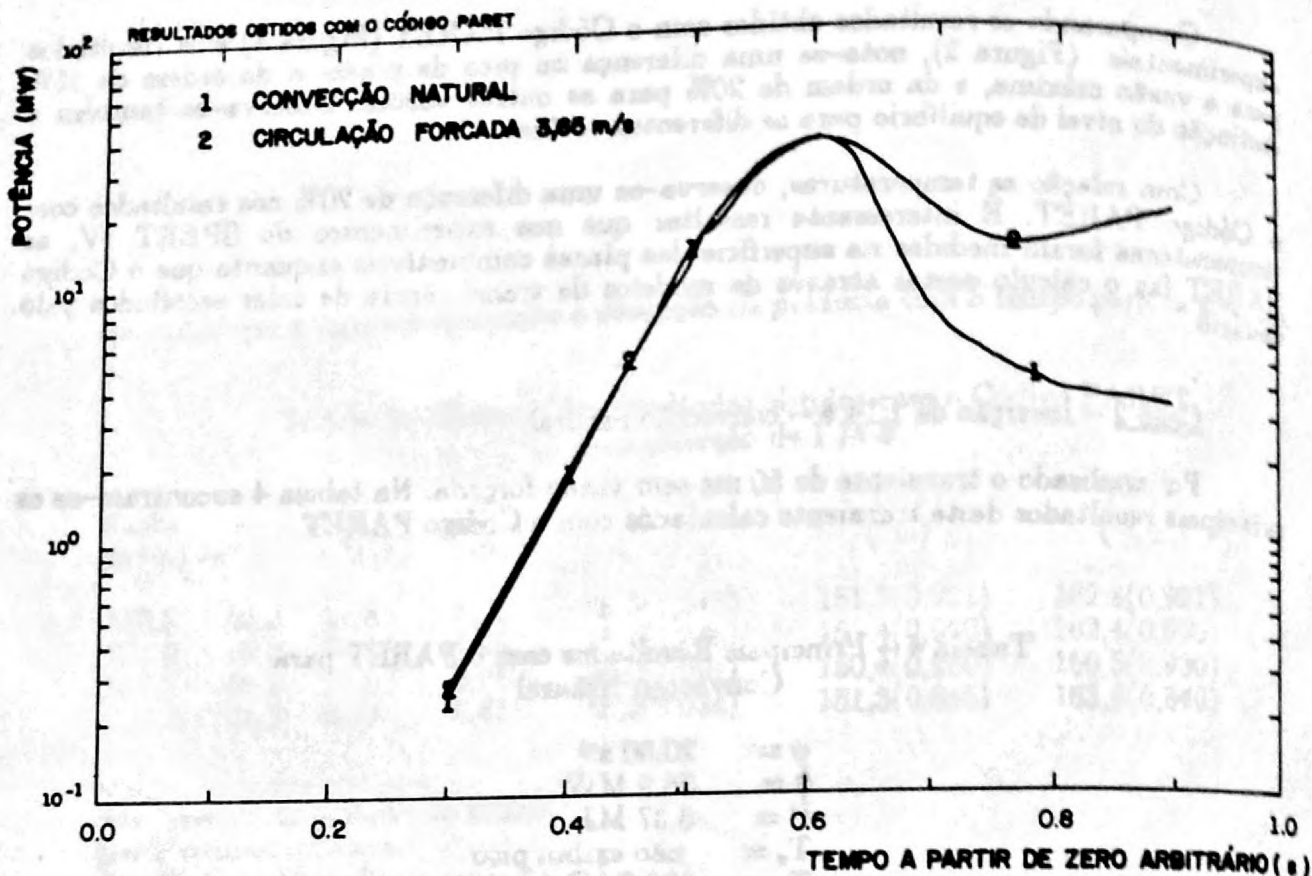


Figura 5. Resultados do PARET da Evolução da Potência com o Tempo para 50 ms com e sem Circulação Forçada

Todavia, como uma primeira aplicação da nova versão do Código PARET para avaliar transientes de inserção de reatividade, os resultados obtidos podem ser considerados satisfatórios. Mesmo assim, testes de sensibilidade dos modelos neutrônicos e termohidráulicos devem ser aprimorados, de modo a avaliar o código em questão.

A fim de verificar a potencialidade do Código PARET na análise de transientes de inserção de reatividade, outras comparações teórico-experimental estão em curso, particularmente aquelas relacionadas com os reatores do projeto SPERT.

5. REFERÊNCIAS

- [1] R.E. Heffner et al, *SPERT IV facility*, IDO-16745 (1962)
- [2] J.G. Crocker & L.A. Stephan, *Reactor Power Excursion Test in SPERT IV Facility*, ID17000, Idaho National Engineering Laboratory (1964).
- [3] C.F. Oberchain, *PARET - A Program for the Analysis of Reactor Transients*, IDO 17282, Idaho National Engineering Laboratory (1969)
- [4] *PARET Code Revisions*, Memo from R.S. Smith to A. Travelli, December 7, 1987.