

COEFICIENTE DE VAZIO POSITIVO NO RBMK: POR QUE O REATOR 4 FICOU INSTÁVEL

Entenda como o aumento da fração de vapor podia elevar a reatividade no RBMK, por que o efeito dependia do estado do núcleo e qual foi seu papel no Reator 4.

SUMÁRIO

1. O QUE SIGNIFICA “VAZIO” EM UM REATOR NUCLEAR?	3
2. O QUE É COEFICIENTE DE VAZIO?	4
3. COEFICIENTE DE VAZIO, EFEITO TOTAL E PONTO DE OPERAÇÃO	4
4. QUAL A DIFERENÇA ENTRE COEFICIENTE DE VAZIO POSITIVO E NEGATIVO?	5
5. POR QUE EM MUITOS REATORES O COEFICIENTE DE VAZIO TENDE A SER NEGATIVO?	
6. POR QUE NO RBMK O EFEITO PODIA SER POSITIVO?	6
7. ÁGUA, VAPOR E GRAFITE: A COMBINAÇÃO CRÍTICA	6
8. A CADEIA DE REALIMENTAÇÃO POSITIVA	7
9. O QUE O INSAG-7 DIZ SOBRE O COEFICIENTE DE VAZIO POSITIVO?	7
10. POR QUE O COEFICIENTE DE VAZIO DEPENDIA DA CONFIGURAÇÃO DO NÚCLEO?	8
11. O EFEITO DE VAZIO NÃO ERA UNIFORME EM TODO O NÚCLEO	9
12. O PAPEL DA ORM NO COEFICIENTE DE VAZIO POSITIVO	9
13. O PAPEL DAS HASTES DE CONTROLE COM GRAFITE	10
14. O TESTE DA TURBINA E O AUMENTO DO VAPOR	10
15. O COEFICIENTE DE VAZIO POSITIVO CAUSOU SOZINHO O ACIDENTE?	11
16. O QUE MUDOU NOS RBMK DEPOIS DE CHERNOBYL?	12
17. O QUE AS MODIFICAÇÕES POSTERIORES REVELAM SOBRE A CAUSA DO PROBLEMA?	12
18. LIÇÃO DE ENGENHARIA: FEEDBACK POSITIVO PRECISA DE BARREIRAS FORTES	13
19. CONCLUSÃO: MAIS VAPOR PODIA SIGNIFICAR MAIS POTÊNCIA	13

O **coeficiente de vazio positivo** era a característica pela qual, em determinadas configurações do RBMK, o aumento da fração de vapor dentro dos canais podia elevar a reatividade do núcleo. Em termos diretos: a água líquida absorvia parte dos nêutrons; o vapor absorvia menos; o grafite continuava moderando. Assim, mais vapor podia deixar mais nêutrons disponíveis para novas fissões.

Isso criava uma possibilidade de **realimentação positiva**: aumento de potência produzia mais calor; mais calor gerava mais vapor; mais vapor podia aumentar a reatividade; e o aumento de reatividade elevava novamente a potência. Em vez de amortecer a perturbação, a física do sistema podia amplificá-la.

Essa explicação, porém, exige precisão. O efeito de vazio não era uma constante simples nem significava que qualquer bolha de vapor faria o reator disparar. Sua intensidade dependia da configuração do núcleo, da presença de absorvedores, da queima do combustível, da distribuição espacial de potência e da [margem operacional de reatividade – ORM](#).

No Reator 4, o efeito se tornou crítico porque encontrou um núcleo já desfavorável: potência reduzida, [envenenamento por xenônio](#), muitas hastes retiradas, baixa ORM, distribuição de potência deformada e um ensaio que alterava simultaneamente condições elétricas e térmico-hidráulicas.

Este artigo explica o que “vazio” significava, por que o RBMK podia apresentar feedback positivo, como o efeito variava ao longo do ciclo do núcleo, de que forma o teste da turbina modificou as condições de circulação e por que as mudanças posteriores nos RBMK confirmaram a relevância do problema de projeto.

1. O QUE SIGNIFICA “VAZIO” EM UM REATOR NUCLEAR?

No contexto de um reator nuclear refrigerado por água, “vazio” não significa um buraco absoluto dentro do núcleo. Significa a presença de vapor, bolhas ou fração de vapor no fluido refrigerante.

No RBMK, a água entrava pela parte inferior dos canais de combustível, removia calor dos conjuntos combustíveis e subia pelo canal. Ao absorver calor da fissão nuclear, parte dessa água fervia e se transformava em vapor. O que saía dos canais era uma mistura de água e vapor, enviada aos tambores separadores.

Assim, quando falamos em “vazio” no RBMK, estamos falando da **substituição parcial da água líquida por vapor dentro dos canais**.

Essa substituição era importante porque a água líquida e o vapor não têm o mesmo efeito sobre os nêutrons. A água líquida absorve mais nêutrons do que o vapor. Portanto, quando a água líquida se transforma em vapor, o balanço neutrônico do reator muda.

2. O QUE É COEFICIENTE DE VAZIO?

O **coeficiente de vazio** mede como a reatividade do reator muda quando aumenta a fração de vapor no refrigerante.

Em linguagem simples:

- se mais vapor reduz a reatividade, o coeficiente de vazio é negativo;
- se mais vapor aumenta a reatividade, o coeficiente de vazio é positivo.

Esse detalhe muda tudo. Um coeficiente negativo tende a produzir um comportamento estabilizador: quando a potência sobe e mais vapor aparece, a reatividade cai, ajudando a conter a elevação de potência.

Já um coeficiente positivo pode produzir o efeito oposto: quando a potência sobe e mais vapor aparece, a reatividade aumenta, fazendo a potência subir ainda mais.

É por isso que o coeficiente de vazio positivo era uma característica crítica do RBMK.

3. COEFICIENTE DE VAZIO, EFEITO TOTAL E PONTO DE OPERAÇÃO

O coeficiente de vazio descreve a sensibilidade da reatividade a uma alteração da fração de vapor em determinada condição. Ele não deve ser confundido com o **efeito total de vazio**, que representa a alteração acumulada de reatividade entre dois estados do refrigerante.

Essa distinção é importante porque a resposta do núcleo não era linear em toda a faixa de operação. Um valor medido ou calculado em determinada potência, composição de combustível e configuração de absorvedores não podia ser aplicado automaticamente a qualquer outro regime.

Na prática, o mesmo aumento de vapor podia produzir consequências diferentes conforme o ponto de operação. Por isso, a avaliação de segurança precisava considerar não apenas uma propriedade nominal do projeto, mas também o estado instantâneo do núcleo, suas margens e a velocidade do transiente.

Sistemas SCADA

Em sistemas críticos, tendências de processo, estados operacionais e margens precisam ser apresentados de forma contextualizada, com histórico e correlação entre variáveis.

[Conheça a solução de Sistemas SCADA](#)

4. QUAL A DIFERENÇA ENTRE COEFICIENTE DE VAZIO POSITIVO E NEGATIVO?

Para entender a diferença, pense no reator como um sistema de controle.

Em um sistema com **feedback negativo**, uma perturbação tende a ser compensada. Se a potência sobe demais, algum efeito físico tende a reduzi-la. Isso não elimina a necessidade de sistemas de proteção, mas ajuda a estabilizar o comportamento.

Em um sistema com **feedback positivo**, uma perturbação tende a ser amplificada. Se a potência sobe, algum efeito físico pode fazê-la subir ainda mais. Esse tipo de comportamento exige barreiras de controle muito fortes, rápidas e confiáveis.

No caso do coeficiente de vazio:

- **coeficiente de vazio negativo:** mais vapor reduz a reatividade;
- **coeficiente de vazio positivo:** mais vapor aumenta a reatividade.

O RBMK podia apresentar coeficiente de vazio positivo em determinadas condições de operação. Isso não significa que o reator estivesse permanentemente fora de controle, mas que alguns regimes dependiam fortemente de margens, procedimentos e sistemas de supervisão capazes de reconhecer estados desfavoráveis.

Sistemas Digitais de Supervisão e Controle

A supervisão de sistemas críticos precisa relacionar medições, estados, tendências e limites de forma compreensível para a equipe técnica.

[Conheça os Sistemas Digitais de Supervisão e Controle](#)

5. POR QUE EM MUITOS REATORES O COEFICIENTE DE VAZIO TENDE A SER NEGATIVO?

Em muitos reatores, a água desempenha duas funções centrais: ela refrigera o núcleo e também atua como moderador de nêutrons.

Moderador é o material que desacelera nêutrons rápidos liberados na fissão, tornando-os mais eficientes para provocar novas fissões no urânio-235. Quando a água está presente, ela ajuda a manter a reação em cadeia em condições adequadas.

Se essa água começa a ferver e vira vapor, sua densidade diminui. Com menos água líquida, há menos moderação. Como consequência, menos nêutrons ficam na faixa de energia mais favorável à fissão. A tendência é a reatividade cair.

Esse comportamento é estabilizador: mais vapor tende a reduzir a reação nuclear.

No RBMK, porém, a combinação era diferente.

6. POR QUE NO RBMK O EFEITO PODIA SER POSITIVO?

No RBMK, o principal moderador não era a água. Era o **grafite**.

A água tinha função de refrigerante e também absorvia parte dos nêutrons. Mas quem continuava desacelerando os nêutrons, mesmo quando a água virava vapor, era o grafite do núcleo.

Essa separação entre moderador e refrigerante é a chave do problema:

- 1 a água líquida absorvia parte dos nêutrons;
- 2 quando a água virava vapor, essa absorção diminuía;
- 3 o grafite continuava moderando os nêutrons;
- 4 mais nêutrons ficavam disponíveis para provocar novas fissões;
- 5 a reatividade podia aumentar.

Em outras palavras, no RBMK a perda parcial de água líquida não eliminava a moderação, porque o grafite continuava presente. Mas reduzia a absorção de nêutrons pela água. O resultado podia ser aumento de reatividade.

Essa é a essência do **coeficiente de vazio positivo no RBMK**.

7. ÁGUA, VAPOR E GRAFITE: A COMBINAÇÃO CRÍTICA

A combinação água-vapor-grafite tornava o RBMK muito diferente de reatores em que a água é, ao mesmo tempo, refrigerante e moderador dominante.

No RBMK:

- o grafite desacelerava os nêutrons;
- a água removia calor dos canais de combustível;
- a água líquida também absorvia parte dos nêutrons;
- o vapor absorvia menos nêutrons que a água líquida;
- o grafite continuava moderando mesmo com mais vapor nos canais.

Essa arquitetura podia ser eficiente para produzir energia em regime normal, mas se tornava sensível em certas condições, especialmente quando o reator operava com baixa margem de controle.

O problema não era a existência de vapor em si. O RBMK era um reator de água em ebulição; produzir vapor fazia parte do seu funcionamento normal. O problema era o efeito que o aumento da fração de vapor podia exercer sobre a reatividade em determinadas configurações do núcleo.

8. A CADEIA DE REALIMENTAÇÃO POSITIVA

O coeficiente de vazio positivo é perigoso porque pode formar uma cadeia de realimentação positiva.

A sequência pode ser descrita assim:

- 1 a potência aumenta;
- 2 mais calor é produzido no combustível;
- 3 mais água ferve dentro dos canais;
- 4 a fração de vapor aumenta;
- 5 a absorção de nêutrons pela água diminui;
- 6 mais nêutrons ficam disponíveis;
- 7 a reatividade aumenta;
- 8 a potência sobe ainda mais.

Esse ciclo é o oposto de um comportamento autocorretivo. Em vez de amortecer a perturbação, ele pode amplificá-la.

Em operação normal, sistemas de controle, margens e procedimentos deveriam impedir que essa realimentação se tornasse dominante. No Reator 4, porém, várias barreiras já estavam comprometidas quando o teste começou.

9. O QUE O INSAG-7 DIZ SOBRE O COEFICIENTE DE VAZIO POSITIVO?

O INSAG-7 registra o coeficiente de vazio positivo como uma característica importante do RBMK e como um dos fatores centrais da sequência do acidente.

Na tabela de características de projeto do RBMK da Unidade 4, o relatório apresenta o coeficiente de vazio de reatividade no ponto de trabalho como positivo. O documento também registra que a dependência da reatividade em relação à densidade do refrigerante era influenciada pela configuração de absorvedores no núcleo.

Há um ponto importante de precisão técnica: o coeficiente de vazio não era uma constante simples e imutável em qualquer condição. Ele dependia da configuração do núcleo, da presença de absorvedores, da queima do combustível, da ORM e do regime operacional.

O INSAG-7 afirma que, durante o carregamento inicial do núcleo, com absorvedores adicionais contendo boro, a vaporização do refrigerante em um canal podia produzir efeito negativo de reatividade. Já durante operação normal com reabastecimento em potência e determinada margem de reatividade, o aumento da qualidade do vapor podia provocar aumento positivo de reatividade.

Essa nuance é essencial: o perigo não estava em uma frase simplista como “vapor sempre aumenta a potência”. O perigo estava no fato de que, em determinadas condições reais de operação do RBMK, mais vapor podia aumentar a reatividade de forma significativa.

10. POR QUE O COEFICIENTE DE VAZIO DEPENDIA DA CONFIGURAÇÃO DO NÚCLEO?

O núcleo do RBMK era grande, heterogêneo e mudava ao longo do tempo. Combustível era substituído em operação, absorvedores adicionais podiam estar presentes ou ausentes, o xenônio variava, a distribuição de potência mudava e as hastes de controle ocupavam posições diferentes.

Isso significa que o efeito da formação de vapor dependia da condição específica do núcleo. Em uma configuração, a vaporização podia ter efeito menor ou até estabilizador. Em outra, podia gerar aumento perigoso de reatividade.

Essa característica é crítica para engenharia: um sistema não deve ser avaliado apenas pelo comportamento médio ou pelo cenário ideal. É preciso avaliar condições-limite, transientes, estados degradados e combinações de variáveis que podem reduzir margens de segurança.

No Reator 4, a configuração antes do acidente era especialmente desfavorável: baixa potência, xenônio, muitas hastes retiradas, baixa ORM e teste em andamento. Era exatamente o tipo de cenário em que o coeficiente de vazio positivo se tornava mais perigoso.

11. O EFEITO DE VAZIO NÃO ERA UNIFORME EM TODO O NÚCLEO

O núcleo do RBMK tinha grandes dimensões e centenas de canais distribuídos por diferentes regiões. Fluxo de água, geração de vapor, queima do combustível, concentração de xenônio e posição das hastes não eram idênticos em todos os pontos.

Por isso, a potência global não descrevia completamente o estado do reator. Duas condições com a mesma potência total podiam apresentar distribuições axiais e radiais diferentes, com regiões mais sensíveis à formação de vapor do que outras.

O problema de segurança não era apenas saber quanto vapor existia em média, mas compreender onde ele estava se formando, como a distribuição mudava e quais margens efetivas permaneciam disponíveis naquele estado específico.

Owner's Engineering

A avaliação independente ajuda a verificar se premissas, interfaces e cenários degradados foram tratados de forma coerente ao longo do ciclo do empreendimento.

[Conheça o serviço de Owner's Engineering](#)

12. O PAPEL DA ORM NO COEFICIENTE DE VAZIO POSITIVO

A **ORM**, ou margem operacional de reatividade, era a capacidade efetiva restante do sistema de controle para compensar reatividade. Quando a ORM estava adequada, o reator tinha maior margem para lidar com perturbações.

Quando a ORM estava baixa, pequenas alterações de vapor, temperatura, fluxo ou distribuição de potência podiam ter efeito muito maior. O reator ficava mais sensível e menos tolerante a variações.

No Reator 4, a ORM estava abaixo do limite seguro antes da sequência final. Isso significa que o sistema tinha pouca capacidade efetiva de compensar a realimentação positiva causada pelo aumento de vapor.

Por isso, o coeficiente de vazio positivo e a baixa ORM precisam ser analisados juntos. O coeficiente de vazio positivo era a tendência física perigosa. A baixa ORM era a perda de margem que tornava essa tendência muito mais difícil de conter.

13. O PAPEL DAS HASTES DE CONTROLE COM GRAFITE

As hastes de controle antigas do RBMK tinham deslocadores de grafite. Esses deslocadores existiam por razões de eficiência neutrônica: substituíam água absorvedora por grafite moderador em certas regiões dos canais.

Quando muitas hastes estavam retiradas e a ORM estava baixa, a inserção emergencial começava em uma configuração desfavorável. O deslocador de grafite podia deslocar água em regiões do núcleo antes que a seção absorvedora tivesse efeito dominante.

Esse mecanismo se somava ao problema do vapor. Ambos envolviam a mesma lógica neutrônica: substituir água, que absorvia nêutrons, por uma condição em que menos nêutrons eram absorvidos e a moderação por grafite permanecia eficaz.

Essa relação foi aprofundada no artigo [Chernobyl: por que as hastes de controle do RBMK tinham grafite?](#). O ponto central aqui é que o coeficiente de vazio positivo, a baixa ORM e as hastes com grafite não eram problemas isolados. Eles interagiam no mesmo núcleo.

14. O TESTE DA TURBINA E O AUMENTO DO VAPOR

O teste realizado no Reator 4 buscava verificar se a energia gerada pela inércia da turbina em desaceleração seria suficiente para alimentar bombas essenciais por alguns segundos, até a entrada dos geradores diesel de emergência.

À primeira vista, parecia um teste elétrico. Mas o INSAG-7 é claro ao afirmar que é incorreto qualificar esses testes como puramente elétricos, porque envolviam mudanças no circuito de alimentação de equipamentos principais e intervenções em proteções e intertravamentos normais.

Do ponto de vista do núcleo, o teste era sensível porque envolvia circulação de água, alimentação de bombas, fechamento de válvulas de vapor, variações de fluxo, pressão, temperatura e formação de vapor. A água na entrada do núcleo estava próxima do ponto de ebulição, e pequenas mudanças hidráulicas podiam influenciar a quantidade de vapor nos canais.

Com o reator em baixa ORM e sujeito ao coeficiente de vazio positivo, o teste colocou perturbações hidráulicas sobre um sistema já instável.

O INSAG-7 destaca que o regime inicial do ensaio tinha características térmico-hidráulicas específicas: vazão de refrigerante elevada, baixa qualidade inicial do vapor e água na entrada do núcleo pouco abaixo da ebulição. Isso reduzia a distância entre o estado existente e uma alteração relevante da fração de vapor.

Durante a desaceleração do turbogerador, variáveis elétricas e de processo deixavam de evoluir de forma independente. A alimentação de bombas, a circulação, os níveis nos separadores, a pressão e a formação de vapor pertenciam à mesma sequência integrada.

Esse é um dos motivos pelos quais o relatório rejeita a classificação do ensaio como puramente elétrico. A mudança ocorria em uma interface entre disciplinas e precisava ser avaliada pelo comportamento do sistema completo, não apenas pelo desempenho do gerador.

Comissionamento e Aceite Técnico

Ensaio integrado deve considerar premissas, interfaces, condições iniciais, critérios de interrupção e evidências de desempenho do conjunto.

[Conheça o serviço de Comissionamento e Aceite Técnico](#)

15. O COEFICIENTE DE VAZIO POSITIVO CAUSOU SOZINHO O ACIDENTE?

Não. O coeficiente de vazio positivo foi um fator central, mas não explica sozinho o acidente.

O acidente resultou de uma combinação de fatores:

- projeto do RBMK com coeficiente de vazio positivo em determinadas condições;
- hastes de controle com deslocadores de grafite;
- baixa ORM;
- envenenamento por xenônio;
- recuperação de potência com retirada excessiva de hastes;
- teste conduzido em condição degradada;
- intervenções em sistemas de proteção e intertravamento;
- governança técnica insuficiente;
- cultura de segurança frágil.

O coeficiente de vazio positivo explica por que o aumento de vapor podia acelerar a reação. Mas a razão pela qual isso se tornou catastrófico está na combinação com os demais elos da corrente causal.

16. O QUE MUDOU NOS RBMK DEPOIS DE CHERNOBYL?

As modificações realizadas nos RBMK depois do acidente confirmam a importância do problema.

Segundo o INSAG-7, as medidas de melhoria incluíram:

- redução do coeficiente de vazio positivo;
- instalação de absorvedores adicionais no núcleo;
- aumento da ORM exigida para a faixa de 43 a 48 hastes;
- alteração do enriquecimento do combustível para 2,4% de urânio-235;
- modificação das hastes de controle;
- redução do tempo de inserção das hastes;
- implantação de proteção emergencial de ação rápida;
- melhor indicação da ORM no painel do operador;
- restrições a modos de operação inseguros.

Essas mudanças mostram que o coeficiente de vazio positivo não era apenas uma explicação teórica posterior. Ele era uma característica de projeto que precisou ser reduzida por medidas concretas de engenharia.

17. O QUE AS MODIFICAÇÕES POSTERIORES REVELAM SOBRE A CAUSA DO PROBLEMA?

As intervenções posteriores combinaram alterações no combustível, absorvedores, hastes, velocidade de proteção, indicação de margens e restrições operacionais. Essa combinação revela que a vulnerabilidade não pertencia a um único componente.

O objetivo era modificar simultaneamente a resposta física do núcleo, aumentar a reserva disponível, reduzir estados permissivos e tornar informações críticas mais visíveis. Em outras palavras, projeto, automação, procedimentos e governança precisaram ser tratados como uma única barreira de segurança.

Esse é um princípio aplicável a qualquer ativo complexo: quando um risco depende da interação entre subsistemas, uma correção localizada pode apenas deslocar o problema. Os requisitos precisam ser rastreados até testes, evidências, critérios de aceite e responsabilidades formais.

Gestão de Requisitos, Evidências e Critérios de Aceite

Requisitos técnicos precisam permanecer vinculados às decisões de projeto, verificações, evidências e critérios usados para autorizar a operação.

[Conheça a solução de Gestão de Requisitos e Critérios de Aceite](#)

18. LIÇÃO DE ENGENHARIA: FEEDBACK POSITIVO PRECISA DE BARREIRAS FORTES

O coeficiente de vazio positivo é um exemplo clássico de feedback positivo em um sistema crítico. Quando uma perturbação alimenta a si mesma, o sistema precisa de barreiras robustas para impedir crescimento descontrolado.

Em engenharia, isso vale muito além de reatores nucleares. Pode aparecer em sistemas elétricos, hidráulicos, térmicos, estruturais, de automação, telecomunicações, controle e proteção.

Algumas perguntas são fundamentais em qualquer sistema crítico:

- o sistema possui feedback positivo em alguma condição?
- esse feedback foi identificado em projeto?
- há instrumentos para monitorá-lo?
- há alarmes claros para o operador?
- há intertravamentos que impedem operação fora da margem?
- os testes integrados validaram cenários degradados?
- as proteções atuam mais rápido do que o transiente que precisam conter?

Esse é o tipo de análise que serviços como [Owner's Engineering](#), [comissionamento](#), [auditoria técnica](#), [due diligence técnica](#) e [FEL](#) ajudam a estruturar em projetos complexos.

Em sistemas críticos, não basta perguntar se o sistema funciona em condição normal. É preciso perguntar como ele se comporta quando margens desaparecem, proteções são solicitadas, variáveis interagem e transientes evoluem mais rápido que a resposta operacional.

19. CONCLUSÃO: MAIS VAPOR PODIA SIGNIFICAR MAIS POTÊNCIA

O coeficiente de vazio positivo tornou o Reator 4 perigoso porque, em determinadas condições do RBMK, a formação de vapor podia aumentar a reatividade em vez de reduzi-la.

A água líquida absorvia parte dos nêutrons. O vapor absorvia menos. O grafite continuava moderando. Assim, mais vapor podia deixar mais nêutrons disponíveis para novas fissões, elevando a potência e produzindo ainda mais vapor.

Esse mecanismo não explica sozinho Chernobyl, mas explica por que a condição do Reator 4 era tão instável. Com baixa ORM, muitas hastes retiradas, núcleo envenenado por xenônio, hastes com deslocadores de grafite e teste em andamento, o coeficiente de vazio positivo se tornou um dos elos decisivos da corrente causal.

Para continuar a jornada, aprofunde [o envenenamento por iodo e xenônio](#), [a redução da ORM](#), [o projeto das hastes de controle](#) e [a sequência entre o início do teste e a destruição do Reator 4](#).

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1*. Safety Series No. 75-INSAG-7. Vienna: IAEA, 1992.
- [2] SHTEYNBERG, N. A. et al. Causes and circumstances of the accident at Unit 4 of the Chernobyl Nuclear Power Plant. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *INSAG-7*, Annex I. Vienna: IAEA, 1992.
- [3] ABAGYAN, A. A. et al. Causes and circumstances of the accident and measures to improve the safety of plants with RBMK reactors. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *INSAG-7*, Annex II. Vienna: IAEA, 1992.
- [4] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Report on the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Station*. NUREG-1250. Washington, DC: NRC, 1987.
- [5] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Implications of the Accident at Chernobyl for Safety Regulation*. NUREG-1251. Washington, DC: NRC, 1987.
- [6] INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP. *Safety Culture*. INSAG-4. Vienna: IAEA, 1991.
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *RBMK Reactors*. Technical description and safety characteristics of pressure-tube graphite-moderated reactors.
- [8] CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT. *Sequence of events at Unit 4 on 25–26 April 1986*. Technical chronology compiled from operating records.
- [9] MUELLNER, Nikolaus. *Three Decades after Chernobyl: Technical and Institutional Lessons*. Vienna: University of Natural Resources and Life Sciences.
- [10] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *RBMK Reactors and Chernobyl*. Technical overview and subsequent safety modifications.

O que é coeficiente de vazio positivo? É a condição em que o aumento da fração de vapor no refrigerante eleva a reatividade do reator. No RBMK, isso podia ocorrer porque o vapor absorvia menos nêutrons do que a água líquida, enquanto o grafite continuava moderando. **O que significa vazio no RBMK?** Vazio significa a presença de vapor ou bolhas no refrigerante, isto é, a substituição parcial da água líquida por vapor dentro dos canais de combustível. **Por que o vapor podia aumentar a reatividade no RBMK?** A água líquida absorvia parte dos nêutrons, enquanto o vapor absorvia menos. Como o grafite continuava exercendo a moderação, mais nêutrons podiam permanecer disponíveis para novas fissões. **O coeficiente de vazio era sempre positivo?** Não. O efeito dependia da configuração do núcleo, da presença de absorvedores, da queima do combustível, da distribuição de potência e da margem operacional de reatividade. **Qual era a relação entre ORM e coeficiente de vazio?** Com ORM baixa, o reator tinha menor capacidade efetiva de compensar alterações de reatividade e se tornava mais sensível ao aumento da fração de vapor. **O coeficiente de vazio positivo causou sozinho o acidente?** Não. Ele foi um fator central, mas atuou em conjunto com baixa ORM, xenônio, hastes com deslocadores de grafite, condições do teste e falhas de governança técnica. **Por que o teste da turbina influenciou a formação de vapor?** O ensaio alterou condições de alimentação, circulação e comportamento térmico-hidráulico de um sistema que já operava com margens reduzidas e água próxima da ebulição na entrada do núcleo. **O que mudou nos RBMK depois de Chernobyl?** Foram adotadas medidas para reduzir o efeito de vazio, aumentar margens operacionais, modificar hastes, acelerar proteções, melhorar a indicação de parâmetros e restringir regimes inseguros.

Soluções

- [Sistemas SCADA](#)
- [Sistemas Digitais de Supervisão e Controle](#)
- [Gestão de Requisitos, Evidências e Critérios de Aceite](#)

Serviços de engenharia

- [Owner's Engineering](#)
- [Auditoria Técnica](#)
- [Comissionamento e Aceite Técnico](#)

Jornada sobre Chernobyl

- [Chernobyl: o que aconteceu e por que o Reator 4 explodiu](#)
- [Como funcionava o reator RBMK](#)
- [ORM em Chernobyl: a margem de reatividade do Reator 4](#)

- [Iodo, xenônio e envenenamento do núcleo](#)
- [Hastes de controle do RBMK e deslocadores de grafite](#)
- [Do início do teste à destruição do Reator 4](#)

Sobre a A3A Engenharia de Sistemas

Com 30 anos de história, a A3A Engenharia de Sistemas se consolidou como referência em serviços de Engenharia, oferecendo soluções integradas de Telecomunicações, Segurança Eletrônica, Segurança Digital e Instalações Elétricas.

A empresa atua em todas as etapas do ciclo de Engenharia, desde a elaboração de projetos e consultoria técnica até a implantação, manutenção e retrofit de sistemas, sempre em conformidade com as normas técnicas e melhores práticas do setor.