

ARQUITETURA DO RBMK: COMPONENTES E SISTEMAS DO REATOR DE CHERNOBYL

Conheça a arquitetura do RBMK-1000, seus canais, circuitos, blindagens, sistemas de controle e interfaces de engenharia no reator de Chernobyl.

SUMÁRIO

1. O RBMK NÃO ERA UM REATOR COMUM	3
2. O NÚCLEO DO RBMK: GRAFITE, CANAIS DE COMBUSTÍVEL E CANAIS DE CONTROLE	4
3. MÁQUINA DE CARGA E DESCARGA: O REABASTECIMENTO EM OPERAÇÃO	6
4. O COMBUSTÍVEL: URÂNIO, VARETAS E CONJUNTOS COMBUSTÍVEIS	6
5. A FISSÃO NUCLEAR: DE ONDE VEM O CALOR	6
6. DE ONDE VÊM OS PRIMEIROS NÊUTRONS?	7
7. IODO, XENÔNIO E ENVENENAMENTO DO REATOR	7
8. ÁGUA E GRAFITE: A COMBINAÇÃO QUE TORNAVA O RBMK DIFERENTE	8
9. HASTES DE CONTROLE: CONTROLE, SEGURANÇA E COMPROMISSO DE PROJETO	9
10. ÁGUA ENTRA POR BAIXO, VAPOR SAI POR CIMA	10
11. BOMBAS DE CIRCULAÇÃO: O CORAÇÃO HIDRÁULICO DO REATOR	11
12. DO CALOR AO MEGAWATT: O CICLO VAPOR-TURBINA-GERADOR	11
13. TAMPA DO REATOR, BLINDAGEM E CONTENÇÃO	12
14. O QUE TORNAVA O RBMK EFICIENTE	13
15. O QUE TORNAVA O RBMK VULNERÁVEL	14
16. O QUE MUDOU DEPOIS DE CHERNOBYL	14
17. A LIÇÃO DE ENGENHARIA DO PROJETO RBMK	15
18. CONCLUSÃO: O RBMK ERA EFICIENTE, MAS POUCO TOLERANTE AO ERRO EM CERTAS CONDIÇÕES	15
18.1. SOLUÇÕES	17
18.2. SERVIÇOS DE ENGENHARIA	17
18.3. JORNADA SOBRE CHERNOBYL	17

A arquitetura do RBMK-1000 era formada por um núcleo de grafite de grandes dimensões, atravessado por milhares de canais verticais independentes. Esses canais recebiam combustível, água de refrigeração, barras de controle, instrumentos e dispositivos auxiliares. Em vez de concentrar o núcleo dentro de um único vaso de pressão, o projeto distribuía as funções por uma extensa rede de tubos, coletores, válvulas, bombas e separadores de vapor.

No Reator 4 de Chernobyl, o núcleo tinha aproximadamente 7 metros de altura e 11,8 metros de diâmetro. Cerca de 1.660 canais eram destinados ao combustível. A estrutura ainda incluía canais de controle e instrumentação, blindagens biológicas, placas estruturais superior e inferior, máquina de reabastecimento, dois circuitos primários de refrigeração, quatro separadores de vapor, sistemas elétricos auxiliares e confinamentos localizados.

Portanto, este artigo responde à pergunta **como era o projeto do RBMK por dentro**: uma arquitetura modular, de grande escala e fortemente dependente da integração entre física do reator, estruturas, mecânica, hidráulica, instrumentação, automação, energia e operação. Essa organização oferecia vantagens industriais, mas também multiplicava interfaces e criava conflitos entre desempenho, controle e proteção.

O artigo anterior explica [como o reator RBMK transformava calor em eletricidade](#). Aqui, o foco é diferente: decompor os componentes, os sistemas e as decisões de engenharia que formavam a arquitetura física do Reator 4.

1. O RBMK NÃO ERA UM REATOR COMUM

RBMK é a sigla para *Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalny*, geralmente traduzido como “reator de grande potência do tipo canal”. O nome já revela uma das principais características do projeto: em vez de usar um grande vaso único de pressão, o RBMK era formado por muitos canais verticais independentes atravessando uma grande matriz de grafite.

Segundo o INSAG-7, o Reator 4 de Chernobyl era um reator heterogêneo, de canais de pressão, com moderador de grafite e refrigerante de água leve em ebulição. Em termos práticos, isso significa que a fissão nuclear acontecia no combustível inserido em canais individuais, enquanto o grafite ao redor desses canais desacelerava os nêutrons e a água removia calor do núcleo.

O RBMK-1000 tinha potência térmica de projeto de **3.200 MWt** e capacidade elétrica aproximada de **1.000 MWe brutos**, ou cerca de **925 MWe líquidos** por unidade. A usina de Chernobyl tinha quatro unidades em operação, o que representava aproximadamente

3.700 MWe líquidos instalados, além de duas unidades adicionais em construção no momento do acidente.

Essa capacidade tornava Chernobyl uma instalação estratégica para o sistema elétrico da Ucrânia soviética e para a segurança energética regional. A afirmação de que a usina atenderia 10% da demanda elétrica de toda a União Soviética, porém, não foi confirmada nos documentos analisados e deve ser tratada com cautela.

A arquitetura do RBMK integrava seis grandes conjuntos: núcleo e canais; estruturas e blindagens; refrigeração; geração de vapor e energia; controle e proteção; e sistemas auxiliares. A análise por sistemas mostra que o desempenho global dependia menos de um equipamento isolado e mais da coordenação entre disciplinas.

Essa organização aumentava a quantidade de interfaces entre engenharia civil, mecânica, elétrica, instrumentação, automação e operação. Cada decisão precisava ser verificada não apenas em sua disciplina de origem, mas também pelos efeitos produzidos nas demais.

Arquiteturas críticas precisam ser definidas antes que decisões isoladas se tornem irreversíveis.

O Front-End Loading estrutura alternativas, interfaces, riscos, requisitos de disponibilidade e critérios de decisão antes do detalhamento e da implantação.

Conhecer o serviço de Front-End Loading

2. O NÚCLEO DO RBMK: GRAFITE, CANAIS DE COMBUSTÍVEL E CANAIS DE CONTROLE

O núcleo do RBMK era uma estrutura de grandes dimensões. O Reator 4 tinha uma zona ativa com cerca de **7 metros de altura** e aproximadamente **12 metros de diâmetro**. Dentro dessa região ficavam os canais de combustível, os canais das hastes de controle, os canais de instrumentação e a massa de grafite moderador.

O INSAG-7 registra que havia **1.660 canais de combustível** no Reator 4. Esses canais eram tubos verticais de pressão, feitos de liga de zircônio, instalados dentro dos dutos verticais das colunas de grafite. Cada canal continha o combustível nuclear e era refrigerado individualmente por água.

Além dos canais de combustível, o sistema de controle e proteção do reator possuía **211 hastes móveis absorvedoras** em canais especiais, resfriados por um circuito de água independente. Havia também **24 hastes absorvedoras encurtadas**, inseridas por baixo, usadas para controle da distribuição axial de potência no núcleo.

Essa separação é essencial: os conjuntos combustíveis ficavam nos canais de combustível; as hastes de controle ficavam em canais próprios. Combustível e controle não ocupavam o mesmo canal.

O grafite formava o moderador. Sua função era desacelerar os nêutrons rápidos liberados na fissão nuclear, aumentando a probabilidade de novas fissões no urânio-235. O grafite não era o combustível e também não era o principal material de absorção de nêutrons. Ele era o elemento que tornava os nêutrons mais eficazes para sustentar a reação em cadeia.

O núcleo do RBMK-1000 tinha aproximadamente 7 metros de altura e 11,8 metros de diâmetro. Sua escala era significativamente maior que a de muitos outros reatores de potência, o que tornava a distribuição espacial de potência uma variável de projeto e de operação.

Os blocos de grafite formavam a estrutura moderadora e eram atravessados por canais verticais. Cerca de 1.660 canais recebiam conjuntos combustíveis e água pressurizada. Outros canais eram destinados às barras de controle, instrumentos, detectores e funções auxiliares. Essa organização criava uma malha extensa de componentes repetitivos, conexões superiores e inferiores e passagens através das blindagens.

O núcleo se apoiava sobre uma placa estrutural inferior e era fechado superiormente por uma placa pesada, atravessada pelas extensões dos canais. As paredes laterais exerciam função de blindagem biológica. A integridade do conjunto dependia da compatibilidade entre dilatação térmica, alinhamento, soldas, suportes, vedação e circulação do refrigerante.

Por ser muito grande, regiões distantes do núcleo apresentavam acoplamento relativamente fraco. Isso exigia instrumentação distribuída e controle espacial, como se diferentes zonas precisassem ser acompanhadas simultaneamente. O INSAG-7 destaca que uma indicação global de potência não era suficiente para representar todos os estados internos relevantes.

Projetos de grande porte precisam de revisão independente das interfaces, não apenas dos equipamentos principais.

A Engenharia do Proprietário integra disciplinas, verifica requisitos, acompanha decisões de projeto e reduz lacunas entre contratadas, fabricantes, construção e operação.

Conhecer o serviço de Owner's Engineering

3. MÁQUINA DE CARGA E DESCARGA: O REABASTECIMENTO EM OPERAÇÃO

Uma característica operacional importante do RBMK era a possibilidade de **reabastecimento com o reator em operação**. A máquina de carga e descarga, posicionada sobre o núcleo, permitia isolar canais específicos e substituir conjuntos combustíveis sem desligar toda a unidade.

Do ponto de vista de disponibilidade, isso era uma vantagem relevante. A usina poderia operar por longos períodos, substituindo combustível de forma localizada e mantendo a produção de energia elétrica. Do ponto de vista de projeto, isso reforçava a natureza do RBMK como um reator voltado para grande produção contínua.

Mas essa mesma arquitetura de canais também tornava o núcleo grande, espacialmente complexo e dependente de uma boa distribuição de potência. O RBMK não se comportava como um ponto único uniforme. Diferentes regiões do núcleo podiam ter condições diferentes de fluxo de nêutrons, vapor, temperatura e potência.

4. O COMBUSTÍVEL: URÂNIO, VARETAS E CONJUNTOS COMBUSTÍVEIS

O combustível do RBMK era formado por pastilhas de dióxido de urânio, com enriquecimento aproximado de **2% em urânio-235** no projeto original do Reator 4. Essas pastilhas ficavam encapsuladas em varetas metálicas de zircaloy.

A cadeia física era:

- pastilhas de dióxido de urânio;
- varetas combustíveis metálicas;
- conjunto combustível;
- canal vertical de combustível.

Segundo a documentação técnica, cada conjunto combustível incorporava **18 elementos combustíveis**. No RBMK, dois conjuntos eram posicionados em série dentro de cada canal de pressão.

É importante não confundir os conjuntos combustíveis com as hastes de controle. O combustível era substituído por equipamento de reabastecimento. As hastes de controle eram movimentadas pelo sistema de controle e proteção para regular a reação nuclear.

5. A FISSÃO NUCLEAR: DE ONDE VEM O CALOR

A energia do RBMK começava na fissão nuclear.

Quando um nêutron atinge um núcleo de **urânio-235**, esse núcleo pode absorver o nêutron e se tornar instável. Em seguida, ele se divide em fragmentos menores, liberando energia, radiação e novos nêutrons.

A sequência simplificada é:

- 1 um nêutron é absorvido por um núcleo de urânio-235;
- 2 forma-se um núcleo instável;
- 3 esse núcleo se divide em fragmentos de fissão;
- 4 são liberados calor, radiação e novos nêutrons;
- 5 os novos nêutrons podem atingir outros núcleos de urânio-235;
- 6 a reação em cadeia continua.

Essa energia aparece principalmente como calor no combustível. A função do circuito de refrigeração é retirar esse calor, transformá-lo em vapor e permitir que ele seja convertido em energia mecânica e depois em energia elétrica.

Os nêutrons liberados na fissão são fundamentais. Parte deles aparece quase imediatamente; outra parte surge de forma retardada, a partir do decaimento de certos produtos de fissão. Esses nêutrons retardados são essenciais para o controle do reator, porque tornam a reação nuclear controlável em escala compatível com sistemas de instrumentação, automação e operação humana.

6. DE ONDE VÊM OS PRIMEIROS NÊUTRONS?

Durante a partida de um reator nuclear, existem fontes de nêutrons que permitem iniciar e monitorar a reação. Também há uma pequena população de nêutrons gerada por fenômenos naturais, como fissão espontânea e reações secundárias.

Depois que o reator atinge criticidade, a principal fonte de nêutrons passa a ser a própria fissão nuclear. A reação em cadeia se sustenta porque cada fissão libera novos nêutrons, e uma fração adequada desses nêutrons provoca novas fissões.

O controle do reator consiste justamente em manter esse balanço: nêutrons suficientes para sustentar a potência desejada, mas não tantos a ponto de provocar aumento descontrolado de potência.

7. IODO, XENÔNIO E ENVENENAMENTO DO REATOR

Durante a fissão do urânio, vários produtos radioativos são formados. Entre eles está o **iodo-135**, que decai para **xenônio-135**.

O xenônio-135 é um forte absorvedor de nêutrons. Por isso, ele é conhecido como um veneno neutrônico. Quando há muito xenônio no núcleo, ele captura nêutrons que poderiam provocar novas fissões, reduzindo a reatividade do reator.

A cadeia é:

- fissão nuclear gera produtos de fissão;
- entre eles, forma-se iodo-135;
- o iodo-135 decai para xenônio-135;
- o xenônio-135 absorve nêutrons;
- a absorção de nêutrons reduz a reatividade.

Em potência estável, há um equilíbrio: o xenônio é produzido, mas também é consumido pela absorção de nêutrons. Quando a potência cai, o fluxo de nêutrons diminui. O xenônio passa a ser consumido mais lentamente, enquanto o iodo já formado continua decaindo para xenônio.

Esse fenômeno ajuda a entender a sequência do Reator 4. Depois da queda de potência para cerca de 30 MWt, o xenônio dificultou a recuperação da potência. Para compensar essa perda de reatividade, os operadores retiraram muitas hastes de controle, reduzindo a margem operacional de reatividade. Esse ponto foi analisado em detalhe no artigo [Chernobyl: por que a potência do Reator 4 caiu de 500 MWt para 30 MWt?](#)

8. ÁGUA E GRAFITE: A COMBINAÇÃO QUE TORNAVA O RBMK DIFERENTE

No RBMK, a água e o grafite tinham funções diferentes.

O **grafite** era o moderador. Ele desacelerava os nêutrons e favorecia a continuidade da reação em cadeia.

A **água** era o refrigerante. Ela removia calor dos canais de combustível. Mas também absorvia parte dos nêutrons.

Essa separação entre moderador e refrigerante era decisiva. Em muitos reatores, a própria água atua simultaneamente como refrigerante e moderador. Quando a água ferve e forma vapor, a moderação diminui, reduzindo a reação nuclear. Esse comportamento tende a ser estabilizador.

No RBMK, porém, o grafite continuava moderando os nêutrons mesmo quando a água nos canais virava vapor. Como o vapor absorvia menos nêutrons que a água líquida, a formação de vapor podia deixar mais nêutrons disponíveis para novas fissões.

Esse é o fundamento do **coeficiente de vazio positivo**: em determinadas condições, mais vapor podia aumentar a reatividade em vez de reduzi-la.

A sequência perigosa era:

- mais calor gera mais vapor;
- mais vapor reduz a absorção de nêutrons pela água;
- mais nêutrons ficam disponíveis;
- mais fissões acontecem;
- a potência aumenta;
- o aumento de potência gera ainda mais calor e vapor.

Essa realimentação positiva foi um dos fatores centrais na instabilidade final do Reator 4.

9. HASTES DE CONTROLE: CONTROLE, SEGURANÇA E COMPROMISSO DE PROJETO

As hastes de controle do RBMK continham material absorvedor de nêutrons, como carbeto de boro. Sua função era regular a reação nuclear.

Em termos simples:

- haste mais inserida mais absorção de nêutrons menor reatividade;
- haste mais retirada menos absorção de nêutrons maior reatividade disponível.

O sistema de controle e proteção podia atuar em modos automáticos, manuais e emergenciais. Em caso de emergência, o comando de desligamento deveria inserir hastes no núcleo para encerrar a reação em cadeia sustentada.

O problema é que as hastes do RBMK pré-acidente tinham deslocadores de grafite. Esses deslocadores não existiam para “frear” o reator. Eles eram uma solução de eficiência neutrônica: evitavam que, com a haste absorvedora retirada, o canal ficasse preenchido por água absorvendo nêutrons.

Em operação normal, essa escolha melhorava o aproveitamento dos nêutrons. Mas, em determinadas condições, especialmente com muitas hastes muito retiradas, o primeiro movimento de inserção podia deslocar água por grafite antes de a parte absorvedora atuar plenamente. O efeito inicial podia ser aumento local de reatividade.

Essa característica foi decisiva para entender por que o desligamento emergencial não se comportou como uma barreira suficiente na sequência final do Reator 4. O tema foi aprofundado no artigo [Chernobyl: por que o botão de emergência AZ-5 não impediu a explosão do Reator 4?](#)

10. ÁGUA ENTRA POR BAIXO, VAPOR SAI POR CIMA

A água de resfriamento entrava pela parte inferior dos canais de combustível, passava pelos conjuntos combustíveis e removia o calor produzido pela fissão nuclear.

À medida que subia pelos canais, parte dessa água fervia, formando uma mistura de água e vapor. Essa mistura seguia para os tambores separadores de vapor.

Os **tambores separadores** tinham a função de separar o vapor da água líquida. O vapor seguia para as turbinas. A água separada retornava ao circuito de circulação e voltava para o reator.

O RBMK era um reator de ciclo direto. Isso significa que o vapor produzido no circuito do próprio reator era enviado diretamente às turbinas, sem um gerador de vapor intermediário como nos reatores pressurizados do tipo PWR ou WWER.

O sistema primário era dividido em dois circuitos independentes, cada um responsável por aproximadamente metade do núcleo. Em cada circuito, a água passava por bombas principais, um coletor comum e 22 grupos distribuidores antes de alcançar os canais individuais.

Essa distribuição exigia uma rede extensa de tubulações e dispositivos de controle de vazão. Cada canal precisava receber refrigeração compatível com sua carga térmica e posição no núcleo. Depois da passagem pelos canais, a mistura de água e vapor seguia por linhas individuais até os separadores horizontais.

Do ponto de vista de projeto, o circuito não era apenas hidráulico. Ele dependia de alimentação elétrica, instrumentação de pressão, temperatura, vazão e nível, lógica de proteção, válvulas de retenção, isolamento e comunicação com os sistemas de geração. A arquitetura precisava representar o estado do processo de forma integrada.

Processos distribuídos exigem supervisão integrada das variáveis, estados e alarmes.

Um sistema SCADA organiza telemetria, comandos, tendências, eventos e alarmes para apoiar operação, diagnóstico e análise de desempenho em instalações críticas.

Conhecer a solução de Sistemas SCADA

11. BOMBAS DE CIRCULAÇÃO: O CORAÇÃO HIDRÁULICO DO REATOR

As bombas principais de circulação mantinham o fluxo de água pelos canais de combustível. Essa circulação forçada era indispensável para remover calor do núcleo.

O circuito era dividido em dois laços principais, cada um resfriando metade dos canais do reator. Na sequência do acidente, a documentação trata de oito bombas principais de circulação associadas ao sistema.

Esse ponto explica por que o teste da turbina era tão sensível. O objetivo do teste era verificar se, em uma perda total de energia, a inércia da turbina em desaceleração poderia manter energia elétrica suficiente para alimentar bombas essenciais por tempo suficiente até a entrada dos geradores diesel de emergência.

O teste parecia elétrico, mas afetava diretamente a capacidade de manter circulação de água pelo núcleo. Por isso, do ponto de vista de engenharia, era um teste integrado de sistema crítico, não apenas um ensaio elétrico isolado.

12. DO CALOR AO MEGAWATT: O CICLO VAPOR-TURBINA-GERADOR

Depois que o calor era produzido no núcleo, o RBMK seguia uma cadeia energética direta:

- 1 a fissão nuclear produzia calor no combustível;
- 2 a água removia esse calor nos canais;
- 3 parte da água virava vapor;
- 4 o vapor era separado nos tambores separadores;
- 5 o vapor seguia para a turbina;
- 6 a turbina convertia energia térmica em rotação mecânica;
- 7 o gerador convertia rotação mecânica em energia elétrica;
- 8 o vapor era condensado;
- 9 a água retornava ao circuito de alimentação.

Na turbina, o vapor expandia e movimentava pás conectadas a um eixo. Esse eixo acionava o gerador elétrico. O gerador produzia eletricidade por indução eletromagnética, que depois era enviada à rede por meio dos sistemas elétricos da usina.

Parte dessa energia também alimentava os próprios sistemas auxiliares da instalação: bombas, instrumentação, controle, ventilação, sistemas elétricos internos, automação e equipamentos de segurança.

Além dos componentes de processo, o RBMK dependia de uma arquitetura de instrumentação capaz de acompanhar um núcleo de grande volume. Detectores internos e externos, sistemas de cálculo e painéis da sala de controle precisavam combinar informações locais e globais para representar a distribuição de potência e as condições dos circuitos.

O INSAG-7 registra que determinados parâmetros importantes não eram apresentados de forma imediata e integrada. A margem operacional de reatividade, por exemplo, dependia de processamento periódico e não estava incorporada como uma variável simples de proteção. Em baixa potência, a cobertura de instrumentação interna também era reduzida.

Esse problema evidencia uma diferença entre possuir sensores e construir consciência situacional. A arquitetura de controle precisa estabelecer quais variáveis são críticas, como são calculadas, onde aparecem, quais tendências devem ser comparadas e como alarmes são priorizados para que o operador compreenda o estado do sistema.

Um sistema de controle precisa transformar milhares de sinais em uma visão operacional coerente.

Os Sistemas Digitais de Supervisão e Controle integram aquisição de dados, lógica, eventos, interfaces operacionais e registros para aumentar rastreabilidade e consciência situacional.

Conhecer a solução de SDSC

13. TAMPA DO REATOR, BLINDAGEM E CONTENÇÃO

O RBMK tinha blindagens biológicas, estruturas de concreto armado, sistemas de localização de acidente, compartimentos, piscinas de supressão de pressão e elementos pesados de estrutura superior. A tampa do reator e as placas metálicas superiores eram atravessadas pelos canais verticais.

Mas é importante fazer uma distinção: o RBMK não possuía uma contenção integral robusta nos padrões adotados em muitos projetos ocidentais. Havia sistemas de localização e supressão, mas não uma contenção plena capaz de reter completamente as consequências de uma destruição severa do núcleo.

No acidente do Reator 4, a destruição mecânica do núcleo e a sobrepressão foram suficientes para romper estruturas superiores, lançar materiais radioativos e expor o núcleo à atmosfera. Esse ponto ajuda a explicar a dimensão da liberação radiológica posterior.

A proteção física do RBMK era composta por blindagens e confinamentos localizados. O núcleo ficava em uma cavidade revestida, apoiado sobre uma placa inferior e fechado por uma placa superior pesada. Partes do circuito primário ocupavam compartimentos próprios, conectados a sistemas de alívio e supressão de pressão.

Essa solução não equivalia a uma contenção integral envolvendo toda a instalação nuclear. Sua capacidade estava associada a cenários definidos de falha local. Quando vários canais eram afetados simultaneamente, as cargas estruturais podiam ultrapassar as premissas consideradas pelo projeto.

A análise evidencia um princípio de engenharia: barreiras precisam ser verificadas como uma cadeia. Prevenção, detecção, controle, isolamento, alívio e limitação de consequências devem possuir critérios próprios e também funcionar de maneira coordenada. Uma barreira não pode depender de outra que já foi comprometida pelo mesmo evento.

Barreiras e proteções precisam ser testadas contra os cenários que justificaram sua especificação.

O comissionamento verifica interfaces, sequências, alarmes, intertravamentos, alimentação, documentação e evidências antes do aceite de sistemas críticos.

Conhecer o serviço de Comissionamento e Aceite Técnico

14. O QUE TORNAVA O RBMK EFICIENTE

O RBMK tinha vantagens operacionais claras dentro da lógica soviética de geração em grande escala:

- grande potência unitária;
- uso de canais individuais de combustível;
- possibilidade de reabastecimento em operação;
- ciclo direto de vapor;
- alta disponibilidade para operação contínua;
- projeto compatível com capacidades industriais soviéticas da época.

Essas características explicam por que o RBMK foi adotado em várias usinas dentro da União Soviética. O projeto não era irracional do ponto de vista de produção de energia. Ele respondia a necessidades industriais, energéticas e políticas específicas.

O problema é que eficiência operacional não é sinônimo de segurança em condição-limite. Um sistema pode ser eficiente em operação normal e, ao mesmo tempo, vulnerável

quando opera fora de suas margens ideais.

15. O QUE TORNAVA O RBMK VULNERÁVEL

As vulnerabilidades do RBMK apareciam especialmente em estados degradados, baixa potência, baixa margem operacional de reatividade e configurações anormais de potência no núcleo.

Entre os pontos críticos estavam:

- coeficiente de vazio positivo;
- núcleo grande e espacialmente complexo;
- forte influência da distribuição axial e radial de potência;
- dependência da ORM, a margem operacional de reatividade;
- hastes de controle com deslocadores de grafite;
- tempo de inserção das hastes relativamente longo antes das modificações pós-acidente;
- possibilidade de operação em configurações perigosas;
- proteções e intertravamentos que podiam ser desabilitados ou contornados em determinados contextos.

O acidente de Chernobyl não pode ser explicado por uma única característica. Ele resultou da combinação entre projeto, operação, teste, baixa cultura de segurança e governança técnica insuficiente. Essa leitura foi aprofundada no artigo [Chernobyl: falha de projeto, pressão política ou falha de governança?](#)

16. O QUE MUDOU DEPOIS DE CHERNOBYL

Após o acidente, os RBMK remanescentes passaram por modificações importantes. Segundo a documentação técnica, essas mudanças buscavam reduzir o coeficiente de vazio, melhorar a eficiência do sistema de proteção emergencial, indicar a ORM na sala de controle e impedir que sistemas de segurança fossem contornados com o reator em operação.

Entre as medidas adotadas estavam:

- instalação de absorvedores fixos adicionais;
- aumento da ORM exigida;
- aumento do enriquecimento do combustível;
- modificação do projeto das hastes de controle;
- redução do tempo de inserção das hastes;

- introdução de sistema de proteção emergencial mais rápido;
- melhor indicação da ORM para os operadores;
- restrições a modos de operação inseguros.

Essas mudanças são importantes porque demonstram que as vulnerabilidades não eram apenas “interpretações posteriores”. Elas exigiram correções concretas de engenharia.

17. A LIÇÃO DE ENGENHARIA DO PROJETO RBMK

O RBMK era um projeto potente, produtivo e coerente com objetivos industriais específicos. Mas sua arquitetura também mostra como decisões de eficiência podem gerar riscos quando não são avaliadas em condições-limite.

O grafite como moderador, a água fervente como refrigerante, o ciclo direto de vapor, os canais individuais, os deslocadores de grafite nas hastes e a dependência da ORM formavam um sistema complexo. Em operação normal, esse sistema podia produzir energia em grande escala. Em condição degradada, podia perder margens de segurança rapidamente.

A lição para a engenharia consultiva é direta: não basta avaliar se um sistema funciona no cenário ideal. É preciso entender como ele se comporta em transições, baixa margem, falhas parciais, operação degradada, testes, manutenção, bypass de proteções e decisões sob pressão.

Esse é o papel de práticas como [Owner's Engineering](#), [comissionamento](#), [auditoria técnica](#), [FEL](#) e [due diligence técnica](#): antecipar riscos, validar interfaces, testar funções críticas, documentar requisitos e proteger o proprietário contra decisões técnicas frágeis.

18. CONCLUSÃO: O RBMK ERA EFICIENTE, MAS POUCO TOLERANTE AO ERRO EM CERTAS CONDIÇÕES

O RBMK de Chernobyl transformava fissão nuclear em energia elétrica por uma cadeia aparentemente direta: urânio gerava calor, a água removia esse calor e virava vapor, o vapor acionava turbinas, as turbinas movimentavam geradores e a eletricidade era enviada à rede.

Mas por trás dessa cadeia havia uma arquitetura de engenharia complexa: núcleo de grafite, canais individuais de combustível, água em ebulição, hastes de controle com deslocadores, grande sensibilidade à distribuição de potência, influência do xenônio e dependência da margem operacional de reatividade.

O acidente do Reator 4 não aconteceu porque a energia nuclear, por si só, é incontrolável. Aconteceu porque um sistema crítico foi levado a uma configuração em que suas vulnerabilidades de projeto, operação e governança se alinharam.

No próximo artigo da série, podemos transformar essa base técnica em uma explicação direta da sequência do acidente: **Chernobyl – os passos que levaram à explosão do Reator 4.**

[Fale com um especialista da A3A Engenharia](#)

[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. *Report by a Commission to the USSR State Committee for the Supervision of Safety in Industry and Nuclear Power*. In: INSAG-7, Annex I. Moscow, 1991.

[3] ABAGYAN, A. A. et al. *Causes and Circumstances of the Accident at Unit 4 and Measures to Improve the Safety of Plants with RBMK Reactors*. In: INSAG-7, Annex II. Moscow, 1991.

[4] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Report on the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Station*. NUREG-1250. Washington, 1987.

[5] MUELLNER, Nikolaus. *Three Decades after Chernobyl: Technical or Human Causes?* In: *The Technological and Economic Future of Nuclear Power*. Springer, 2019.

[6] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *RBMK Reactors – Appendix to Nuclear Power Reactors*. Atualizado em 2026.

O que era o RBMK-1000? Era um reator de grande potência, moderado a grafite, refrigerado por água leve e construído com canais individuais de pressão. **Qual era o tamanho do núcleo do RBMK?** O núcleo tinha aproximadamente 7 metros de altura e 11,8 metros de diâmetro, dimensões que exigiam controle espacial da distribuição de potência. **Quantos canais de combustível havia no Reator 4?** O RBMK-1000 utilizava cerca de 1.660 canais verticais de pressão destinados ao combustível e à circulação do refrigerante. **O RBMK tinha vaso de pressão único?** Não. Em vez de um grande vaso de pressão, o projeto distribuía o combustível por canais individuais pressurizados atravessando a estrutura de grafite. **O RBMK possuía contenção?** O projeto utilizava confinamentos localizados e espaços de supressão de pressão, mas não uma contenção integral equivalente à adotada em muitos reatores ocidentais. **Por que a arquitetura do RBMK era complexa?** Porque integrava um núcleo muito grande, milhares de canais e tubulações, dois circuitos de refrigeração, controle espacial de potência e diversos

sistemas auxiliares e de proteção.

18.1. SOLUÇÕES

18.2. SERVIÇOS DE ENGENHARIA

18.3. JORNADA SOBRE CHERNOBYL

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.