

A Sinopse do Reator Nuclear a Leito Fixo FBNR

Farhang Sefidvash

Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,

Porto Alegre, Brasil

farhang@ufrgs.br

Problema da energia

O aumento da população mundial e a melhora de seu padrão de vida implicam em maior necessidade de produção de energia, em particular, energia elétrica, essencial no processo de desenvolvimento mundial. Cerca de 30% da energia primária mundial é consumida na geração de eletricidade, cerca de 15% é usada para o transporte, e os restantes 55% é convertida em água quente, vapor e calor. As aplicações não-elétricas incluem dessalinização, água quente para o aquecimento de cidades, vapor para indústrias como a petroquímica.

Solução do problema de energia e o papel da energia nuclear

A solução do problema energético não está em uma única fonte de energia, mas no conjunto das várias alternativas existentes, pois cada fonte de energia é apropriada para atender necessidades diferentes. Então, utilizar uma combinação de diferentes formas de energia é a solução. A porcentagem da contribuição de cada forma de energia depende do lugar em questão.

Efeito ao meio ambiente

No entanto, cada vez mais a humanidade está preocupada com o impacto da produção de energia sobre o meio ambiente, especialmente no que diz respeito à emissão de gases do efeito estufa, como o gás carbônico (CO₂). O protocolo de Kyoto exige que os países industrializados do mundo reduzam gradualmente suas emissões de CO₂ na atmosfera até atingirem patamares semelhantes aos de 1990. Dentre os países que assinaram este acordo, os Estados Unidos mais tarde decidiram por não ratificá-lo, por causa dos altos custos envolvidos na implementação desse projeto. Uma das alternativas cogitadas para resolver este problema foi o uso da energia nuclear, já que pode-se haver abundância de energia disponível e nenhuma emissão de gases do efeito estufa. Por isso, a energia nuclear tem um papel importante, desde que produzida de maneira segura e utilizada nas aplicações apropriadas, observando os novos padrões exigidos.

A percepção pública em geral é de que os reatores nucleares convencionais não são adequados. Portanto, é necessário o desenvolvimento de novos conceitos de reatores nucleares inovadores para alcançar os objetivos de economia, segurança, impacto reduzido ao meio ambiente, resistência à proliferação nuclear e sustentabilidade.

Mercado para reatores de pequeno porte

Estudos da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) demonstram a necessidade de reatores de pequeno porte quanto à geração de energia. Os reatores de pequeno porte atendem as necessidades locais de consumo, sem os problemas de perda de energia e custos de transmissão a longas distâncias. Também, as redes elétricas dos países pequenos não comportam a energia gerada por um reator grande, pois o tamanho de cada fonte não pode exceder de 10 a 15% da energia total da rede, sob o risco de um *blackout*. Os reatores de pequeno porte vêm ao encontro das necessidades de consumo de curto prazo, possibilitando a realização de investimentos pequenos quando houver real necessidade, não necessitando investimentos grandes ao antecipar necessidades incertas de longo prazo.

Os reatores nucleares de pequeno porte sem necessidade de reabastecimento no local, cujo desenvolvimento está no programa atual da AIEA, têm maior simplicidade, melhor adequação com sistemas de segurança passivos e são mais adequados para países com pequenas demandas energéticas e capacidades limitadas de investimento.

Para salientar, os reatores de pequeno porte têm as vantagens de investimento de capital reduzido, utilização no local sem custos com transmissão de energia, necessidade de infraestrutura modesta, uso de tecnologia mais simples ajudando no processo de curva de aprendizagem (*Learning Curve*), são mais seguros porque têm perigo potencial menor, são adequados para as redes elétricas pequenas e são capazes de satisfazer as necessidades de energia de modo gradual. Além disso,

- São adequados para países com pequenas demandas de energia elétrica e infraestrutura insuficiente. São adequados para países que tenham capacidade limitada de investimento, especialmente por causa de taxas de câmbio desfavoráveis e pouco retorno de capital no mercado de energia elétrica.
- Oferecem a opção de geração de eletricidade em conjunto com dessalinização de água, que corresponde às necessidades urgentes de muitos países em desenvolvimento.
- Podem oferecer uma variedade de características passivas que podem ser difíceis de se obter com grandes reatores. Esse fato os torna uma boa escolha para países com infraestrutura nuclear insuficiente e recursos humanos limitados.
- Provêm uma alternativa atrativa para consignação de combustível e a facilidade de ser abastecido em fábrica e de uma usina elétrica transportável, que pode ser uma solução para países com capacidades limitadas em dominar o ciclo de combustível ou para os que preferem apenas ser usuários finais da energia nuclear.
- Em países industrializados, a desregulamentação do mercado de energia elétrica clama por uma geração de energia flexível que os pequenos reatores podem oferecer.

- São de interesse especial para aplicações não-elétricas avançadas, como a produção de hidrogênio, a liquefação de carvão, etc.
- Provêm meios para se adquirir conhecimento e tecnologia através do protótipo de uma pequena usina nuclear.
- Como os reatores nucleares não emitem dióxido de carbono, eles proverão os países em desenvolvimento e industrializados com desenvolvimento sustentável através da produção de eletricidade e de calor para processos industriais.

Esforços mundiais para iniciar uma nova era da energia nuclear

Recentemente, surgiram algumas iniciativas internacionais com relação ao desenvolvimento de reatores nucleares inovadores, visando o futuro da energia nuclear. Essas incluem o Fórum Internacional da Geração IV (GIF), liderado pelos EUA, que começou seu trabalho em 2000. A rede Michelângelo para assegurar a competitividade e sustentabilidade da energia nuclear na União Européia (MICANET), formada em 1997. Também o Projeto Internacional, INPRO, pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), para Reatores e Ciclos de Combustíveis Inovadores (INPRO - *International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles*), lançado em 2001.

Os principais objetivos do INPRO são (1) “Assegurar que a energia nuclear estará disponível para suprir as necessidades de energia do século 21 de maneira sustentável.”, e (2) “Unir os possuidores e utilizadores de tecnologia para que em conjunto tomem ações em nível nacional e internacional para criar os *reatores nucleares inovadores* e ciclos de combustível desejados.” - IAEA-TECDOC-1362.

A necessidade de inovação

O INPRO diz que para que a tecnologia nuclear faça substancial contribuição para fornecimento da energia futura, ela deverá ser inovadora. Inovação é o ponto chave para o sucesso da indústria nuclear. Além disto, deverá haver cooperação internacional em apoio de tal indústria, desde aspectos científicos e tecnológicos, até em atividades de segurança e salvaguarda. Inovação também é essencial para atrair talentosos cientistas, engenheiros e técnicos para contribuir para o fornecimento de energia a nível global. Em resumo, o INPRO exige que os reatores do futuro tenham as características de segurança inerente, resfriamento passivo, economia, reduzido impacto ao meio ambiente, resistência à proliferação nuclear e sustentabilidade.

Como um reator nuclear funciona

Urânio ou plutônio são chamados de combustível nuclear. Esse combustível é abrigado dentro de tubos cilíndricos ou cascas esféricas vedados chamados de revestimento, para que os materiais radioativos produzidos devido à fissão nuclear não escapem e entrem em contato com o meio circundante. Num processo chamado fissão nuclear, a partícula nêutron interage com o combustível. O urânio quebra (fissiona), gerando calor, e produz novos elementos radioativos chamados “Produtos de Fissão” e alguns nêutrons. Estes nêutrons dão início a outras fissões, começando um processo auto-sustentável chamado de

reação em cadeia. Se este processo não for controlado, poderá resultar num número sempre crescente de interações produzindo quantidade de energia cada vez maior, deixando o sistema em estado de supercriticalidade, que o levaria a uma produção de energia fora de controle. Num reator nuclear convencional, este processo é controlado através de um sistema utilizando barras de controle, que são inseridas dentro do reator e absorvem os nêutrons extras, mantendo o processo de fissão no nível desejado.

Controlar a população de nêutrons no reator controla a geração de energia. O equilíbrio na quantidade de nêutrons produzida é feita considerando-se o número de nêutrons produzidos pela fissão, o número de nêutrons absorvidos pelos materiais existentes dentro do reator e pelos elementos de controle e o número de nêutrons que escapam do reator. Quando a população de nêutrons, e em consequência a geração de energia, se mantém constante com o tempo, o reator é dito como estando na condição *crítica*, o que quer dizer que o reator está produzindo energia constantemente e sob controle. Quando a geração de energia aumenta com o tempo, o reator está no estado de *supercriticalidade* e, se não for controlado, pode resultar no superaquecimento do reator. O superaquecimento pode danificar o revestimento do combustível e causar a liberação de produtos de fissão radioativos no ambiente. Se a população de nêutrons diminuir com o tempo, então a condição de *subcriticalidade* é alcançada, levando ao desligamento do reator. Esses estados de criticalidade, supercriticalidade e subcriticalidade do reator são funções da composição dos materiais e da geometria do núcleo do reator.

Fontes de calor num reator nuclear

Os produtos de fissão são, na maioria, materiais radioativos, ou seja, materiais que emitem radiações. A intensidade de emissão da radiação diminui com o tempo, processo que é chamado de decaimento radioativo. A absorção da radiação pelos materiais também gera calor. Portanto existem duas fontes de calor num reator nuclear. Uma é a fissão, e a outra devido ao decaimento de produtos de fissão. Por esta razão, depois que o reator está desligado e o processo de fissão terminado, o reator ainda precisa ser resfriado.

Onde está o perigo de um reator nuclear

O perigo relacionado com um reator nuclear é decorrente de um possível acidente, devido ao qual não se possa retirar do reator o calor gerado pela fissão ou pelo decaimento dos produtos de fissão. Assim, o reator esquenta demais e pode derreter o revestimento do combustível liberando os produtos de fissão, que são materiais radioativos, contaminando o meio ambiente.

Como os reatores nucleares convencionais combatem os perigos

Nos reatores convencionais, a fissão é controlada por sistemas de controle. Nas situações de acidente, o sistema insere as barras de controle dentro do reator, absorvendo os nêutrons e consequentemente fazendo cessar o processo de fissão. Também atua um tipo de sistema ativo de segurança que bombeia a água para dentro do reator, visando o resfriamento de seu núcleo.

A proposta de um novo conceito de reator nuclear

A filosofia da geração da energia nuclear do futuro é totalmente diferente da filosofia de hoje. O surgimento de reatores nucleares inovadores é uma mudança de paradigma. É baseado em uma nova filosofia de segurança. Isso fará com que a ocorrência de acidentes como os de Three Mile Island e de Chernobyl seja impossível. Há um desafio aos cientistas e tecnologistas do mundo para desenvolver um novo conceito de reator nuclear, com segurança inerente e resfriamento passivo, em que se atinja praticamente “segurança total”. Segurança inerente significa que as leis da natureza governam a segurança do reator de modo passivo, e não os sistemas de segurança ativos que podem falhar.

Desta forma, há 25 anos, um novo conceito de reator nuclear foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Este reator, chamado de Reator Nuclear a Leito Fluidizado, em uma forma simplificada, chamado de Reator Nuclear a Leito Fixo, está sendo desenvolvido atualmente sob projeto coordenado pela AIEA.

O reator é modular, ou seja, é composto por módulos, deste modo reatores de qualquer tamanho podem ser construídos a partir do módulo básico. É simples em projeto, permitindo que países em desenvolvimento tenham condições de desenvolver, projetar e finalmente construir este reator. O reator possui as características de segurança inerente e resfriamento passivo. A tecnologia utilizada é a de reatores de água pressurizada (PWR), disponível no país, portanto, não é preciso que se desenvolva uma nova tecnologia para implementação deste projeto.

No FBNR os elementos esféricos de combustível se posicionam numa posição fixa dentro do núcleo do reator, então não há a preocupação com respeito à interação entre os elementos de combustível que poderiam surgir como no caso do conceito do leito fluidizado. No caso do leito fluidizado há necessidade de se estudar mais profundamente os graus de possível erosão a fim de se determinar a espessura do revestimento.

Como o reator FBNR funciona?

Basicamente, o reator FBNR é parecido com o reator PWR convencional (tipo de reatores das usinas de Angra). Os elementos de combustível do PWR são construídos em forma de tubos cilíndricos de cerca de 1 cm de diâmetro e 400 cm de altura, e no FBNR são esferas de cerca de 1,5 cm de diâmetro feitas de partículas compactadas do tipo TRISO.

No PWR, os elementos de combustível são fixados no núcleo do reator. No FBNR, os elementos de combustível entram no núcleo do reator quando ele está em operação e saem do núcleo do reator sob a ação da força da gravidade em caso de desligamento. O fluxo de água transporta as esferas da câmara de combustível para o núcleo do reator formando um núcleo suspenso onde, quando todas as condições de operação são satisfeitas, o processo de fissão nuclear ocorre. Especificamente, o fluxo de água mantém os elementos de combustível esféricos dentro do núcleo numa posição fixa e apropriada para fazer com que o reator se mantenha no estado crítico. O reator funciona e gera energia apenas quando todos os componentes funcionam bem. Caso haja algum mau funcionamento no reator,

qualquer sinal de qualquer um dos sensores que farão o monitoramento do reator ajustarão os elementos de controle ou cortarão a energia elétrica da bomba do refrigerante. O corte no fluxo de água refrigerante fará com que os elementos de combustível, sob ação da força da gravidade, saiam do núcleo do reator e caiam na câmara de combustível onde são armazenados em condição subcrítica e são resfriados por convecção natural. Isso praticamente resulta na segurança total do conceito do FBNR.

O reator está projetado, de modo conservador, para produzir inicialmente 30 MWt de calor e 10MWe de eletricidade, e futuramente pode-se até triplicar este valor.

Lixo nuclear

Lixo é algo que não tem utilidade. O combustível usado deste reator está numa forma e num tamanho conveniente para poder ser usado diretamente como fonte de radiação para as aplicações variadas na indústria e agricultura. Portanto, o que normalmente pode ser chamado de lixo nuclear aqui se torna um produto potencialmente útil para aplicações em benefício da sociedade. A radiação nuclear é mundialmente usada para esterilização, irradiação de sementes, conservação de alimentos e produtos agrícolas e centenas de outras aplicações na indústria e na medicina. Quase metade dos produtos agrícolas apodrece antes de chegar ao mercado, fazendo com que a irradiação de alimentos seja importante para o mundo carente de alimentos. Portanto, o combustível usado deste reator não será lixo, mas sim um produto valioso para comercialização. Então, o eventual lixo gerado pelo FBNR pode ser considerado bastante reduzido, conseqüentemente causando reduzido impacto ao meio ambiente.

Prédio de Contenção

O reator FBNR, por suas características de segurança inerente e de pequeno porte, dispensa a necessidade de se ter um prédio de contenção. Apesar disso, está projetado um prédio de contenção subterrâneo simplificado para eliminar o impacto visual da usina.

As características do FBNR

- O FBNR está baseado na tecnologia do PWR já existente no país.
- O FBNR é simples em projeto.
- O FBNR é de pequeno porte.
- O FBNR é modular. Qualquer tamanho de reator pode ser construído a partir do módulo básico.
- O FBNR tem segurança inerente.
- O FBNR tem resfriamento passivo.
- O circuito primário do FBNR é um sistema integrado.
- O núcleo do FBNR é suspenso por um fluxo de água. O corte no fluxo de água faz com que os elementos de combustível saiam do reator por força da gravidade e sejam armazenados na câmara de combustível onde são resfriados por convecção natural.
- O FBNR na sua versão avançada pode usar vapor supercrítico ou gás Hélio como refrigerante e utilizar tório ou MOX como combustível. Também pode utilizar o conceito do reator nuclear a leito fluidizado.

Avaliação do reator FBNR pela Agência Internacional de Energia Atômica - AIEA

A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) está comprometida a promover o desenvolvimento de reatores nucleares inovadores para fornecer energia nuclear para o mundo com risco reduzido para a população e o meio ambiente.

Atualmente começou um projeto CRP (Coordinated Research Project) pela AIEA para desenvolvimento de reatores de pequeno porte que não precisam de reabastecimento no local. O FBNR foi aprovado pela AIEA como um dos candidatos neste projeto. O projeto foi apresentado em junho de 2003, houve uma Reunião de Consultoria da AIEA em março de 2004 e também uma Reunião Técnica em junho de 2004 para escolha de reatores candidatos ao CRP.

Os consultores, em sua reunião em março de 2004, em sua avaliação, registraram a seguinte observação:

“...Em particular, a Consultoria notou que a abordagem inovadora proposta no conceito do Reator Nuclear a Leito Fixo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, relacionado a uma coluna de elementos de combustível esféricos sustentada hidraulicamente tem um bom potencial de servir como um método de controle passivo da reatividade do núcleo do reator. Este conceito precisa ser melhor desenvolvido e aprimorado para sua possível implementação em pequenos reatores...”.

Custos e retorno financeiro

O custo de capital deste reator é estimado como sendo inferior a US\$ 1.000/KWe de potência instalada. O tempo para pesquisa e desenvolvimento do protótipo será de cerca de cinco anos. O tempo de fabricação e instalação do reator está estimado em dois anos. Custos e prazos ímpares na indústria nuclear.

O custo de geração de eletricidade em US\$/MWh é estimado em 23, composto por amortização de capital de 16, combustível de 3, operacional de 2 e assumindo fator de incerteza de 2. Custo este significativamente menor se comparado com os reatores nucleares convencionais, além de ser competitivo se comparado com outras fontes de energia. A rentabilidade estimada, supondo venda da energia por US\$ 38 / MWh é de cerca de 65%. Isto demonstra a viabilidade do empreendimento, rentabilidade potencialmente atrativa para o investidor. Além de trazer benefícios intangíveis para a sociedade.

Os custos de produção de energia elétrica por outras fontes são relatados no site www.ilumina.org.br e pelo Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP, e são estimados em: Hidrelétrica, BR, US\$23, Térmica a gás, BR, US\$50, Termonuclear, EUA, US\$40, Termonuclear, BR, US\$60.

Empresa executora do projeto FBNR

A execução deste projeto pode ser feita através de uma empresa que pode ser chamada WONEC (World Nuclear Energy Company), uma espécie de consórcio, com a participação de empresas, investidores e possíveis instituições de pesquisa. O apoio governamental para pesquisa e desenvolvimento do protótipo se dará através das instituições de pesquisa. Estes recursos, denominados fundo perdido, minimizarão o risco para os investidores e auxiliarão no desenvolvimento de tecnologia de ponta para o país, geração de divisas com a exportação, fixação de mão-de-obra qualificada no país, evitando assim fuga de cérebros - "brain drain" - do país.

A WONEC terá um Conselho de Administração, composto por representantes dos investidores. Este Conselho criará um Grupo Executivo constituído por pessoal técnico, com a função de gerenciar o projeto através da terceirização dos trabalhos. Tendo por finalidade, no primeiro instante, a construção de um protótipo, e, finalmente, a construção e comercialização do referido reator, para a geração de eletricidade, vapor para indústria e dessalinização de água. O sistema administrativo da WONEC garantirá que os interesses dos países participantes sejam assegurados em benefício de todos.

A WONEC objetiva constituir capital de US\$ 10.000.000, para tanto, emitirá ações ou cotas de participação, a serem integralizadas pelos investidores e parceiros. Os fornecedores de equipamentos e / ou prestadores de serviços serão remunerados mediante ações ou cotas de participação. Estudos demonstram que com cerca de US\$ um milhão será concluída a pesquisa e comprovada a viabilidade do reator.

Captação dos recursos pela WONEC

Uma estratégia para captação de recursos, baseado em informações preliminares que podem ser exploradas, é a seguinte: Se pelo menos 3 países europeus participarem no projeto, a Comunidade Européia contribuirá com 50% do custo do projeto. Governos de países como a Itália subsidiam 60% dos custos dos projetos na área de energias consideradas limpas. Alguns governos fornecem financiamento a fundo perdido em tecnologia de ponta para elevar o nível da ciência e tecnologia de seus países. Portanto, considerando as hipóteses acima, a contribuição de \$1,00 pelos investidores num consórcio de 20 países, levantará pelo menos \$100,00 para o projeto. Desta forma, a participação de apenas \$10.000 de cada um traz mais de \$1.000.000 para o projeto. O investimento pode ser na forma de serviços, equipamentos ou dinheiro.

Benefícios para o país

- Desenvolver tecnologia de ponta.
- Gerar emprego de alta capacitação.
- Promover a exportação dos reatores de pequeno porte da mesma forma como é feito com aviões pequenos (Embraer).
- Tecnologia de ponta que influencia outras indústrias, usando o conceito de qualidade total.
- Prestígio científico e tecnológico para o país.

•Energia limpa e barata é o negócio do futuro, energia sem produção de gases que causam o efeito estufa.

Este projeto é complementar ao programa nuclear Brasileiro

Este projeto de reator de pequeno porte vem ao encontro de um nicho de mercado mundial. Este reator não concorre com os reatores do Programa Nuclear Brasileiro, que envolve a construção de reatores de grande porte. Assim o Brasil poderá vir a ser exportador de reatores de pequeno porte, como é exportador de pequenas aeronaves.

Política de ações

O século XXI está sendo governado por novos paradigmas. A experiência mostrou que os que ocultam seus conhecimentos e tecnologias não prevalecem, apesar de terem tecnologias superiores. Por exemplo: no campo de vídeo o sistema VHS se popularizou enquanto sistema Beta ocultou sua tecnologia. Na área da informática, a Microsoft popularizou o Windows enquanto a Apple se protegeu. Portanto, compartilhar o conhecimento do reator nuclear FBNR com o mundo será uma boa estratégia, atraindo parceiros econômicos e tecnológicos para o projeto, garantindo assim clientes para o reator, já que os parceiros de hoje são os clientes do futuro.

O convite está aberto a todos os países do mundo que queiram participar, sendo que até o momento muitos países do mundo mostram-se interessados e há perspectivas para ainda mais países participarem. Este projeto de reator está sendo desenvolvido sob coordenação da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), cujos países participantes são isentos de suspeita em envolvimento no desenvolvimento de tecnologia nuclear para fins não-pacíficos.

Resumo

Salientamos que este reator tem as características de segurança inerente, pois o projeto concebido de tal forma que as leis da física não deixam o reator entrar em estado de supercriticalidade, ou seja, não pode ocorrer o aumento da produção de energia sem controle. O reator se auto-controla por sua própria natureza. Também tem a característica de resfriamento passivo, ou seja, ele se resfria sozinho pelo processo de “convecção natural”, uma lei da natureza. Devido a estas características de segurança inerente e resfriamento passivo o reator nunca esquentará demais causando perigo ao público. Maiores informações técnicas encontram-se no site: <http://www.rcgg.ufrgs.br/fbnr.htm>

O Reator Nuclear a Leito Fixo (FBNR)

O Reator Nuclear a Leito Fixo (FBNR) é simples em projeto e é projetado para ser abastecido na fábrica e ter um longo ciclo de combustível sem a necessidade de reabastecimento no local. O reator é transportado de forma selada para o sitio do reator. O reator faz um uso extensivo da tecnologia do PWR.

É um projeto com o sistema primário integrado. O módulo básico tem na sua parte superior o núcleo do reator e o gerador de vapor, na sua parte inferior está a câmara de combustível. O núcleo consiste em dois tubos concêntricos perfurados de zircaloy de 20 cm e 160 cm de diâmetros respectivamente, entre dos quais, durante o funcionamento do reator, os elementos de combustível esféricos estão sustentados juntos pelo fluxo de água refrigerante, formando uma configuração de leito fixo, formando o núcleo suspenso. O refrigerante flui verticalmente pra cima para dentro dos tubos perfurados e logo passando horizontalmente pelos elementos de combustível e o outro tubo perfurado, entrando ao duto exterior, onde ele volta a fluir verticalmente pra cima até o gerador de vapor. A câmara de combustível de reserva, é um tubo de 40 cm de diâmetro feito de uma liga de alta absorção de nêutrons, a qual está diretamente conectada à parte inferior do tubo do núcleo. A câmara de combustível consiste em um tubo de 25 cm de diâmetro, o qual tem forma de uma helicóide, e por um lado está unido por flange à câmara de reserva de combustível, a qual estará selada por autoridades internacionais. Uma grade colocada embaixo da câmara de combustível impedirá a saída do combustível esférico de dentro dela. Um gerador de vapor do tipo “shell-and-tube” está integrado à parte superior do módulo. Uma barra de controle, se desliza para o centro do núcleo do reator para fazer ajustes fino de reatividade. O reator é provido de um sistema pressurizador, para manter o líquido refrigerante a uma pressão constante de 160 bar. A bomba circula a água dentro do reator, passando através da câmara de combustível, o núcleo e o gerador de vapor. Após isso o refrigerante flui de volta para a bomba através de um passagem anular. A certa velocidade da bomba, a água arrasta os elementos de combustível de 15 mm de diâmetro da câmara de combustível até o núcleo do reator. Um núcleo fixo e suspenso é formado no módulo. Em uma situação de desligamento, o núcleo suspenso se quebra e os elementos de combustíveis sai do núcleo do reator pela força de gravidade e retorna para a câmara de combustível. Os elementos de combustível de 15 mm de diâmetro estão feitos de microsferas do tipo TRISO usadas em reatores nucleares de tipo HTGR.

Qualquer sinal de qualquer sensor, a partir de qualquer evento é assumido para desligar a bomba, causando assim a saída dos elementos de combustível do núcleo do reator, e sua entrada na câmara do combustível, onde permanecerão em um estado altamente sub-crítico e serão resfriados passivamente. A câmara de combustível é resfriada passivamente por convecção natural, transferindo o calor para a água dentro do tanque que contém a câmara de combustível.

A bomba, na condição operacional, faz circular o refrigerante no circuito com fluxo mássico de 668 kg/s, os elementos de combustível são mantidos juntos pela pressão de 9.5 bar formando um leito fixo e estável. A velocidade mínima necessária para levar os elementos de combustível da câmara de combustível para dentro do núcleo do reator é de 1.64 m/s na câmara de combustível de reserva. Isto corresponde a um fluxo mássico de 141 kg/s, o qual carrega os elementos de combustível para formar o leito fixo. O refrigerante, que subia verticalmente na câmara de combustível de reserva, flui radialmente no núcleo e após absorver calor dos elementos de combustível passa pelo trocador de calor integrado, e novamente circula para a bomba.

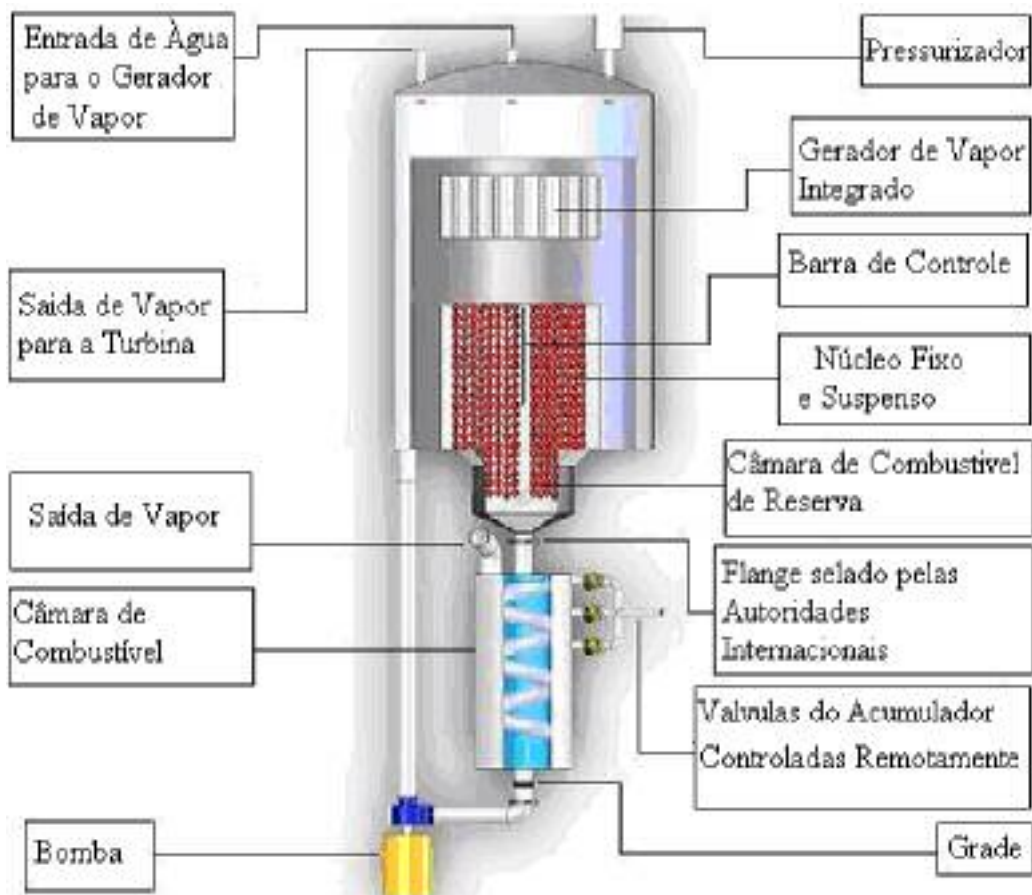
A reatividade de longo prazo é suprida por adição de combustível novo. A barra de controle fino que se movimenta no centro do núcleo controla a reatividade de curto prazo. Um limitador do tipo de pistão ajusta a altura do núcleo e controla a quantidade de elementos de combustível que devem entrar no núcleo da câmara de reserva.

A bomba centrífuga é controlada por um sistema controlador de frequência, assim o fluxo pode ser ajustado com muita precisão. O sistema de controle é concebido para ter a bomba na condição de “não operando” e somente operara quando os sensores detectem simultaneamente uma condição segura de operação. Qualquer sinal de mal-funcionamento do reator fará que a corrente não chegue à bomba, e o fluxo de refrigerante se interromperá, causando a queda dos elementos de combustível para a câmara de combustível, por ação da força de gravidade, onde serão armazenados nos estados, subcrítico e de resfriamento passivo.

A câmara de combustível é resfriada pela água que vêm de um acumulador, que é controlado por um sistema de válvulas multi-redundantes. Os outros componentes do reator são basicamente os mesmos dos de um reator de água pressurizada convencional.

A vida do núcleo é flexível e pode ser projetada de acordo com as necessidades do cliente. As variáveis determinantes da vida do núcleo são o enriquecimento do combustível e a quantidade de combustível na câmara de combustível de reserva. O núcleo do reator tem uma vida de pelo menos 10 anos e o reabastecimento da câmara de combustível é feito na fabrica.

O conceito deste reator tem flexibilidade para ser um reator multi-propósito. Ele pode só gerar eletricidade, ou ser geradora de eletricidade e água desalinada.



Sumario de parâmetros do FBNR

Parâmetro	Valor
<i>Potência:</i>	
Potência neta gerada (MWe)	40
Potência gerada (MWt)	134
Densidade de potência do núcleo (KWt/lit)	33.7
Potência da bomba (MWe)	3.4
<i>Hidráulica:</i>	
Volume do refrigerante (m ³)	12
Fluxo mássico do refrigerante (kg/sec)	668
Pressão do refrigerante (bar)	160
Perda de carga no leito (bar)	9.5
Velocidade terminal (m/sec)	1.64
<i>Térmicos:</i>	
Temperatura de entrada do refrigerante (°C)	290
Temperatura de saída do refrigerante (°C)	326
Entalpia de entrada do refrigerante (kJ/kg)	1284
Densidade de entrada do refrigerante (kg/m ³)	747
Aumento de entalpia no núcleo (kJ/kg)	1490
Coefficiente de transferência de calor por ebulição em filme a 300 °C (W/m ² °C)	454
Media da densidade do elemento combustível. (gr/cm ³)	4.041
Temperatura máxima alcançada pelo combustível após um LOCA (°C)	< 357
Temperatura do refrigerante após o LOFA após 10 dias (°C)	< 1
Necessidade de água para resfriamento durante 10 dias após um LOCA (m ³)	0.45
<i>Dimensões do Módulo:</i>	
Altura do núcleo (cm)	200
Diâmetro interno do núcleo (cm)	20
Diâmetro externo do núcleo (cm)	160
Volume do núcleo (m ³)	3.96
Combustível no núcleo (Toneladas)	9.6
UO2 no núcleo (Toneladas)	4.8
<i>Elemento de Combustível</i>	
Diâmetro do elemento de combustível (cm)	1.5
Espessura do revestimento de SiC (cm)	0.1
Número de microesferas no elemento de combustível.	165
Número de elementos de combustível no núcleo.	1.34x10 ⁵
UO2 em cada elemento (% vol)	19.3
Grafito denso em cada elemento (% vol)	27.8
Grafito poroso em cada elemento (% vol)	7.4
SiC em cada elemento (% vol)	45.5