



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



# Proposta de geração de energia e água potável para a região semi-árida do nordeste brasileiro

*Autor: Rafael de Luca*

*Orientador: Professora Isabel*

*Professor Farhang Sefidvash*

Porto Alegre, março de 12



## Sumário

<b>Sumário</b> .....	<b>iii</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>v</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>vi</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>vii</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b> .....	<b>viii</b>
<b>1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1 Atual Política de Geração de Energia</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2 Painel Energético Brasileiro</b> .....	<b>2</b>
<b>2.3 Caracterização do Nordeste</b> .....	<b>3</b>
2.3.1 Clima do Nordeste .....	4
2.3.2 Características Geológicas .....	4
2.3.3 Recursos hídricos .....	4
<b>2.4 Energia Nuclear</b> .....	<b>6</b>
2.4.1 Vantagens da Energia Nuclear.....	6
2.4.2 Decaimento Radioativo .....	7
2.4.3 Fissão Nuclear.....	7
2.4.4 Fusão Nuclear .....	9
2.4.5 Combustível Nuclear.....	10
2.4.6 Distribuição da Energia Nuclear .....	10
2.4.7 Reator Nuclear de Leito Fixo .....	11
<b>2.5 Energia Solar</b> .....	<b>16</b>
<b>2.6 Dessalinização</b> .....	<b>17</b>
2.6.1 Destilação Multiestágios (MSF) .....	18
2.6.2 Destilação Multiefeitos (MED).....	18
2.6.3 Compressão Mecânica de Vapor .....	19
2.6.4 Osmose Inversa .....	19
<b>3 Materiais e Métodos</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1 Equipamentos</b> .....	<b>25</b>
3.1.1 Controlador .....	25
3.1.2 Membrana .....	25
3.1.3 Painel Fotovoltaico .....	26
<b>3.2 Experimento</b> .....	<b>26</b>
3.2.1 Objetivo .....	26
3.2.2 Descrição .....	27
<b>4 Estudo de Caso</b> .....	<b>28</b>
<b>4.1 Estimativa de Custo</b> .....	<b>28</b>
<b>4.2 Segurança do FBNR</b> .....	<b>28</b>
<b>5 Resultados e Discussões</b> .....	<b>29</b>
<b>5.1 Painéis Solares</b> .....	<b>29</b>
<b>5.2 Reator FBNR</b> .....	<b>31</b>
5.2.1 Custo.....	31

5.2.2	Segurança .....	33
<b>5.3</b>	<b>Propostas de redução de custo .....</b>	<b>35</b>
5.3.1	Equipamentos compartilhados.....	36
5.3.2	Extração de materiais da água salobra .....	36
5.3.3	Incentivo Fiscal .....	37
5.3.4	Pré- Tratamento da água.....	37
5.3.5	Irradiação de produtos .....	37
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros .....</b>	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>Referências .....</b>	<b>39</b>
<b>8</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>41</b>
8.1	Baixos Recursos Hídricos do Nordeste .....	42
8.2	Alta média anual de insolação diária no semi-árido nordestino (horas). .....	43
8.3	Alto potencial de radiação solar global diária no semi-árido Nordeste (MJ/m <sup>2</sup> .dia)..	44
8.4	Potencial de Combustível Nuclear no Brasil .....	45
8.5	Layout do FBNR e parâmetros.....	46

## Resumo

No capítulo de revisão bibliográfica é apresentada a maneira que se distribui a produção de energia elétrica no Brasil e a situação precária região semi-árida do nordeste com relação a recursos hídricos. Após uma breve apresentação das principais características da energia nuclear, energia solar e os principais métodos de dessalinização de água do mar existentes propõem-se um modelo de geração de energia e água potável para a região semi-árida do nordeste.

Baseados no alto potencial de combustível nuclear do Norte do Brasil, na alta média anual de insolação diária, alto potencial de radiação solar global diária no semi-árido nordestino e na busca de um modelo sustentável, seguro e economicamente atrativo sugere-se uma planta de geração de energia via painéis fotovoltaicos e um reator nuclear de leito fixo (FBNR) e dessalinização de água do mar via Osmose Inversa e destilação Multi estágios. Após a escolha dos métodos faz-se uma análise das vantagens de utilização de sistemas de Osmose Inversa, como baixo custo, caráter modular e eficiência; e as vantagens de implantação de um reator nuclear inovador como o FBNR, que possui características de segurança inerente e refrigeração passiva, no lugar dos reatores nucleares que operam em Angra I e II.

No capítulo referente a materiais e métodos são listados os equipamentos utilizados no experimento de geração de água potável via painéis fotovoltaicos. Entre eles os painéis solares, as membranas de poliamidas, bomba, motor e tanques de armazenamento de água.

Posteriormente baseados nos resultados obtidos de quantidade de água permeada gerada e custo da unidade de dessalinização é feita uma estimativa do valor necessário de investimento inicial para se atender uma pequena comunidade afastada da região do semi-árido Nordeste. Ainda no capítulo de resultados de discussões apresentam-se estimativas de valores de geração de energia via FBNR e o custo de implantação desse reator. Após essa estimativa de custos faz-se uma pequena análise das características de segurança do reator FBNR. Conclui-se que no ponto de operação o reator mantém a formação do leito fixo no ponto de operação e o reator opera bem longe da condição crítica (momento que o reator nuclear gera uma quantidade de calor crescente e existe um risco de acidente nuclear).

Antes das conclusões finais são apresentadas possibilidades de redução de custo de operação e implantação de uma unidade de geração de água potável e energia nuclear como: extração de matérias da água salobra e irradiação de produtos com o combustível remanescente do FBNR. Por fim conclui-se que energia nuclear via o FBNR é um método de geração de energia barata, eficiente e extremamente segura, mas que painéis solares apesar de não gerarem impacto ambiental apresentam baixa eficiência e alto custo e que apesar dos valores estimados em US\$/m<sup>3</sup> para geração de água potável serem aceitáveis pela Associação Internacional de Dessalinização a idéia de uma planta com circuitos independentes não seria a opção economicamente mais atrativa.

## Lista de Figuras

Figura 2.1: Circuitos independentes das Usinas de Angra I e II. FONTE: WWW.ELETRONUCLEAR.GOV.BR .....	8
Figura 2.2: Layout do FBNR. FONTE:WWW.SEFIDVASH.NET/FBNR.....	12
Figura 2.3: Elementos de combustível tipo partículas TRISO.....	13
Figura 2.4: Sistema de bombeamento fotovoltaico – Santa Cruz I (Mirante do Paranapanema – SP) FONTE: UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2000.....	17
Figura 2.5: Fluxograma de uma Planta de OI. FONTE: WWW.EXPANSUL.COM.BR/OSMOSE.HTM .....	20
Figura 2.6: Modelo de membrana do tipo enrolado em espiral.....	21
Figura 2.7: Tanques de Osmose Inversa projetados para dessalinização da água do mar.	24
Figura 5.1: Variação da energia consumida por metro cúbico de água permeada com a pressão do sistema. ....	30
Figura 5.2: Comportamento da vazão em função da pressão do sistema.....	30
Figura 5.3: Temperatura do combustível em função do tempo para vários valores de geração de calor volumétricos .....	35
Figura 8.1: Distribuição espacial das vazões específicas no território brasileiro .....	42
Figura 8.2: Situação do Brasil quanto à relação demanda / disponibilidade.....	42
Figura 8.3: Média de insolação Diária no Brasil em Horas. Fonte: ATLAS Solarimétrico do Brasil. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.....	43
Figura 8.4: Radiação solar global diária no Brasil, média anual típica em MJ/m <sup>2</sup> .dia. Fonte: ATLAS Solarimétrico do Brasil. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000. ....	44
Figura 8.5: Formação do Leito Fixo no FBNR no ponto de Operação .....	46
Figura 8.6: Elementos de combustível saem do núcleo do reator pela ação da gravidade e são resfriados por convecção natural quando a bomba cessa o fluxo de água.....	47

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Empreendimentos de geração de energia elétrica em Operação no Brasil (FONTE, BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO DA ANEEL, 2011).....	3
Tabela 2.2: Disponibilidade hídrica no Brasil. FONTE: SECRETÁRIA DE RECURSOS HÍDRICOS DE SÃO PAULO. 2000.....	5
Tabela 3.1: Especificações da Membrana utilizada no reator de dessalinização. FONTE: WWW.LENNTECH.COM/PRODUCTS/MEMBRANE/HYDRANAUTICS.....	25
Tabela 3.2: Especificações do painel fotovoltaico.....	26
Tabela 5.1: Custo estimado do Sistema de Dessanilização Via OI alimentado por painéis Fotovoltaico.....	29
Tabela 5.2: Consumo de água per capita em algumas cidades, regiões e países. FONTE: WWW.GEOLOGO.COM.BR .....	31
Tabela 5.3: Custo de produção de energia por tipo de usina (FONTE: INSTITUDO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA DA USP.WWW.ALUMINA.GOV.BR ).....	32
Tabela 5.4: Custo de Dessanilização por método utilizado.....	33
Tabela 5.5: Valores de pressão de ligação e Fator de força obrigatório do FBNR .....	34
Tabela 5.6: Custo de implantação de usinas de energia elétrica (FONTE: ANEEL -2006, NEGRI - 2003).....	36
Tabela 8.1: Reservas de Urânio no Brasil .....	45
Tabela 8.2: Geração nucleoelétrica no Brasil – PNE 2030.....	45
Tabela 8.3: Parâmetros do FBNR.....	48

## Lista de Abreviaturas e Siglas

<b>Sigla</b>	<b>Significado</b>
ADS	Sistemas de aceleração direcionada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BA	Bahia
BFF	Fator de força obrigatória
BP	Pressão de ligação
CANDU	Reator canadense de água pesada pressurizada
CE	Ceará
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
COP	Conferência das Partes
FBNR	Reator Nuclear de Leito Fixo
HP	Cavalo de força
IDA	Associação Internacional de Dessalinização
ILUMINA	Instituto de desenvolvimento estratégico do Setor Energético
IMT	Serviço de Medição Direta de Energia Elétrica
INB	Instituto Nuclear Brasileiro
LWR	Reator Nuclear de Água Leve
MED	Destilação multiefeitos
MM	Milímetros
MSF	Destilação multiestágios
MWe	Megawatt elétricos
MWt	Megawatt termais
OI	Osmose Inversa
PPM	Partes por milhão
PWR	Reator de água Pressurizada
STD	Sólidos totais dissolvidos
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
V	Voltagem ou Tensão
WONEC Nuclear	Companhia Mundial de Energia







## 1 Introdução

O Objetivo principal deste TCC é propor a utilização de um equipamento com uma tecnologia inovadora para produção de energia elétrica utilizando energia solar e nuclear. Em paralelo a geração de energia propor um modelo de produção de água potável através de dessalinização da água do mar.

### Objetivos do TCC

1. Apresentar um método de geração de energia elétrica seguro, sustentável, de baixo investimento inicial e descentralizada para a região do semi-árido Nordeste;
2. Apresentar um reator nuclear que seja extremamente seguro para desmitificar o medo que a população em geral tem da energia nuclear;
3. Sugerir um sistema de dessalinização de água do mar eficiente e de baixo custo;
4. Avaliar maneiras de aperfeiçoar esse sistema através de estratégias de redução de custo.

Para tanto será feito uma explanação sobre as atuais tecnologias existentes em usinas nucleares no Brasil e sugestão da utilização de um novo tipo de reator nuclear: o FBNR (reator nuclear de leito fixo), para podermos destacar as vantagens de utilização desse tipo de reator. Observado se o mesmo atende as atuais exigências de sustentabilidade na busca por fontes de energia limpas e renováveis e também atende a padrões de segurança rígidos para evitar possível contaminação com lixo nuclear.

Observando o alto potencial de energia solar e baixo potencial hídrico e energético do nordeste brasileiro, surge a idéia de um projeto de dessalinização da água que funcione sem depender da rede pública de eletricidade, atenda as questões atuais de proteção do meio ambiente e seja economicamente atrativo. Mostrar o porquê da decisão da utilização de osmose Inversa frente a outros métodos de dessalinização e o porquê da utilização da energia nuclear em paralelo com a energia solar. Em suma, discutir se a idéia é tecnicamente possível, economicamente viável e processo é seguro para a população local e de baixo impacto ambiental.

## **2 Revisão Bibliográfica**

### **2.1 Atual Política de Geração de Energia**

Através da análise da política de geração de energia no Brasil e no mundo e das características climáticas e recursos disponíveis (hídricos e energéticos) do nordeste é que nasce a idéia inicial dessa dissertação. A idéia de utilizar em conjunto tecnologias que funcionam muito bem sozinhas com o intuito de solucionar um problema existe (falta de água e energia) e ao mesmo tempo atendendo os padrões de mundiais de geração de energia elétrica. A idéia baseia-se no fato de que não existe um método de geração de energia e água potável ideal pré-definido, o método de geração deve adequar-se aos recursos naturais e econômicos disponíveis na região.

Nos últimos anos pesquisadores, governantes e professores do mundo inteiro têm discutindo a implantação de novos modelos energéticos, que sejam renováveis, sustentáveis, limpos, gerando assim menos impacto ambiental para as gerações futuras. A definição de sustentabilidade segundo a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento é a seguinte: “Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, garantindo a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro.” A partir desse conceito nasce a idéia dessa dissertação, de propor a utilização dessas tecnologias em conjunto para produção de energia e água potável.

Pode-se exemplificar essa idéia de criação de energia renováveis e comprometimento dos países desenvolvidos em redução dos seus poluentes, através do protocolo de Quioto, assinado no Japão em 1997. Essa conferência resultou na decisão de que os países industrializados reduziram suas emissões combinadas de gases de efeito estufa em pelo menos 5% em relação aos níveis de 1990 até o período entre 2008 e 2012. Atualmente estamos na era das COP (Conferências das Partes), onde países signatários se reúnem anualmente para discutir métodos para redução de emissão de poluentes. Na COP -1 em Berlim, em 1995, contando com representantes de 117 países, foi estabelecido o Mandato de Berlim, que teve como foco principal o consenso de todos os países em se tomar ações mais enérgicas quanto à mitigação do efeito estufa. Na COP- 10 em Buenos Aires, que ocorreu em 2004, reuniram representantes de 200 países signatários e foi marcada pela certeza da entrada em vigor do Protocolo de Quioto em fevereiro de 2005.

### **2.2 Painel Energético Brasileiro**

Observa-se pela Tabela 2.1. a maioria da energia no Brasil é gerada através de hidroelétricas e conforme a figura 1 dos anexos podemos prospectar que esse cenário tende a ser o mesmo nos próximos anos. Apesar das inúmeras vantagens das usinas hidrelétricas (baixo custo de implantação, não gera resíduos poluentes), em regiões de baixo potencial hídrico, como a região do semi-árido nordestino, temos que estudarmos outras possibilidades de geração, conforme o potencial energético e condições econômicas da região.

Tabela 2.1: Empreendimentos de geração de energia elétrica em Operação no Brasil (FONTE, BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO DA ANEEL, 2011)

<b>Empreendimentos em Operação</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Potência Outorgada (kW)</b>	<b>%</b>
Central Geradora Hidrelétrica	363	210.046	0,18
Central Geradora Eolielétrica	63	1.267.138	1,08
Pequena Central Hidrelétrica	412	3.826.516	3,26
Usina Fotovoltaica	6	5.087	0,004
Usina Hidrelétrica de Energia	180	78.141.904	67,28
Usina Termelétrica de Energia	1.484	32.326.608	26,48
Usina Termonuclear	2	2.007.000	1,73
Total	2.510	118.360.468	100,00

Outra característica marcante do balanço energético brasileiro é a geração de energia elétrica no Brasil é gerada em grandes usinas nos grandes centros urbanos e o transportada por extensas linhas de transmissão. Assim muitas vezes áreas muito afastadas, como na região semi-árida do nordeste, não são atendidas ou pelo falta de alcance das linhas de transmissões ou por não existir população local que justifique economicamente a implantação de subestações. Propondo um modelo de distribuição mais descentralizado diminuiríamos os custos com longas linhas de extensões e , a longo prazo, mudaríamos o painel energético tendo uma maior exploração de energia limpas como a nuclear, solar, eólica. Além de gerar empregos locais estaríamos gerando desenvolvimento tecnológico (centros e estudos e pesquisas) e social (implantação de escolas, hospitais, sistemas de dessalinização) para essas regiões do semi-árido.

### 2.3 Caracterização do Nordeste

Segue abaixo um trecho de um texto de João Suassuna (Engenheiro Agrônomo e Pesquisador da Fundação Joaquim Nabuco).

*“É muito provável que, no início do terceiro milênio, a água passe a ser tão preciosa, para as populações do Planeta, como são o ouro e o petróleo. No Nordeste brasileiro, essa previsão não é difícil de fazer, tendo em vista o tratamento inadequado exercido pelas populações, nos poucos volumes hídricos existentes, tratamento este não condizente com a importância que a água tem ou que deveria ter na vida das pessoas. No nordeste brasileiro, as secas sucessivas, aliadas à falta total de planejamento dos órgãos públicos com relação à gestão da água, fazem com que tenhamos plena convicção do colapso iminente desse setor. A concretização desse cenário é uma mera questão de tempo. Vai faltar água para beber.*

*Aqui do Nordeste não é preciso se deslocar muito para se chegar a esse tipo de conclusão. As cidades de Caruaru e Surubim (PE) estão com um racionamento de 26 dias. A cidade de Bezerros (PE), a 100 km da capital pernambucana, já entrou em colapso, e*

*chegou a ser abastecida por via ferroviária, com água trazida de um poço da Petrobrás existente no porto de Suape, próximo a cidade de Recife. A cidade de Campina Grande passa por igual situação de desabastecimento, pois a principal represa que abastece a cidade encontra-se com volume crítico para atender às necessidades normais da população. Igualmente problemáticas encontra-se as regiões do Seridó, no Rio Grande do Norte, os Sertões dos Inhamuns, no Ceará e o Cariri da Paraíba, já estando assistida, por frota de caminhões-pipa, boa parte do Semi-árido nordestino. O que preocupa da falta de água já chegou ao litoral do Nordeste. A seca chegou à cidade do Recife. A metrópole pernambucana, com índice pluviométrico médio em torno de 2.000 mm anuais e sobre um rico lençol subterrâneo, amarga um longo período de racionamento, com perspectivas do agravamento desse quadro. "O prognóstico do caos preocupa."*

### 2.3.1 Clima do Nordeste

O nordeste situa-se em regiões de baixa latitude condicionando à região a temperaturas elevadas (média de 26 °C). Soma-se a esse fator da proximidade da linha do equador o número elevado de horas de sol por ano (cerca de 3.000 horas) faz com que o nordeste tenha um clima muito quente. Índices acentuados de evapotranspiração, devido à incidência perpendicular dos raios solares sobre a superfície do solo também influencia na questão climática. Algumas regiões do Nordeste semi-árido chegam a evapotranspirar cerca de 7 mm/dia. Existem outros fatores que influenciam no clima quente do nordeste como massas de ar (Equatorial Atlântica, Equatorial, entre outras) e fenômenos como o El Niño que bloqueia as frentes frias da região sul do país. Em suma, nos deparamos com uma região muito quente e baixas precipitações. No semi-árido as precipitações estão entre 500 e 800 mm e as chuvas são extremamente mal distribuídas.

### 2.3.2 Características Geológicas

A região possuía duas estruturas: o embasamento cristalino e as bacias sedimentares. No embasamento, a região tem como principal característica a presença de rios temporários. As águas que têm contato com esse tipo de estrutura se mineralizam com muita facilidade e se tornam salinizadas. As bacias sedimentares têm um maior volume de água; entretanto a distribuição dessas águas é de maneira esparsa e não uniforme (70% do volume da água do subsolo nordestino estão localizadas na bacia sedimentar do Piauí/Maranhão).

### 2.3.3 Recursos hídricos

Estima-se que existam 1,37 bilhões de Km<sup>3</sup> de água no mundo; sendo que 97% desse volume constituem águas salgadas, restando, por consequência apenas 3% de água doce. Desses 3%, 2/3 estão nas calotas polares e nas geleiras, locais onde não existe

tecnologia disponível para captação, transporte e uso dessa água. Assim sendo apenas 1% do volume de água do mundo está disponível para ser consumido pela população mundial. O aspecto positivo nesse sentido é que o Brasil é um país rico em água; sendo detentor de 12% da água doce que escorre superficialmente no mundo.

Apesar desse alto potencial hídrico a distribuição de águas no território brasileiro é não uniforme. 72% desses recursos estão localizados na região amazônica e apenas 3% no Nordeste. Essa desigualdade de percentuais hídricos existente no país, com visível desvantagem para o Nordeste, é consequência das características geoambientais da região. Segue a mostrando a situação crítica do Nordeste, da região do semi-árido apenas o estado do Piauí apresenta situação confortável.

Tabela 2.2: Disponibilidade hídrica no Brasil. FONTE: SECRETÁRIA DE RECURSOS HÍDRICOS DE SÃO PAULO. 2000

Disponibilidade hídrica per capita M <sup>3</sup> /hab/ano	País	Disponibilidade hídrica per capita M <sup>3</sup> /hab/ano	Estado brasileiro	Disponibilidade hídrica per capita M <sup>3</sup> /hab/ano
Abundante >20.000	Finlândia Suécia	22.600 21.800	Roraima Amazonas Rio Grande do Sul	1.747.010 878.929 20.798
Muito Rico >10.000	Irlanda Áustria	14.000 12.000	Paraná Minas Gerais	13.662 12.325
Rico >5.000	Portugal Grécia	6.100 5.900	Piauí Espírito Santo	9.608 7.235
Situação Limite >2.500	França Espanha	3.600 2.900	Bahia São Paulo	3.028 2.913
Pobre <2.500	Reino Unido Alemanha	2.200 2.000	Ceará Alagoas Sergipe	2.436 1.752 1.743
Situação crítica <1.500			Paraíba Pernambuco	1.437 1.320

Fala-se muito na possibilidade do uso das águas do rio São Francisco para o abastecimento das regiões sedentas do semi-árido (SUASSUNA, 2002) e (PESSOA; GALINDO, 1989); entretanto, o São Francisco é um rio hidrologicamente pobre, possui um vazão quarto vezes menor que o Rio Tocantins. Segundo a CHESF <sup>1</sup>, ao longo dos últimos

<sup>1</sup> Companhia Hidroelétrica do São Francisco

60 anos, explorou-se praticamente todo o potencial gerador do rio, potencial esse estimado em cerca de 10 mil MWe, no qual foram aplicados cerca US\$ 13 bilhões de dólares. Devido a essas deficiências hidrológicas tem sido necessário a importação, anualmente, de mais 8,6 milhões de MW/h de outros centros geradores do país, como forma de suprir toda a demanda energética da região. O problema do baixo volume disponível é agravado, se considerarmos a questão da alta evaporação existente ao longo da sua bacia. Além disso, a região do Nordeste vem crescendo a uma taxa de 4,5 a 6% ao ano, significando dizer que, em 12 anos, haverá necessidade de se dobrar a capacidade de oferta de energia na região para satisfazer sua demanda.

## **2.4 Energia Nuclear**

Energia Nuclear é a energia que mantém unidos os prótons e nêutrons dentro dos átomos. Através de reações nucleares, isótopos de certos elementos apresentam a capacidade de emitirem energia durante o processo. Isótopos são átomos de um elemento químico em que os núcleos têm o mesmo número atômico, ou seja, os isótopos de um certo elemento contêm o mesmo número de prótons, mas contêm diferentes números de massa atômica. Nessas reações nucleares ocorre uma transformação de massa em energia. Esse processo pode ocorrer de maneira espontânea ou ser provocado pela instabilidade criada em núcleos estáveis, pelo bombardeio com partículas ou com radiação eletromagnética. Podemos utilizar essa energia nuclear para produção de energia elétrica através de duas maneiras: da fissão nuclear e fusão nuclear. Devido à complexidade e a grande quantidade de tipo de reatores nucleares existentes no mundo somente será relatado como funcionam os instalados no Brasil, o alto potencial de combustível nuclear e explicar com dados técnicos o porquê da escolha do reator FBNR.

### *2.4.1 Vantagens da Energia Nuclear*

Entre as vantagens da utilização da energia nuclear com relação a uma termoelétrica comum podemos citar o fato da não utilização de combustíveis fósseis que geram gases responsáveis pelo aquecimento global. Carvão mineral, petróleo e gás natural são os principais combustíveis fósseis usados na atualidade em larga escala. A



energia Nuclear não emite gases responsáveis pelo efeito estufa como dióxido de carbono, metano e óxido nítrico, nenhum gás causador de chuva ácida (dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio), bem como não emite nenhum metal carcinogênico, teratogênico ou mutagênico como arsênio, mercúrio, chumbo. O uso da energia nuclear também não libera gases ou partículas que destroem a camada de ozônio. Usinas nucleares não dependem de fatores climáticos, como: sol, chuva e vento. Podemos destacar também o fato de usinas nucleares ocupam áreas pequenas, quando comparadas a uma hidroelétrica e uma termoelétrica comum.

O principal combustível utilizado em usinas nucleares é o urânio. O urânio utilizado em usinas nucleares é um combustível de baixo custo, não apresenta risco de terminar em médio prazo e possui quantidades mundiais e nacionais exploráveis. Ambientalistas no mundo inteiro acreditam que não podemos abdicar da utilização da energia nuclear para mudarmos o atual quadro de aquecimento global no mundo, entre eles podemos citar Patrick Moore, fundador do Green Peace.

#### *2.4.2 Decaimento Radioativo*

Existem duas fontes de calor num reator nuclear. Uma é a fissão, e a outra devido ao decaimento radiativo dos produtos de fissão. Também conhecido como desintegração ou transmutação radioativa, decaimento radioativo é a diminuição gradual de massa e atividade de um núcleo atômico. Um núcleo tende a se estabilizar emitindo partículas alfa ou beta. O decaimento pode causar uma cadeia de desintegrações sucessivas até resultar em um elemento estável. O tempo que um certo número de núcleos de um radioisótopo leva para que metade de sua população decaia para outro elemento por desintegração é denominado meia-vida do radioisótopo.

#### *2.4.3 Fissão Nuclear*

Fissão nuclear é o processo que o núcleo atômico, quando se choca com um nêutron, se divide em duas ou mais partículas. No momento que ocorre a fissão nuclear ocorre a liberação de energia cinética que junto com a energia dos novos núcleos formados devem possuir a mesma quantidade de energia do núcleo inicial antes de sofrer o choque.

Somente existem reatores de fissão nuclear operando no mundo em larga escala, reatores de fusão ainda estão na fase de estudo e testes para poderem ser usados em maior escala. Existe vários tipo de reatores nucleares em atividade no mundo: LWR, CANDU, PWR, ADS, entre outros. Detalharemos apenas o funcionamento do PWR, pois é o tipo de reator nuclear mais usado no mundo e o utilizado em todas as usinas nucleares existentes no Brasil e o FBNR também é um reator tipo PWR. O reator PWR (reator de água pressurizada) baseia-se no princípio de que a água a altas pressões se mantém líquida. O combustível nuclear libera calor e mantém essa água muito quente e no estado líquido, através de um trocador de calor transmite esse calor para água que vai para turbina. O PWR opera a uma pressão tal que a água de resfriamento não ferve quando passa pelo núcleo do reator. Ela vai para um trocador de calor (gerador de vapor) para formar o vapor que sai da contenção, e aciona um gerador de turbina para produzir eletricidade. As 2 usinas nucleares em atividade no Brasil operam segundo o esquema da Figura 2.1. Existem três circuitos independentes por motivo de segurança, ou seja, caso ocorra uma vazamento no reator nuclear e contamine a água do circuito primário, a água do mar utilizada no circuito de resfriamento não será contaminada.

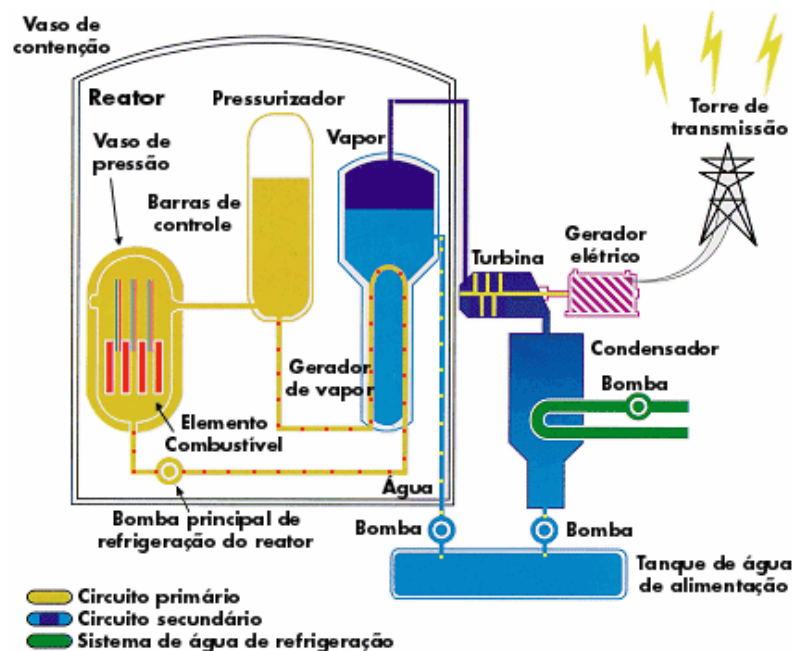


Figura 2.1: Circuitos independentes das Usinas de Angra I e II.  
 FONTE: WWW.ELETRONUCLEAR.GOV.BR

Angra I está operando comercialmente desde 1985 e gera energia suficiente para suprir uma cidade de 1 milhão de habitantes, capacidade total 657 megawatts elétricos. É a primeira usina do país e utiliza o reator de água pressurizada tipo PWR. A usina de Angra

2 foi construída através de uma parceria de Brasil e Alemanha, essa parceria foi muito importante pois foi nesse momento que ocorreu a transferência tecnológica para o Brasil. Levando o mesmo a iniciar centros de estudos e pesquisa sobre energia nuclear, fazendo com que hoje existam profissionais qualificados nessa área. Angra 2 opera com um reator tipo PWR e sua potência nominal é de 1350 MW, capacidade suficiente para atender uma cidade com milhões de habitantes e já funciona a 8 anos. Angra 2 é muito importante para que não haja falta de energia elétrica na região sudeste. A usina de angra 3 terá uma capacidade de gerar 1.405 Mwe. A tecnologia de Angra 3 é muito semelhante a de Angra 2, visto isso, grande parte do projeto que será usado na usina já está concluído. O processo construção de Angra está em torno de 30% e é estimado que sejam necessários investimentos adicionais de R\$ 8,56 bilhões para o término da usina.

#### 2.4.4 Fusão Nuclear

A definição clássica de fusão nuclear é a união dos prótons e nêutrons de dois átomos para formar um único núcleo atômico, de peso superior àqueles que lhe deram origem. A energia liberada nesse processo consiste na diferença de energia entre a energia de ligação do novo átomo e a soma das energias dos átomos iniciais. O processo de fusão nuclear somente ocorre em locais de temperaturas extremamente elevadas, são essas reações termonucleares que fornecem a energia irradiada pelo sol. Devido às altas temperaturas do Sol, aproximadamente quatorze milhões de graus Celsius esse tipo de reação ocorre de maneira espontânea a repetida, mas a fusão nuclear controlada em reatores de fusão nuclear pode ser uma fonte de energia para produção de eletricidade relativamente de baixo custo no futuro. Nos reatores de fusão, núcleos atômicos são prensados através de uma combinação de calor e pressão para superar a sua repulsão eletrostática natural. Quando os núcleos se unem, ou se fundem, eles liberam grandes quantidades de energia. Atualmente ainda não existem reatores que consigam manter as condições de temperaturas e pressão para a reação de fusão nuclear. Existem hoje pesquisadores trabalhando em um reator chamado Alcator C- Mod no qual acreditam que será o primeiro reator a atingir a ignição, ou seja, ponto onde uma reação de fusão nuclear é auto-sustentável, não precisando mais de entrada constante de energia.

Provavelmente no futuro quando se conhecer mais sobre esse tipo de reação será possível utilizar reatores de fusão nuclear em usinas de larga escala. A quebra de paradigma sobre energia nuclear em países como o Brasil é muito importante, pois

quando a população se conscientizar que reatores de fissão (os quais já domina a tecnologia plenamente) são seguros e sustentáveis, quando chegar o momento da implantação de reatores de fusão, essa nova tecnologia será mais bem aceita.

#### 2.4.5 *Combustível Nuclear*

A fissão do átomo de urânio é a principal técnica empregada para a geração de eletricidade em usinas nucleares. Para exemplificar o grande potencial energético do urânio, 500 gramas de urânio produz a mesma energia que 1300 toneladas de carvão. Consiste em um metal radioativo prateado, maleável, dúctil e menos duro do que o aço, que, quando exposto ao ar, forma em sua superfície uma camada de óxido. Apresenta-se a natureza na forma de óxidos: como óxido uranioso ou como anidrido urânico. O urânio, que possui 92 prótons no núcleo, existe na natureza na forma de 3 isótopos: urânio 234 com 142 nêutrons, que se apresenta em quantidades desprezíveis na natureza. Urânio 235 (0,7%), com 143 nêutrons, usado em reatores PWR, após enriquecido. Urânio 238, com 146 nêutrons no núcleo e representa 99,3% do urânio disponível. O urânio 238 não sofre fissão e apenas o urânio 235 é considerado material físsil; entretanto, para fabricação do combustível nuclear são necessários de 2% a 3% de urânio 235. Urânio é extraído do minério por tratamento com ácidos. O produto final é um concentrado de urânio, chamado bolo amarelo (yellow cake).

#### 2.4.6 *Distribuição da Energia Nuclear*

##### Mundo

A energia nuclear já apresenta uma parcela significativa da geração de energia elétrica no mundo, existe uma estimativa que aproximadamente 17% da energia mundial é gerada através de energia nuclear e que este percentual tende a crescer com a construção de novas usinas nos países em desenvolvimento como Brasil, China e Índia e ampliação de usinas de usinas já existentes nos Estados Unidos, França e Japão. Contabilizam-se no mundo hoje aproximadamente 435 usinas nucleares ativas, sendo que na sua maioria utilizam reatores PWR. Além disso, existem 30 usinas em construção e diversas novos projetos sendo desenvolvidos.

## Brasil

O Brasil possui hoje a sétima maior reserva do mundo, localizada no estado da Bahia e do Ceará. Mas é importante salientar que foram realizados estudos de prospecção e pesquisas geológicas em apenas 25% do território nacional, logo o potencial do Brasil em reservas de urânio pode ser muito maior. Apesar desse alto potencial de combustível nuclear, a energia nuclear não apresenta papel significativo no balanço energético brasileiro, mas pelos números da tabela projetamos que a produção e consumo de urânio só tende a aumentar nos próximos anos.

Tabela 2.1: Projeção da Produção de urânio no Brasil até 2013. FONTE: INSTITUTO NUCLEAR BRASILEIRO (INB).

Ano	Produção de Urânio em Catité – BA (tonelas de U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	Produção de Urânio em Santa Quitéria – Ce (tonelas de U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	Produção de Urânio (tonelas de U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )
2009	400	-	400
2010	500	-	500
2011	800	-	800
2012	800	1.000	1.800
2013	800	1.200	2.000

### 2.4.7 Reator Nuclear de Leito Fixo

#### Características e Vantagens

As principais resistências quando se fala em energia nuclear são em relação ao custo de instalação de uma termonuclear como as de Angra e o medo de uma contaminação do meio ambiente através de um acidente nuclear. O FBNR possui características que tendem a reduzir muito esses problemas. Entre as principais características do reator FBNR está o seu tamanho pequeno, seu aspecto modular, baixo investimento inicial, desenvolvido no Brasil, simplicidade do design, baixo impacto ambiental, não precisa ser reabastecido no local, não produz lixo nuclear, baixa necessidade de operadores, segurança inerente e resfriamento passivo. Segue a Figura 2.2 mostrando o layout e as componentes do reator FBNR.

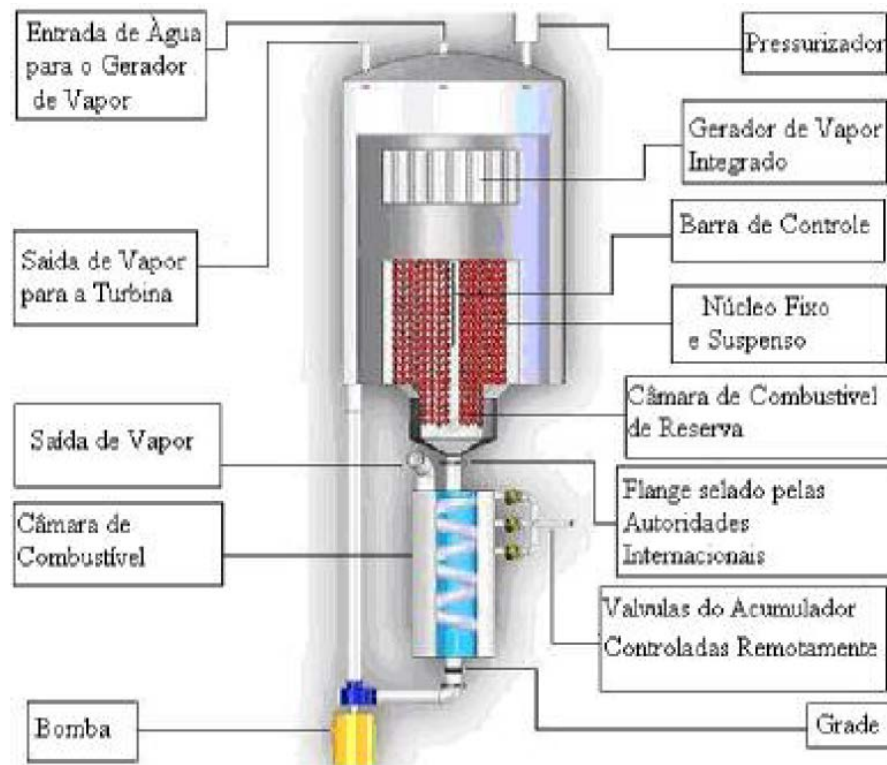


Figura 2.2: Layout do FBNR. FONTE:WWW.SEFIDVASH.NET/FBNR

O projeto ótimo de operação do FBNR é para 40 Mwe. Mas ele pode ser projetado para 10 Mwe de eletricidade e 30 Mwt de calor, sendo assim um reator que ocupa pouco espaço físico, podendo assim ser projetado em subsolo, causando menor impacto visual a população local. Como o reator também utiliza a tecnologia PWR, e essa tecnologia é amplamente dominada pelo Brasil, isso torna mais fácil a seu projeto e instalação. Reator modular quer dizer que ele pode ser construído a partir de um módulo básico, assim podendo ser adaptado dependo do número de comunidades que se pretende atender ou do valor disponível para investimento inicial. As características de segurança inerente (uso da lei da gravidade) e resfriamento passivo (uso da convecção natural) tornam o risco de um acidente nuclear quase impossível. Sendo o reator muito seguro, ele dispensa construção de edifício de contenção e sendo simples, ele dispensa o uso de grande número de técnicos trabalhando; fatores que diminuem o custo de investimento inicial e de operação. Ele tem um ciclo longo de combustível (10 anos), logo a câmara de combustível não precisa ser aberta no local de operação para reabastecimento, a câmara seria aberta somente a cada década para abastecimento dentro da fábrica. Utiliza como combustível esferas de cerca de 1,5 cm de diâmetro feitas de partículas compactadas do

tipo TRISO<sup>2</sup>, que não emite radiação para o ambiente quando o combustível está em situação subcrítica; somente em altas temperaturas as camadas de revestimento das esferas derretem e os elementos de combustível começam a emitir radiação. Na figura 2.3 podemos observar os elementos de combustíveis do FBNR.

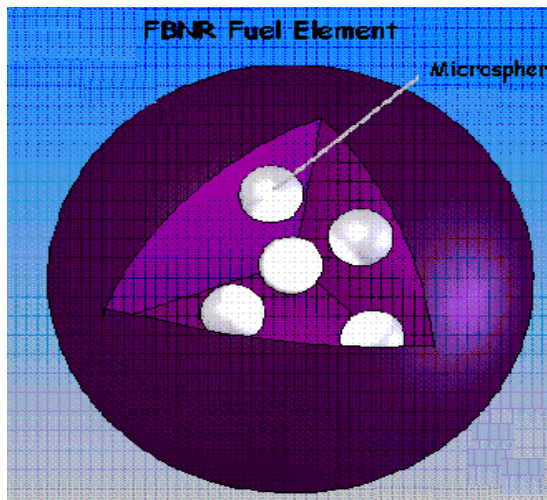


Figura 2.3: Elementos de combustível tipo partículas TRISO

Um reator nuclear possui duas fontes de emissão de calor: através dos produtos de fissão e do decaimento radiativo. O risco de um acidente de um reator nuclear está relacionado ao fato de não ser retirado o calor excessivo gerado por essas duas fontes, fazendo com que o reator esquente demais, derreta o revestimento do reator e libere os produtos de fissão radioativos para o meio ambiente. Em reatores PWR como os das usinas de angra utilizam-se sistemas de controles, que usam barras de controle e água de refrigeração para reduzir a temperatura de um núcleo superaquecido. O FBNR utiliza um sistema de segurança inerente, ou seja, as leis da natureza controlam a segurança do reator de modo passivo. A segurança do reator não depende da ação de operadores e sistemas de controles que podem falhar. O FBNR desenvolvido na UFRGS, sendo toda a tecnologia desenvolvida no Brasil, não seria necessário investir na compra de uma nova tecnologia e, além disso, estaríamos gerando empregos de alta capacitação para o Nordeste e prestígio internacional para o Brasil por estar investindo em novas tecnologias de geração de energia limpa inovadoras.

---

<sup>2</sup> TRISO são esferas de grafite que revestem várias camadas de carbono pirolítico e dióxido de silício, que por sua vez revestem o combustível nuclear de urânio para conter os produtos de fissão em elevadas temperaturas.

### Equações

As equações abaixo apresentadas foram utilizadas para calcular a perda de carga em várias seções do reator FBNR e a partir desses valores estimar o ponto ótimo de operação. As equações referentes à transferência de calor foram utilizadas para estimar parâmetros referentes à segurança do reator FBNR. Os gráficos gerados e tabelas referentes a valores de perda de carga e fluxo mássico calculados serão apresentados no capítulo de resultados e discussões.

- **Perda de carga no leito fixo**

$$\Delta P = \frac{C1 \cdot (1 - E)^2 \cdot \mu \cdot U_o \cdot H}{E^3 \cdot d_c^2} + \frac{C2 \cdot (1 - E) \cdot \rho \cdot U_o^2 \cdot H}{E^3 \cdot d_c} + \rho \cdot g \cdot Z$$

Onde: C1 é o valor empírico de 150, C2 é valor empírico, 1.75 é a porosidade do leito,  $\mu$  é a viscosidade cinemática [N.s/m<sup>2</sup>],  $\rho$  é a densidade [kg/m<sup>3</sup>],  $U_o$  é a velocidade de fluxo sem esferas [m/s], H é a espessura do leito [m],  $d_c$  é o diâmetro do elemento de combustível [m], g é a aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>], Z é a altura relativa [m].

- **Fluxo de calor por convecção**

$$q'' = h \cdot (T_s - T_\infty)$$

Onde:  $q''$  é o fluxo de calor [W/m<sup>2</sup>], h é o coeficiente de transferência de calor convectivo [W/m.C],  $T_s$  é a temperatura da superfície [C], T é temperatura do líquido refrigerante [C].

- **Distribuição de temperatura no elemento de combustível**

$$T(r) = T_s + \frac{q}{6 \cdot K} \cdot (R^2 - r^2)$$

Onde: T (r) é a temperatura em função do raio r [C],  $T_s$  é a Temperatura da superfície [C], q é a taxa volumétrica de geração de calor [W/m<sup>3</sup>], k é a condutividade térmica do elemento combustível [W/m.C], R é o raio do elemento combustível [m], r é o raio [m].

- **Fluxo de calor crítico**

$$q''_{crit} = \frac{0,84 \cdot \pi \cdot hfg \cdot \rho g^{1/2}}{24} \cdot [\sigma \cdot g \cdot (\rho_f - \rho_g)]^{1/4}$$



Onde:  $q''_{crit}$  é o fluxo de calor crítico [ $W / m^2$ ],  $h_{fg}$  é o calor latente [ $J/kg$ ],  $T$  é a Tensão de superfície [ $N/m$ ],  $g$  é a aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ],  $\rho_f$  é a densidade do líquido de arrefecimento [ $kg/m^3$ ],  $\rho_g$  é a densidade de vapor [ $kg/m^3$ ].

### Como Funciona o FBNR

O reator FBNR tem na sua parte superior um reator e um gerador de vapor e na sua parte inferior uma câmara de combustível. O núcleo é constituído de dois tubos concêntricos. Durante a operação do reator os elementos combustíveis esféricos são mantidos juntos pelo fluxo de fluido refrigerante em uma configuração de leito fixo, formando um núcleo suspenso. O fluido refrigerante flui verticalmente para cima no tubo interno perfurado e, depois, passa horizontalmente através dos elementos de combustível e o tubo externo perfurado, entra na camada externa, onde ele flui para cima até o gerador de vapor. A câmara de reserva de combustível é um tubo feito de liga de nêutrons de alta absorção, que está diretamente ligada debaixo do núcleo tubo. A câmara de combustível consiste de um tubo helicoidal com flange para a câmara de combustível reserva que é selada pelas autoridades internacionais. Existe uma grade na parte inferior do tubo para manter os elementos de combustível dentro dele. Um gerador vapor gerador do tipo concha e tubo está integrado na parte superior do módulo. Existe uma vara de controle que pode deslizar dentro do centro do núcleo caso haja necessidade de um ajuste fino. A bomba faz circular o líquido refrigerante dentro do reator movendo-se através da câmara de combustível, núcleo e o gerador de vapor. Posteriormente, o fluido refrigerante flui de volta para baixo para a bomba. A uma velocidade de fluxo constante chamada de velocidade terminal a água refrigerante carrega elementos os combustíveis esféricos d a partir da câmara de combustível para dentro do núcleo. Um núcleo fixo suspenso é formado no reator. No momento que a bomba é desligada o núcleo suspenso se rompe e os elementos combustíveis deixam o núcleo e descem de volta para dentro da câmara de combustível pela ação da força da gravidade. Havendo qualquer sinal de risco detectado pelos detectores será enviada uma informação de cortar a energia da bomba, fazendo com que os elementos de combustíveis deixem o núcleo e voltem para câmara de combustível, onde permanecem em condições altamente subcrítica e resfriados por convecção natural. A água refrigerante flui radialmente no núcleo e depois absorve o calor a partir dos

elementos de combustível entrando no trocador de calor integrado do tipo concha e tubo. O sistema de controle é caracterizado por ter uma bomba na condição "não operacional". A bomba só funciona quando todos os sinais provenientes dos detectores de controle, simultaneamente, indicam uma operação segura. Sob qualquer possível mau funcionamento do reator, a energia não chega à bomba e o fluxo de fluido refrigerante cessa, fazendo com que os elementos combustíveis saiam do núcleo pela ação da força da gravidade e voltem para a câmara de combustível. Os demais componentes do reator são os mesmos em um reator de água pressurizada convencional.

## **2.5 Energia Solar**

O sol é uma fonte de energia gratuita, permanente e abundante. Estimasse que a radiação solar recebida pelo planeta seja 10.000 vezes maior que o quantidade de energia consumida pela humanidade atualmente. Entre as principais da geração de energia elétrica via energia solar é que além de abundante é um forma de energia limpa, sustentável e silenciosa. Utiliza-se energia solar para aquecimento, geração de potência mecânica e energia elétrica. Trataremos aqui somente a utilização da energia solar para geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos, que foram os equipamentos utilizados no experimento.

O princípio de funcionamento da célula fotovoltaica se baseia na propriedade que alguns materiais, como os cristais, gerarem corrente elétrica quando neles incide um feixe de luz. Para isso os mesmos devem ser manuseados corretamente. Dentro os semicondutores utilizados hoje, o silício vem sendo o mais comercializado, pois o material é mais barato e eficiente para produção de eletricidade. Várias células são conectadas para produzir um painel fotovoltaico e muitos painéis conectados formam um módulo fotovoltaico. Para a geração de eletricidade em escala comercial, o principal obstáculo tem sido o custo das células solares. Atualmente os custos de capital variam entre 5 e 15 vezes os custos unitários de uma usina a gás natural que opera com ciclo combinado. Painéis solares têm custo com manutenção e operação desprezíveis, visto que não necessitam de combustíveis para operar e peças móveis precisam de manutenção periódica e complexa.

O grande ponto fraco da energia solar é que ela somente fica disponível apenas 6 horas por dia, em média, para produção de energia, enquanto termoelétricas comuns

operam 24 horas por dia. Assim essas comunidades afastadas não podem ficar dependentes exclusivamente da energia solar. Assim surge a idéia de operar em paralelo com o reator FBNR, pois ambas são energias limpas e próprias para atender pequenas comunidades, logo que, a energia é produzida e consumida no local, não vai para longas redes de transmissão de energia. Utilizando ambos os métodos de produção de energia estaríamos usando o alto potencial de raios solares incidentes no nordeste e alto potencial de urânio disponível no Brasil, sem termos que investirmos bilhões em uma nova usina como as de Angra, visto que o FBNR apresenta um custo bem menor. A Figura 2.4 mostra que painéis solares já estão sendo utilizados em regiões mais afastadas no nordeste para bombeamento da água e geração de energia em pequenas escalas, a idéia é utilizar novas tecnologias e tornar a implantação em larga escala economicamente atrativa.



Figura 2.4: Sistema de bombeamento fotovoltaico – Santa Cruz I (Mirante do Paranapanema – SP) FONTE: UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2000.

## 2.6 Dessalinização

Consiste em um processo de separação de sais dissolvidos na água para se obter água potável e uma solução salobra. Um das alternativas para evitar esse processo de escassez de água do Nordeste é o processo de dessalinização. Estes processos dividem basicamente em dois tipos: processos que utilizam calor (processos de destilação); e processos que utilizam eletricidade (processos de membrana, compressão de vapor e eletrodialise). A dessalinização via osmose reversa atualmente está sendo a alternativa

mais utilizada quando comparada aos métodos comumente usados no tratamento de água (os de destilação térmica).

### *2.6.1 Destilação Multiestágios (MSF)*

É o processo de destilação em múltiplos estágios (multi stage flash). É o mais utilizado no mundo, consiste em 60% das plantas de dessalinização do mundo. Extremamente utilizado, pois é um processo simples e de alta eficiência. Produz águas mais puras que sistemas de Osmose reversa, mas apresenta maior custo. Nesse processo a água do mar é aquecida até o aquecedor atingir a temperatura máxima em salmoura, após isso a água salgada vai para outro recipiente chamado de estágio, onde a pressão está abaixo da pressão de vapor saturado da salmoura. A pressão de vapor menor faz com que a água salgada ferva rapidamente; entretanto, apenas uma parte da água é convertida em vapor, o resto da água é enviado para uma série de estágios adicionais. O vapor de cada estágio condensa na superfície externa de alimentação dos tubos, fornecendo calor latente para água do mar que está no interior dos tubos. A água quente condensada passa por todos os estágios de troca térmica e resfria-se rapidamente sendo posteriormente coletada como água potável. Esse seria o método utilizado reator FBNR, utilizar-se-ia apenas uma parte do calor gerado pelo reator nuclear para aquecer a água do mar, o restante do calor seria utilizado para geração de energia elétrica.

### *2.6.2 Destilação Multiefeitos (MED)*

É o processo mais antigo utilizado para dessalinização de água do mar. O método produz águas muito puras e vem substituindo algumas plantas de destilação MSF, pois possui um menor consumo de energia. Nesse processo a água do mar é aquecida em uma tubulação enquanto passa posteriormente por uma série de etapas de aquecimento. O ponto de ebulição diminui à medida que diminui a pressão, assim água salgada aquecida ao escoar para uma coluna aberta com pressão mais baixa entra instantaneamente em ebulição e libera água potável para a parte superior da coluna de destilação, esse vapor condensa e vai para os coletores. A próxima coluna tem pressão ainda mais baixa, fazendo com que a água salobra remanescente entre ebulição instantaneamente. Esse processo se repete num número de estágios até se atingir a pureza da água desejada. Atualmente os processos mais utilizados são o tubo evaporador vertical de alta

temperatura e o tubo horizontal de baixa temperatura. A principal diferença dos dois processos é à disposição dos tubos e a temperatura máxima de salmoura.

### 2.6.3 *Compressão Mecânica de Vapor*

Consiste em um processo de aquecimento que requer apenas energia elétrica para operação. Utiliza-se um compressor para manter-se uma diferença de pressão entre os dois lados dos tubos de transferência de calor. Bombeia-se água do mar para o lado de baixa pressão, que entra em ebulição; o vapor vai então para o compressor, onde é aquecido através do calor de compressão e é enviado para o lado de alta pressão dos tubos. Nesse momento o vapor se condensa e libera seu calor latente para aquecer a água do mar de alimentação no outro lado do tubo. Esse método produz águas de elevada pureza (25 PPM de STD), mas é limitado pelo falta de compressores grandes disponíveis no mercado.

### 2.6.4 *Osmose Inversa*

O processo de osmose é baseado no princípio do equilíbrio osmótico. Coloca-se uma membrana semi-permeável entre 2 compartimentos, onde a membrana permite somente o solvente fluir através dela. Solvente flui do ambiente menos concentrado para o mais concentrado até se atingir uma pressão de equilíbrio, essa pressão denomina-se pressão osmótica. A definição de osmose inversa consiste na aplicação de uma pressão superior à pressão osmótica no lado da solução mais concentrada, contra uma membrana semipermeável, devidamente projetada para aquela solução. No momento em que atravessa a membrana a água é purificada e perde a maior quantidade de sais. Além de retirar o sal da água, esse sistema permite ainda eliminar vírus, fungos e bactérias. A água salinizada é denominada rejeito e a água potável produzida é denominada permeado ou recuperado. O desempenho adequado de uma unidade de OI é função da concentração e da pressão entre o refeito e permeado. No processo em grandes escalas é necessário a utilização de uma bomba de alta pressão sob fluxo contínuo, passando por um permeador onde fica situada a membrana. Abaixo a Figura 2.5 com o esquema de funcionamento de uma unidade de OI.

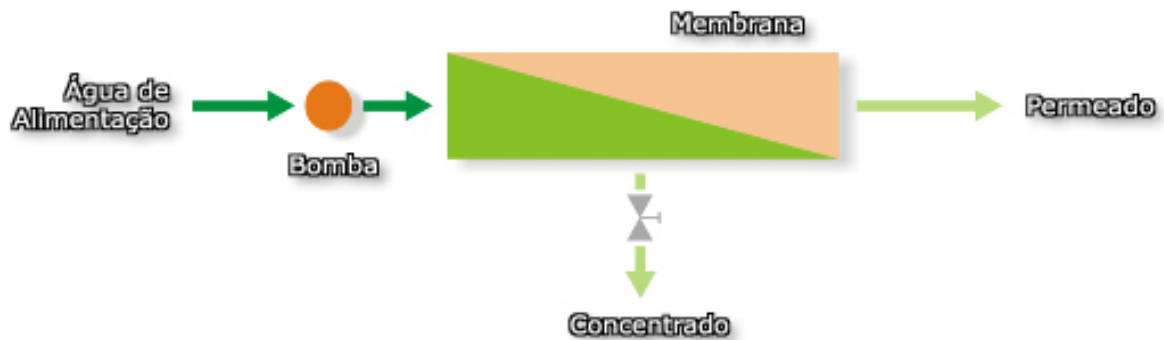


Figura 2.5: Fluxograma de uma Planta de OI. FONTE: [WWW.EXPANSUL.COM.BR/OSMOSE.HTM](http://WWW.EXPANSUL.COM.BR/OSMOSE.HTM)

### Membranas

É necessária uma pequena explanação sobre membranas de osmose inversa para melhor compreensão da importância destas no cenário de tratamento de água. Membranas podem ser definidas como barreiras seletivas ao transporte de matéria e energia, entre duas fases; são utilizadas em processos de separação, visando ao fracionamento dos componentes de uma mistura, em função de suas diferentes taxas de permeação, ou seja, restringe, total ou parcialmente, o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas fases (MULDER, 1991). Hoje, os processos de membranas são usados numa grande variedade de aplicações e o número destas aplicações continua crescendo. Um fator fundamental nos processos baseados em membranas é o fato de efetuarem a separação sem mudança de fase e, quase sempre, em processos isotérmicos, o que torna, portanto, estes processos energeticamente mais vantajosos quando comparados a alguns processos clássicos de separação (NOBLE & STERN, 1995). As membranas sintéticas comerciais podem ser produzidas de materiais que permitam a síntese de filmes com porosidade controlada. São usados uma série de materiais poliméricos (acetato de celulose, polissulfona, polietersulfona, poliacrilonitrila, policarbonato e outros) ou materiais inorgânicos (cerâmica, grafite e metais), que apesar de apresentarem custos mais elevados, apresentam maior durabilidade.

As primeiras membranas utilizadas em processos de dessalinização eram de acetato de celulose, atualmente utilizam-se membranas de poliamida. O modelo utilizado no processo é o enrolado em espiral o qual é constituído por um envoltório de membrana em torno de um espaçador, esse tipo de modelo tenta maximizar a área de superfície por

espaço ocupado. Esse conjunto é ligado a um tubo perfurado, situado em uma das extremidades do envoltório da membrana. A estrutura é semelhante ao molde de rocambole, a estrutura do envoltório da membrana é enrolada em torno do tubo e o conjunto inserido em um vaso de pressão cilíndrica. O fluido escoá sobre a membrana, enquanto que o permeado flui para um sistema coletor por intermédio de um tubo interno. Os espaçadores mantêm as membranas separadas promovendo um caminho de fluxo que provoca turbulência, diminuindo assim problemas de incrustações. Segue a Figura 2.6 o esquema do modelo enrolado em espiral. Entre os modelos disponíveis no mercado esse é que apresenta menor custo em processos de dessalinização.

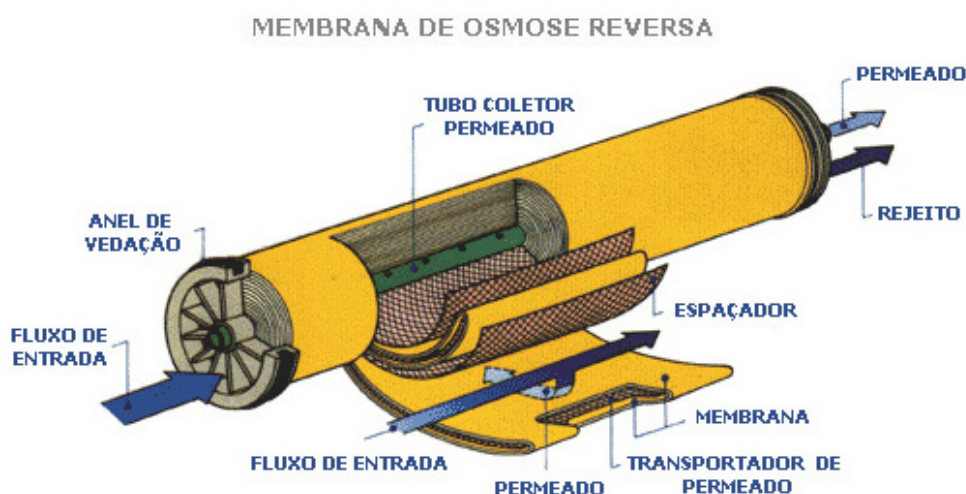


Figura 2.6: Modelo de membrana do tipo enrolado em espiral

### Equações

As equações abaixo foram utilizadas para calcular a quantidade de água potável gerada a partir da água de alimentação e a partir desses parâmetros estimar o custo envolvendo unidades de dessalinização de água do mar via Osmose Inversa por painéis fotovoltaicos. Os gráficos e tabelas obtidos são apresentados nos capítulo de resultados e discussões.

#### ■ Pressão Osmótica

$$\pi = \sum v_i c_i RT$$

Variáveis:  $v_i$  é a carga elétrica de íons  $i$ ,  $c_i$  é a concentração molar,  $R$  é a Constantes de gases ideais,  $T$  é a temperatura absoluta da solução.

#### ■ Fluxo de soluto

$$J_i = K_i(\Delta C) = \frac{Q_p C_p}{A}$$

Variáveis:  $J_i$  é o fluxo mássico de soluto,  $K_i$  é o coeficiente de transferência de massa do soluto,  $\Delta C$  é o gradiente de concentração,  $C_p$  é a concentração do permeado),  $\Delta P$  é o gradiente de pressão aplicada,  $A$  é a área de permeado da membrana.

- **Fluxo de permeado**

$$J_w = K_i(\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A}$$

Variáveis:  $J_w$  é a taxa de fluxo de permeado,  $K_i$  é o coeficiente de transferência de massa do solvente,  $\Delta \pi$  é o gradiente de pressão osmótica,  $Q_p$  é a vazão de permeado.

$$(\Delta P) = \frac{(P_a + P_c)}{2} - P_p$$

$$(\Delta C) = \frac{(C_a + C_c)}{2} - C_p$$

$$(\Delta \pi) = \frac{(\pi_a + \pi_c)}{2} - \pi_p$$

Variáveis:  $P_a$ ,  $P_c$ ,  $P_p$  são a pressão de alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente.  $C_a$ ,  $C_c$ ,  $C_p$  são a concentração da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente.  $\pi_a$ ,  $\pi_c$ ,  $\pi_p$  são a pressão osmótica da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente.

- **Recuperação**

$$r(\%) = \left( \frac{Q_p}{Q_a} \right) \cdot 100$$

Recuperação é a razão de água do mar convertida em água purificada. Variáveis:  $R$  é nível de recuperação do sistema (%),  $Q_p$  é a vazão de permeado ( $m^3/h$ ),  $Q_a$  é a vazão de alimentação ( $m^3/h$ ).

- **Energia prática**

$$E_p = P/Q_p$$

Energia prática é o consumo de energia diretamente relacionado com o nível de recuperação, eficiência da bomba e do motor trabalhado, número de membranas e



soluções no interior do dessalinizador. Variáveis:  $E_p$  é o consumo de energia prática ( $\text{kWh/m}^3$ ),  $P$  é a potência consumida pelo sistema (W).

### Vantagens da OI

Entre as vantagens da OR podemos citar o baixo consumo energético, baixo custo de investimento inicial e de operação, necessidades de pequenos espaços, equipamento modular e simples. O único equipamento que utiliza energia no processo é a bomba que fornece energia para captação de energia da água do mar e gerar a vazão de alimentação, sendo um dos problemas a escassez de energia, não se recomenda utilizar um processo de alto consumo energético, mesmo que esse gere águas extremamente puras. O Sistema sendo modular e pequeno, assim como o reator FBNR, é possível projetarmos para o número de comunidades que pretendemos atender. Equipamentos simples e de fácil operação reduzem o custo com número excessivo de operadores e mão de obra especializada. O processo de osmose reversa também remove agentes contaminantes à saúde humana como bactérias, fungos e vírus. É importante salientar também que osmose reversa em diversos processos industriais como produção de fármacos, processamento de bebidas e alimentos, diálises, produção de aminoácidos para engenharia bioquímica, isso faz com que nos próximos anos o custo das membranas tenda a diminuir e as mesmas venham a ser ainda mais eficientes e de maior durabilidade. Segue a Figura 2.7 representativa de um modelo de osmose reversa projeto especificamente para dessalinização de água do mar. Como exemplo do desenvolvimento das melhorias que vem sendo feitas nos sistemas de OI segue a texto do engenheiro Alexandre J. Beltrão Moura. *“O Laboratório Lawrence Livermore, dos Estados Unidos, está desenvolvendo uma membrana feita com nanotubos de carbono e silício que poderá ser uma forma mais barata e eficiente, de dessalinizar água do mar. Os poros da nova membrana são formados por bilhões de minúsculos tubos ocos de carbono, cujas paredes têm apenas um átomo de espessura, tão finos que cada um deles permite a passagem de apenas seis moléculas de água, retendo todas as outras partículas, inclusive o sal contido na água.”*



Figura 2.7: Tanques de Osmose Inversa projetados para dessalinização da água do mar.

Apesar das águas de Osmose reversa serem menos livres de sais dissolvidos que os métodos de destilação, este fato pode ser considerado um aspecto positivo, visto que, para água potável não precisamos de uma água extremamente pura como água de diálise. É desejável que haja alguma quantidade de sais dissolvidos para que a população nordestina não entre em processo de desmineralização. As elevadas temperaturas da região semi-árida nordestina fazem com que a população rural transpire em demasia, ao transpirar ela perde sais, se ela não tiver uma reposição adequada desses sais pode haver uma desmineralização no organismo dessas pessoas. Osmose Inversa gera águas menos puras com relação aos processos de destilação. OI gera água com águas com 250 a 500 PP de SDT enquanto processos de destilação têm qualidade superior em torno de 5 a 25 PPM de STD.

### 3 Materiais e Métodos

#### 3.1 Equipamentos

Segue abaixo os equipamentos utilizados no experimento e algumas características dos mesmos. Foi utilizado um motor de corrente contínua (24 V de tensão e 1/2 HP de potência), uma bomba de alta pressão, um tanque de alimentação de água salobra, um tanque de água permeada, um tanque de água concentrada, um reator de dessalinização (membrana de OI no modelo enrolado em espiral), seis painéis fotovoltaicos, um controlador de carga e descarga e uma bateria.

##### 3.1.1 Controlador

O controlador é um equipamento instalado entre o painel fotovoltaico e as baterias. Tem a função de gerenciar e controlar o processo de carga e descarga da bateria. O controlador permite que a bateria seja carregada completamente e evita que seja descarregada abaixo de um valor seguro.

##### 3.1.2 Membrana

A membrana utilizada no processo foi a membrana CPA2-4040 da empresa Hydranautic Corporation. A Tabela 3.1 mostra as especificações da membrana. Segue como anexo o Laudo da membrana fornecido pelo fabricante.

Tabela 3.1: Especificações da Membrana utilizada no reator de dessalinização.  
 FONTE: [WWW.LENNTECH.COM/PRODUCTS/MEMBRANE/HYDRANAUTICS](http://WWW.LENNTECH.COM/PRODUCTS/MEMBRANE/HYDRANAUTICS)

<b>Fabricante</b>	<b>Hydranautic Corporation</b>
Modelo	CPA2 - 4040
Material	Compósito de poliamida
Pressão máxima aplicada	42,18 Kgf / cm <sup>2</sup>
Vazão máxima de alimentação	3,6 m <sup>3</sup> /h
Vazão Nominal do permeado	0,33 m <sup>3</sup> /h
Temperatura máxima de operação	45 °. C
Faixa de pH	2,0 – 10,0
Área nominal da Membrana	7,89 m <sup>2</sup>

### 3.1.3 Painel Fotovoltaico

Dentre as principais características dos módulos policristalinos utilizados no experimento pode-se destacar que as células são encapsuladas entre camadas de vidro temperado para dar máxima proteção com as severas condições ambientais que costumam ser expostos os painéis fotovoltaicos em regiões quentes como o semi-árido nordestino. Como cobertura utiliza-se acetato de vinil etilénico e como fundo utiliza-se polivinil fluorídrico. O laminado resultante é encapsulado em uma moldura de alumínio anodizado que oferece uma estrutura mais rígida e de fácil instalação. Os painéis fotovoltaicos utilizados também passam por um processo de texturização na superfície das células solares para reduzir o reflexo do sol, aumentando a captação da energia solar e incrementando a potência gerada. Os painéis solares têm vida útil estimada em (20 anos) e o fabricante garante eficiência de conversão das células acima de 16%. A Tabela 3.2 mostra os parâmetros do painel fotovoltaico.

Tabela 3.2: Especificações do painel fotovoltaico

<b>Fabricante</b>	<b>Kyocera Corporation</b>
Modelo	KC 1101
Potência Nominal máxima de saída	110 W
Tensão nominal com circuito aberto	21,1 V
Tensão nominal máxima de saída	76,5 V
Corrente nominal máxima com curto circuito	7,25 A
Corrente nominal máxima de saída	6,67 A
Tensão máxima do sistema	600 V
Área da célula	100 cm <sup>3</sup>

## 3.2 Experimento

### 3.2.1 Objetivo

O experimento utilizado como referência foi retirado de um artigo científico realizado na Universidade Católica de Pernambuco e publicado no livro *Água Subterrânea e dessalinização*, o qual é citado com mais detalhes nas Referências Bibliográficas. O objetivo do experimento é a produção de água potável através de um dessalinizador cuja energia do mesmo é fornecida através de painéis solares.

### 3.2.2 Descrição

O tanque de alimentação de água salobra é conectado a uma bomba de alta pressão a qual é acionada por um motor de corrente contínua. Posteriormente esse conjunto é conectado ao reator de dessalinização onde ocorre a separação de água potável (permeado) e do concentrado (água salobra). Os painéis fotovoltaicos, através do controlador de carga e das baterias, fornecem a energia elétrica para o acionamento da bomba.

## **4 Estudo de Caso**

Verificar a viabilidade econômica do modelo duplo de geração de energia e água potável sugerido e posteriormente avaliar as características de segurança e operação do FBNR.

### **4.1 Estimativa de Custo**

Baseado na quantidade de água potável gerada pela unidade de dessalinização pretende-se estimar o custo necessário para implantação de unidades capazes de atender uma pequena população de uma cidade afastada da região do semi-árido. Observado se o valor estimado em US\$ /m<sup>3</sup> para produção de água potável é aceitável, se o valor de água produzida é suficiente para essa população de acordo com a média de consumo diária, se custo de investimento inicial é baixo e se painéis fotovoltaicos apresentam valores atrativos para geração de energia elétrica.

Devido a características de reator modular, analisar qual o custo aproximado de implantação do FBNR para uma população entre mil e cinco mil habitantes, através de estimativas feitas pelo desenvolvedor do reator.

### **4.2 Segurança do FBNR**

Através do uso de relações básicas de engenharia como balanços de massa, de energia, de quantidade de movimento e através de relações termodinâmicas empíricas predizer o comportamento do reator no ponto de operação. Analisando se o reator operar longe da condição supercrítica (calor gerado no reator não é constante e sim crescente, fazendo com que as paredes de contenção do núcleo do reator derretam e aconteça uma contaminação no meio ambiente com os produtos de fissão), se o leito fixo se mantém no ponto de operação e se o reator gera energia elétrica necessária para atender essa população desejada.

## 5 Resultados e Discussões

Nesse capítulo será abordado primeiramente à questão referentes e custo de implantação de uma unidade de dessalinização via Osmose Inversa e painéis fotovoltaicos e posteriormente o custo de implantação do FBNR. Posteriormente analisar os resultados obtidos com relação a segura do FBNR. Por último discutir idéias de como reduzir o custo de implantação e de manutenção da unidade de geração de energia e água potável.

### 5.1 Painéis Solares

A partir do custo de equipamentos, instalação, manutenção e operação, é possível inferir um custo aproximado para uma quantidade de água potável a ser gerada. Esse custo pode variar para mais ou para menos dependendo da quantidade de sais dissolvidos na água do mar de alimentação. Foi utilizada um água de alimentação com quantidade de 2.000 mg/L de sais dissolvidos; entretanto, existem condições onde a água do mar que chegam até 40.000 mg/L de sais dissolvidos, nesse caso teríamos que utilizar equipamentos para um pré-tratamento da água para reduzir essa quantidade de sais dissolvidos, não comprometendo assim a durabilidade das membranas de OI. Assim sendo estimando uma custo de vida útil dos painéis fotovoltaicos de 20 anos e das membranas de 5 anos, é possível construir a Tabela 5.1 com o valor de investimento para uma unidade de dessalinização.

Tabela 5.1: Custo estimado do Sistema de Dessalinização Via OI alimentado por painéis Fotovoltaico.

Equipamentos	Custo unitário (US\$)	Quantidade	Total (US\$)
Dessalinizador	900,00	1 unidade	900,00
Painéis Fotovoltaicos e acessórios	657,00	6 unidades	3.940,00
Instalação (10% do valor do dessalinizador e dos painéis)	484,00	1 vez	484,00
Manutenção e Operação (2% ao ano)	96,80	20 anos	1.936,00
Troca de Membrana	250,00	3 vezes	750,00
Troca de Bateria	40,00	3 vezes	120,00
			8.130,00

A partir da Figura 5.1 se observa que o ponto de operação de menor consumo de energia por metro cúbico de água gerada foi na pressão de 8 kgf/cm<sup>2</sup>. Nessa pressão também tivemos a maior geração de água potável produzida sendo, aproximadamente,

de 156 L/h, como mostra a Figura 5.2 abaixo. Verifica-se que à medida que aumenta a pressão, aumenta a quantidade de água permeada.

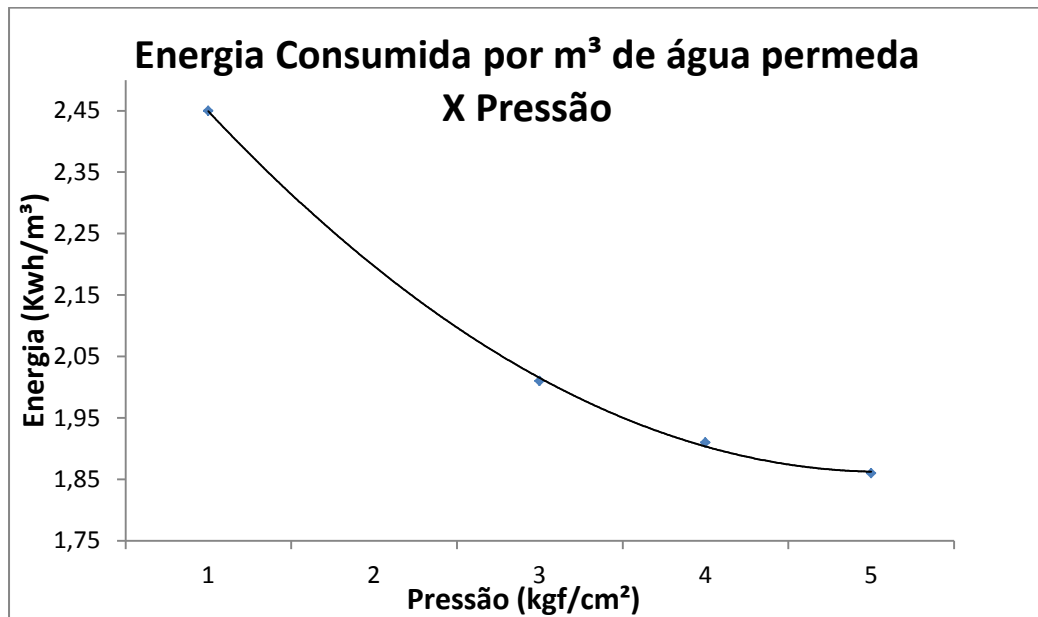


Figura 5.1: Variação da energia consumida por metro cúbico de água permeada com a pressão do sistema.

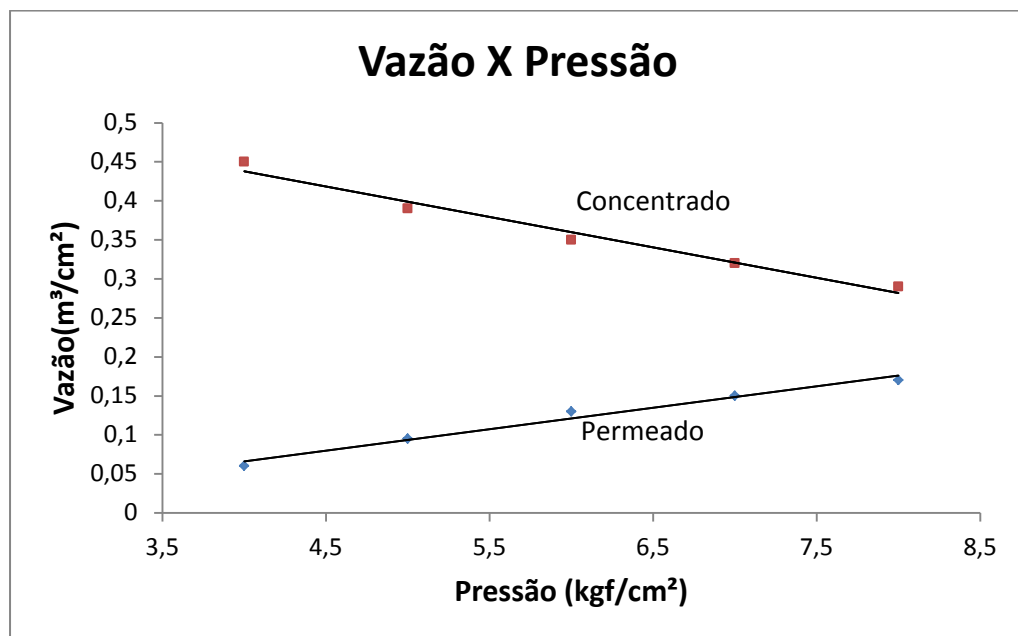


Figura 5.2: Comportamento da vazão em função da pressão do sistema.

Assim, estimando uma produção diária de 1,2 m³/dia a uma concentração de água de alimentação 2.000 mg/L de sais dissolvidos e pressão de 8 Kgf/cm² e considerando que os painéis solares operam 6 horas por dia, 300 dias por ano e durante 20 anos podemos calcular o custo aproximado em US\$/m³ de água potável produzida.



$$20 * 300 * 6 = 36.000 \text{ horas}$$

$$36.000h * 1,2 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{6 h} = 7.200 m^3 \text{ em 20 anos}$$

$$\frac{8.130,00 \text{ US\$}}{7.200 m^3} = 1,13 \text{ US\$/m}^3$$

Segue a Tabela 5.2 com os valores de consumo médio per capita por dia de água de alguns países e regiões do Brasil. Assim estima-se que seriam necessários 175 unidades de dessalinização para beneficiar 1.500 habitantes. Sendo necessário o investimento inicial de 1,42 milhões de dólares.

$$\frac{175 * 1.200 \frac{\text{litros}}{\text{dia}}}{140 \frac{\text{Litros}}{\text{dia/hab}}} = 1.500 \text{ habitantes}$$

$$175 \text{ unidades} * 8.130 \frac{\text{US\$}}{\text{unidade}} = 1.422.750 \text{ US\$}$$

Tabela 5.2: Consumo de água per capita em algumas cidades, regiões e países. FONTE: WWW.GEOLOGO.COM.BR

País ou região	Consumo em litros / pessoa / dia
Austrália	270
Canadá	300
Escócia	410
Estados Unidos	300
Brasil RJ	140
Brasil MG	124
Brasil DF	225
Brasil Norte	140

## 5.2 Reator FBNR

### 5.2.1 Custo

O custo de um reator FBNR é estimado como sendo inferior a US\$ 1.000/KW de potência instalada. Supondo atender uma comunidade local de 5.000 habitantes e estimando uma consumo de 2.000 KWh/habitante segundo o ILUMINA<sup>3</sup>, seria necessário o investimento inicial de 10 milhões de dólares, gerando 10 MWe de eletricidade e 30 MWt de calor. Esse investimento é considera um valor baixo para um reator nuclear. Somente os equipamentos de Angra 2 estão registrados no valor de 3,95 bilhões de reais,

<sup>3</sup> Instituto de desenvolvimento estratégico do Setor Energético

a usina hidroelétrica de Belo Monte , no rio Xingu, Pará, que produzira entre 4.000 MWe e 11.000 MWe tem o custo estimado na construção em de 19 Bilhões de reais. O FBNR está projetado para produzir 10 MWe de eletricidade, mas de como o reator é modular, poderíamos projetá-lo para atender uma comunidade maior ou menor, de acordo com o valor de investimento inicial disponível. Além disso, existe a possibilidade de execução desse projeto através de uma espécie de consórcio pela empresa WONEC<sup>4</sup>.

$$2.000 \frac{\text{KWh}}{\text{habitante}} * 5.000 \text{ habitantes} = 10.000 \text{ KWe} = 10 \text{ MWe}$$

$$2.000 \frac{\text{KWh}}{\text{habitante}} * 1.500 \text{ habitantes} = 3.000 \text{ KWe} = 3 \text{ MWe}$$

O custo de geração de eletricidade do FBNR 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. Vendendo a energia por 35 US\$/MWh podemos estimar uma rentabilidade de 60% para um eventual investidor. Além disso, o FBNR apresenta um custo competitivo quando comparado a reatores nucleares comuns conforme podemos observar pela Tabela 5.4. Cabe-se salientar que a idéia de implantação do FBNR no semi-árido do Nordeste não é apresentar uma oportunidade de negócio extremamente rentável para um investidor, e sim utilizá-lo como uma solução em potencial para comunidades isoladas, sem acesso a água de qualidade e longas linhas de transmissão de energia elétrica.

Tabela 5.3: Custo de produção de energia por tipo de usina (FONTE: INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA DA USP.WWW.ALUMINA.GOV.BR )

<b>Tipo de Usina de Geração de Energia</b>	<b>Custo (US\$/MWh)</b>
Hidrelétrica	23
FBNR	23
Termonuclear EUA	40
Térmica a gás	50
Termonuclear Brasil	60

A Tabela 5.5 mostra uma média do custo de dessalinização para diferentes plantas de dessalinização ao redor do mundo (Oriente médio, Austrália). Estes valores variam de

<sup>4</sup> World Nuclear Energy Company

acordo com o tamanho da planta, fonte de energia e condições econômicas no local geográfico de implantação. Uma planta de duplo propósito, utilizando parte do calor gerado pelo reator para dessalinização de água do mar e maior parte para geração de energia, tende a diminuir o custo de geração de eletricidade de água potável, pois em vários momentos seriam compartilhados equipamentos e mão de obra especializada. Supondo que uma planta de duplo propósito reduz entre 30 a 40% o custo, em relação a uma planta de único propósito é possível estimar um custo de 0,85 U\$/m<sup>3</sup> em uma planta de dessalinização de água do mar via destilação multiestágios e com geração de energia via FBNR.

Tabela 5.4: Custo de Dessalinização por método utilizado

Método de dessalinização	Custo (U\$/m <sup>3</sup> )	Qualidade da água (sais dissolvidos em PPM)
Osiose Inversa	0,5 a 0,94	250 a 500
Destilação Multiestágios	1,18	5 a 25
Destilação Multiefeitos	0,6 a 0,96	5 a 25

### 5.2.2 Segurança

Na apresentação do FBNR afirmou-se que o mesmo apresenta segurança inerente, através da saída dos elementos de combustível do núcleo do reator com a ação da gravidade e refrigeração passiva dos elementos de combustível, através da convecção natural. Existe um estudo amplo com relação ao dimensionamento, dinâmica hidráulica e térmica do FBNR. Somente serão apresentados alguns resultados referentes à simulação das condições de manutenção de leito fluidizado dentro do reator e gráficos que mostrem que o reator opera longe da condição super crítica de calor (momento os produtos de fissão poderiam derreter a blindagem de o núcleo o contaminar o meio ambiente com radiação), tornando assim a possibilidade de um acidente nuclear quase inexistente. Através dos valores das pressões de ligação (BP) e fatores de força obrigatória (BFF) as condições de quando se mantém o leito fixo e quando os elementos de combustíveis caem para a câmara de armazenamento. A pressão de ligação é a pressão que é colocada pelo fluxo e mantém os elementos de combustíveis juntos e fator de força obrigatória é quantas vezes a força que mantém as esferas juntas é maior do que a força da gravidade. Quando esse fator for menor que um, significa que as forças gravitacionais são maiores e o elemento de combustível sai do núcleo do reator. Através da Tabela 5.6 verifica-se que na condição de operação de projeto do reator a 70 Mwe a

força que mantém as esferas juntas é 27 vezes maior que a força da gravidade, ou seja, mantém a condição de leito .

Tabela 5.5: Valores de pressão de ligação e Fator de força obrigatório do FBNR

Velocidade média do Fluxo (m/s)	Fluxo de Massa (kg/s)	Perda de carga no Leito (bar)	Potência da Bomba (MWe)	Potência do Reator (MWt)	Potência do Reator (MWe)	Pressão de ligação (bar)	BFF
1	147	0.0	0.01	30.2	10	-0.003	.05
1.5	220	0.1	0.02	45.3	15	0.001	1.2
2	293	0.1	0.05	60.4	19.9	0.008	2.1
3	440	0.2	0.1	90.6	29.9	0.026	4.7
<b>7.23</b>	<b>1060</b>	<b>1.3</b>	<b>2.0</b>	<b>218.4</b>	<b>72.1</b>	<b>0.188</b>	<b>27.1</b>
8	1173	1.6	2.8	241.7	79.8	0.232	33.2

Através dos valores obtidos na condição operacional do reator (fluxo de massa , velocidade média, calor gerado), de relações empíricas e um processo iterativo foi obtido os seguintes parâmetros para o FBNR. Através da temperatura da superfície do combustível (esferas de 15 mm de diâmetro) calculamos o calor gerado no ponto de operação que é de 76,1 w/cm<sup>3</sup> ou 134,4 w/esfera.

$$Re = (\rho \cdot V_s \cdot D) / \mu$$

$$NuD = 2 + (0,4 \cdot ReD^{1/2} + 0,06 \cdot ReD^{2/3}) \cdot Pr^{0,4} \cdot (\mu/\mu_0)^{1/4}$$

$$h = Nu \cdot K_w / D$$

$$q = A_s \cdot q''$$

$$q'' = h \cdot (T_s - T_\infty)$$

Através das relações empíricas acima, calculou-se os parâmetros abaixo.

$$Re = 4,57E+04,$$

$$Nu = 181,2,$$

$$h = 6003 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K},$$

$$q = 218,4 \text{ MW}$$

$$q'' = 190,2 \text{ kW/m}^2,$$

$$T = 326 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$T_s = 357,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Posteriormente calcula-se o fluxo de calor crítico, pela equação de fluxo de calor crítico exibida no capítulo referente à descrição do FBNR. Que é de  $2.289,6 \text{ kW/m}^2$ , que é 12 vezes maior que a condição de operação anteriormente calculada de  $76,1 \text{ w/cm}^3$ . Além de o reator operar bem abaixo da condição crítica podemos observar pela Figura 5.3 que a temperatura dos elementos de combustíveis converge para um valor constante para diferentes valores de calor volumétricos gerados repentinamente no reator.

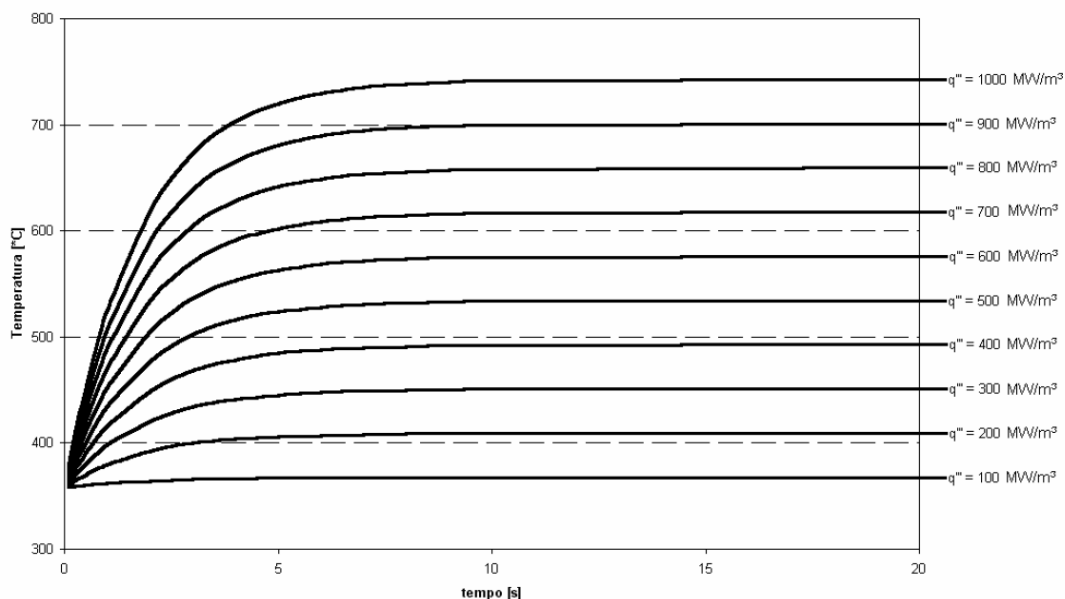


Figura 5.3: Temperatura do combustível em função do tempo para vários valores de geração de calor volumétricos

### 5.3 Propostas de redução de custo

Embora os valores estimados para dessalinização de água, tanto via OI e painéis fotovoltaicos, serem aceitáveis pela IDA<sup>5</sup> e dos inúmeros aspectos positivos da utilização de energias limpas como nuclear e solar, utilizar a radiação solar para geração de energia elétrica ainda é uma tecnologia nova e apresenta um custo mais elevado que usinas movidas por combustíveis fósseis conforme a Tabela 5.6.

<sup>5</sup> Associação Internacional de Dessalinização

Tabela 5.6: Custo de implantação de usinas de energia elétrica (FONTE: ANEEL -2006, NEGRI - 2003)

Tipo de Geração	Custo: ANEEL (US\$/W)	Custo: CESP/IMT (US\$/W)
Termelétrica a Diesel	0,40 à 0,50	0,35 à 0,50
Termelétrica a gás	0,40 à 0,65	0,35 à 0,50
Termelétrica a vapor	0,80 à 1,00	-
Termelétrica ciclo combinado	0,80 à 1,00	-
Pequenas centrais hidrelétricas	1,00	-
Geração eólica	1,20 à 1,50	1,00
Células Fotovoltaicas	-	5,00 à 10,00

Em um país em desenvolvimento como o Brasil e em uma região muito pobre como a região do semi-árido nordestino é evidente que o fator econômico sempre vai ser mais forte que o apelo de sustentabilidade e desenvolvimento social da região a médio prazo. Assim sendo, apesar dos valores de dessalinização estimados serem considerados aceitáveis, é necessário pensar em maneiras de como reduzir ainda mais esse custo de implantação e de operação. Segue abaixo algumas possibilidades que devem ser discutidas, como possíveis fatores de redução de custo, antes de realizar um projeto específico para uma unidade de dessalinização e geração de energia para o nordeste.

### 5.3.1 Equipamentos compartilhados

O sistema de captação de água para gerar vapor que movimenta a turbina do reator nuclear e para gerar água potável pode ser compartilhado, e depois destinar cada parte para o devido processo. A água de refrigeração do reator nuclear pode ser utilizada como água do processo de dessalinização, assim seria necessário fornecer menos calor para atingir a temperatura de ebulição da salmoura.

### 5.3.2 Extração de materiais da água salobra

A água salgada do mar possui vários elementos, mais de 50 elementos, e alguns destes tem valor de mercado. É possível extrair esses materiais da água salobra rejeitada da unidade de dessalinização e comercializar os mesmos. Não é um método de extração economicamente competitivo com os métodos mais comuns utilizados, mas pode ser utilizado como alternativa de na tentativa de redução de custo da planta.

### 5.3.3 *Incentivo Fiscal*

Inúmeras empresas geradores de eletricidade que utilizam fontes renováveis e não poluidoras utilizam do apelo de sustentabilidade para conseguir diminuição na carga tributária com relação às usinas que utilizem combustíveis fósseis.

### 5.3.4 *Pré- Tratamento da água*

A princípio a ideia da dissertação seria somente a unidade de Osmose Inversa para dessalinização para reduzir o custo de implantação inicial, mas é possível a implantação de unidade de pré-tratamento de água, como abrandadores, carvão ativado, troca iônica. Aumentaria o investimento inicial, mas com unidades de pré-tratamento a água do mar já chega com menor número de sais dissolvidos no reator de dessalinização, aumentando assim significativamente o tempo de vida útil das membranas de OI.

### 5.3.5 *Irradiação de produtos*

O Combustível do FBNR é projetado numa forma e tamanho que pode ser utilizado como fonte de radiação na indústria alimentícia, na agricultura, na medicina. Podemos usar o combustível não mais utilizado para fissão para esterilização e conservação de alimentos, sementes. O combustível gerado remanescente do processo fissão nuclear não será lixo<sup>6</sup> é sim um produto com considerável valor comercial.

---

<sup>6</sup> Lixo nuclear é definido com algo que não tem utilidade e tem que ser levado para isolamento para não contaminar o meio ambiente.

## 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

O modelo proposto consegue englobar em duas técnicas a utilização do alto potencial em reservas de urânio, altos índices de insolação diária (horas) e radiação solar global (MJ/m<sup>2</sup>.dia) na região do semi-árido do nordeste brasileiro. Usar a energia nuclear, que não depende das condições climáticas, em paralelo com a energia solar parece um conceito inteligente, pois resolve o problema de painéis fotovoltaicos apenas operarem em médias apenas 6 horas por dia. A utilização de plantas de duplo propósito (dessalinizar e gerar energia elétrica) pode diminuir em até 40% do custo total de implantação e operação quando comparadas a plantas de um único propósito.

OS valores estimados para dessalinização via Osmose Inversa (1,13 US\$/m<sup>3</sup>) com energia gerada via painéis fotovoltaicos (1,13 US\$/m<sup>3</sup>) , e de dessalinização via destilação multiestágios (1,18 US\$/m<sup>3</sup>) são valores considerados aceitáveis pela Associação Internacional de dessalinização. Os valores pesquisados para geração de energia via FBNR são atrativos; entretanto, energia gerada via painéis solares é extremamente cara e não competitiva quando comparada a valores de energia elétrica gerada via hidroelétricas.

Os parâmetros estimados de fator de força obrigatória, calor de operação, fluxo de calor crítico mostram que, no ponto de operação, a condição de leito fixo é satisfeita e o reator operara longe da condição de superaquecimento. Pelas suas características de reator pequeno, modular e simples o FBNR possui um custo muito menor quando comparados aos gerados nucleares instalados em ANGRA I e II. E por ser projetados baseados em conceitos como refrigeração passiva e segurança inerente ele torna um acidente nuclear quase impossível, podendo assim, em médio e longo prazo, quebrar esse paradigma que a sociedade tem de que usinas nucleares são caríssimas e de alto impacto ambiental.

Devido ao elevado custo de painéis solares, baixa produção de energia e os módulos fotovoltaicos ocuparem uma grande área, entende-se que a utilização de energia nuclear em paralelo a solar seria um projeto inviável no momento. Obteríamos um menor custo e uma maior produtividade ao utilizar parte do calor do FBNR para uma pré-tratamento da água do mar, eliminando assim parte dos sais dissolvidos e, depois de refrigerada, enviar essa água para unidades de dessalinização via OI. Utilizar-se-ia o alto potencial de energia solar em uma possível ampliação futura das unidades de dessalinização.



## 7 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Capacidade de geração do Brasil**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>. Acesso em Outubro/2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Energia Solar**. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia\\_solar/energia\\_solar.htm](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/energia_solar.htm). Acesso em Outubro/2011

AMJAD, Z. Reverse Osmosis. Membrane Technology. **Water Chemistry and Industrial Applications**. New York, USA, 1993.

BRANDT, D.C., LEITNER, G. F & LEITNER, W. E. **Reverse osmosis membrane states of the art**. In: Zahid, Amjad (ed). **Reverse osmosis – Membrane Technology. Water Chemistry and Industrial Application**. Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.

CARDOSO, Eliezer Moura. **Energia Nuclear**. Disponível em <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/energia.pdf>. Acesso em Agosto/2011

CHILDS, W.D.; DABIRIS, A, E.; AL-HINAI, A.; ABDULLAH, H.A. VARI-RO. Solar-powered desalting technology. **Desalination**, v.137, 2001

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo Residencial de Energia Elétrica na Região Nordeste**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br> Acesso em Outubro/2011

FOX R. W. ; MCDONALD A. T., 5ª ed., **Introdução a Mecânica dos Fluidos**, tradução para o português: Koury R. N. N., França G. A. C. editora LTC.

FULLWOOD, R.R. **Probabilistic Safety Assessment in the Chemical and Nuclear Industries**, p. 205-255, New York, 1998.

IOANNES, Tessaro; FARHANG, Sefidvash. **Thermohydraulics Calculations of FBNR**. 2008. MALLEVIALLE, J.; ODENDALL, P.E.; WIESNER, M.R. **Water Treatment Membrane Processes**. American Water Works Association Reserch Foundation; Lyonnaise des Eaux; Water Research Comossion of South Africa. Mcgraw-Hill. Washington, DC, USA, 1996.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, **Projeto São Francisco**, Relatório síntese, abril, 2001, il.

MME; DMAEE; DCRH. **Transposição das águas do São Francisco e Tocantins para o Semi-árido nordestino: avaliação preliminar**. Brasília; 1983, 72 p.il.

MOHSEN, M.S.; JABER, J. O. A photovoltaic-power system for water desalination. **Desalination**, v.38, p. 129-136, 2001.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. Disponível em: [http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/05.04.14.11/doc/atlas\\_solar-reduced.pdf](http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/05.04.14.11/doc/atlas_solar-reduced.pdf). Acesso em Novembro/2011.

PETERS, T. P. S. **Água : Fonte de vida**. Organizadores: Arminda Saconi Messias, Marcos Roberto Nunes Costa. Universidade Católica de Pernambuco, Série Encontro das águas, n.01, p. 77 – 104, Recife, 2005.

PETERS, T. P. S. **Água Subterrânea e dessalinização**. Organizadores: Arminda Saconi Messias, Marcos Roberto Nunes Costa. Universidade Católica de Pernambuco, Série Encontro das águas, n.02, p.125 – 142, Recife, 2006.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. **Quadro de Disponibilidade hídrica**. São Paulo, 2000

SENOR, D.J. **“A New Innovative Spherical Cermet Nuclear Fuel Element to Achieve an Ultra-Long Core Life for use in Grid-Appropriate LWRs”**, PNNL-16647

SHAYANI, R.A.; OLIVEIRA, M.A.G.; CAMARGO, I.M.T. **Comparação do Custo entre Energia Solar Fotovoltaica e Fontes Convencionais**. V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Brasília – DF, 2006.

SONNTANG, R. E.; BORGNAKKE C.; VAN WYLEN, G. J. **Fundamentals of Thermodynamics**, Tradução da 6ª ed., IDELCHIK, I. E.

SUASSUNA, J. **Opções e limitações tecnológicas para a Região Semi-árida do Nordeste**. Mossoró: [s.n.], 1989. (Coleção Mossoroense, série B, n.658).

## **8 ANEXOS**

### 8.1 Baixos Recursos Hídricos do Nordeste

Através das figuras 8.1 e 8.2 observa-se a maneira não uniforme de distribuição de recursos hídricos no Brasil e a escassez de água na região semi-árida do nordeste nas áreas hachuradas em laranja e vermelho.

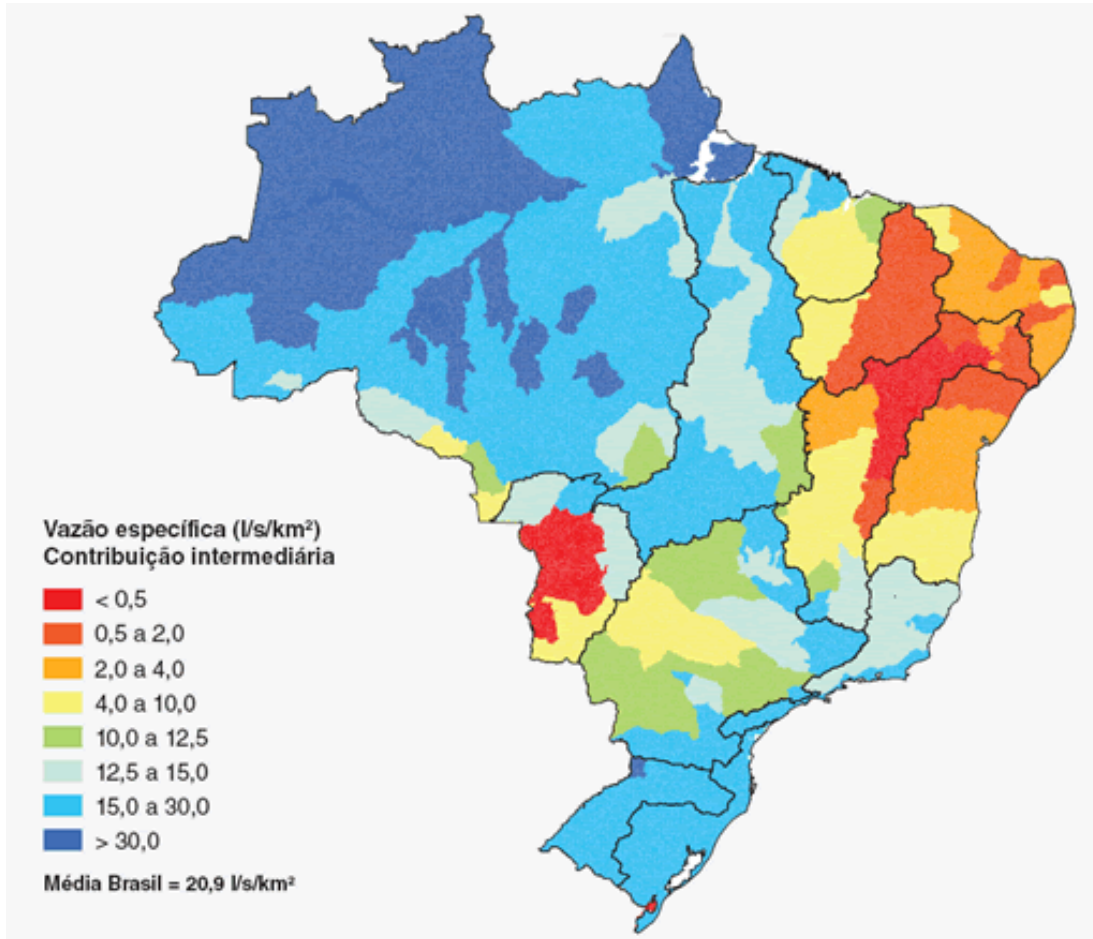


Figura 8.1: Distribuição espacial das vazões específicas no território brasileiro  
Figura



Figura 8.2: Situação do Brasil quanto à relação demanda / disponibilidade

## 8.2 Alta média anual de insolação diária no semi-árido nordestino (horas).

Nos figuras 8.3 e 8.4 observa-se o alto potencial do nordeste para equipamentos de geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos.

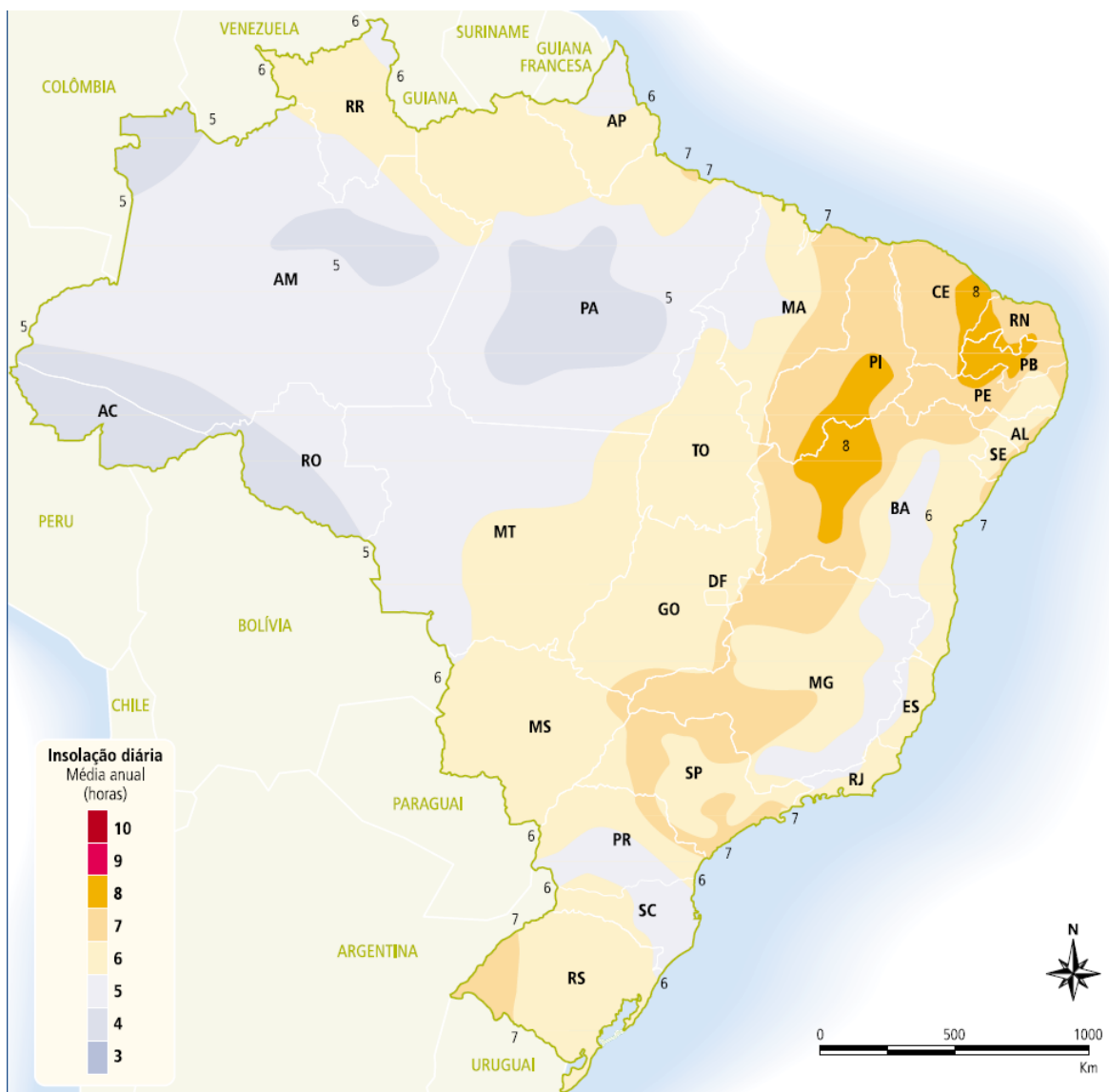


Figura 8.3: Média de insolação Diária no Brasil em Horas. Fonte: ATLAS Solarimétrico do Brasil. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.

### 8.3 Alto potencial de radiação solar global diária no semi-árido Nordestino (MJ/m<sup>2</sup>.dia).

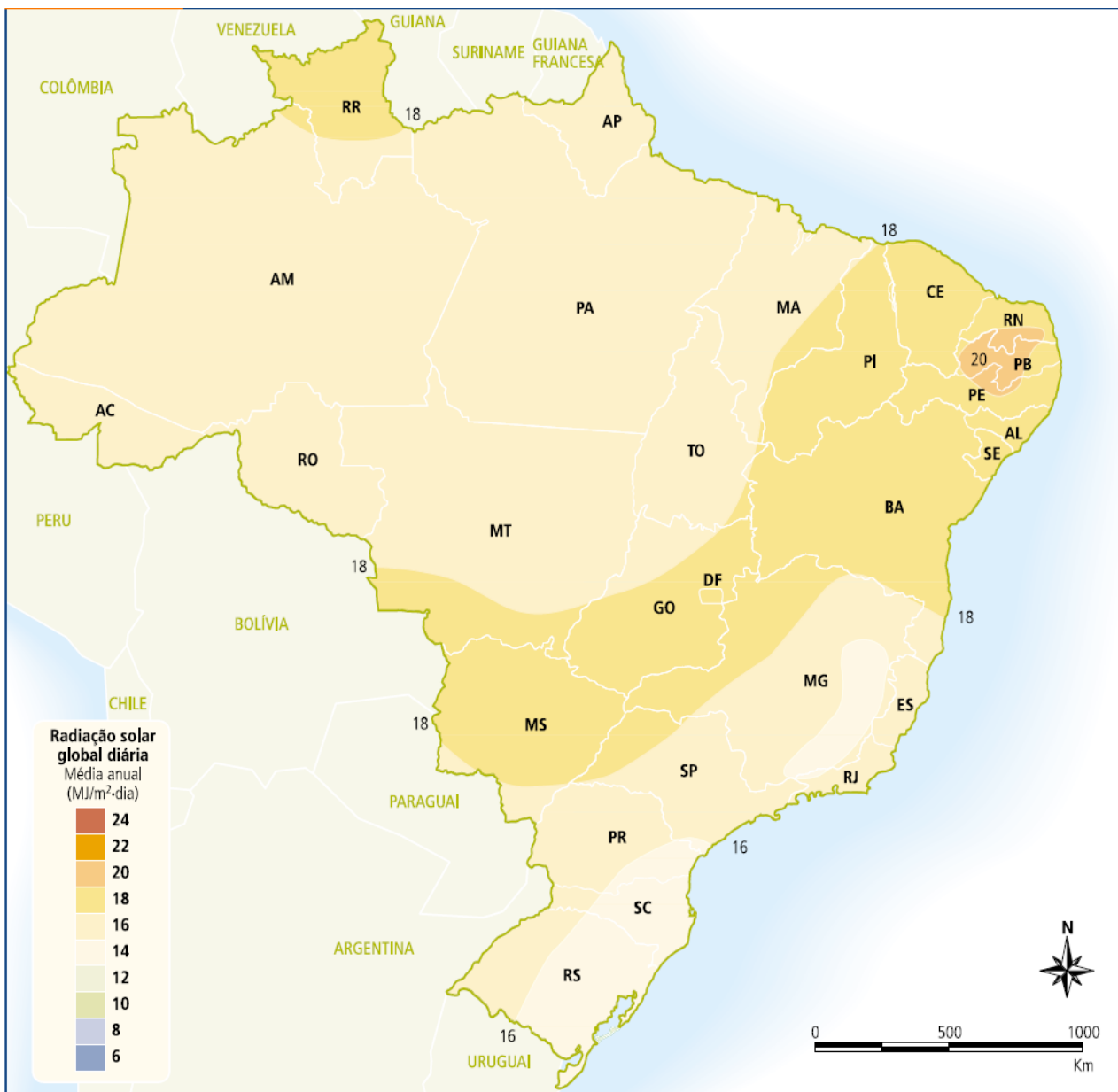


Figura 8.4: Radiação solar global diária no Brasil, média anual típica em MJ/m<sup>2</sup>.dia.  
Fonte: ATLAS Solarimétrico do Brasil. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.

## 8.4 Potencial de Combustível Nuclear no Brasil

Tabela 8.1: Reservas de Urânio no Brasil

Depósito-Jazida	Medidas e Indicadas		Sub-Total	Inferidas	TOTAL
	<40US\$/kg U	<80US\$/kg U		<80US\$/kg U	
Caldas (MG)		500t	500t	4.000t	4.500t
Lagoa Real/Caetité (BA)	24.200t	69.800t	94.000t	6.770t	100.770t
Santa Quitéria (CE)	42.000t	41.000t	83.000t	59.500t	142.500t
Outras				61.600t	61.600t
<b>TOTAL</b>	<b>66.200t</b>	<b>111.300t</b>	<b>177.500t</b>	<b>131.870t</b>	<b>309.370t</b>

Fonte: INB/DNPM

Tabela 8.2: Geração nucleoe elétrica no Brasil – PNE 2030

Usina	Potência (MW)	Conc. U308 (t)	Conversão UF6 (t)	Enriquecimento UTS (t)	Elemento Combustível	Status
Angra 1	650	150	128	90	17	Em operação
Angra 2	1350	290	246	176	30	Em operação
Angra 3	1350	290	246	176	30	2013/15
Sub total 1		730	620	442	77	
Nuclear 4	1000	225	190	135	24	Prev. 2020
Nuclear 5	1000	225	190	135	24	Prev. 2025
Nuclear 6/7	2x1000	450	380	270	48	Prev 2030
<b>Total</b>	<b>7.350</b>	<b>1.630</b>	<b>1.380</b>	<b>982</b>		

Fonte: INB

### 8.5 Layout do FBNR e parâmetros

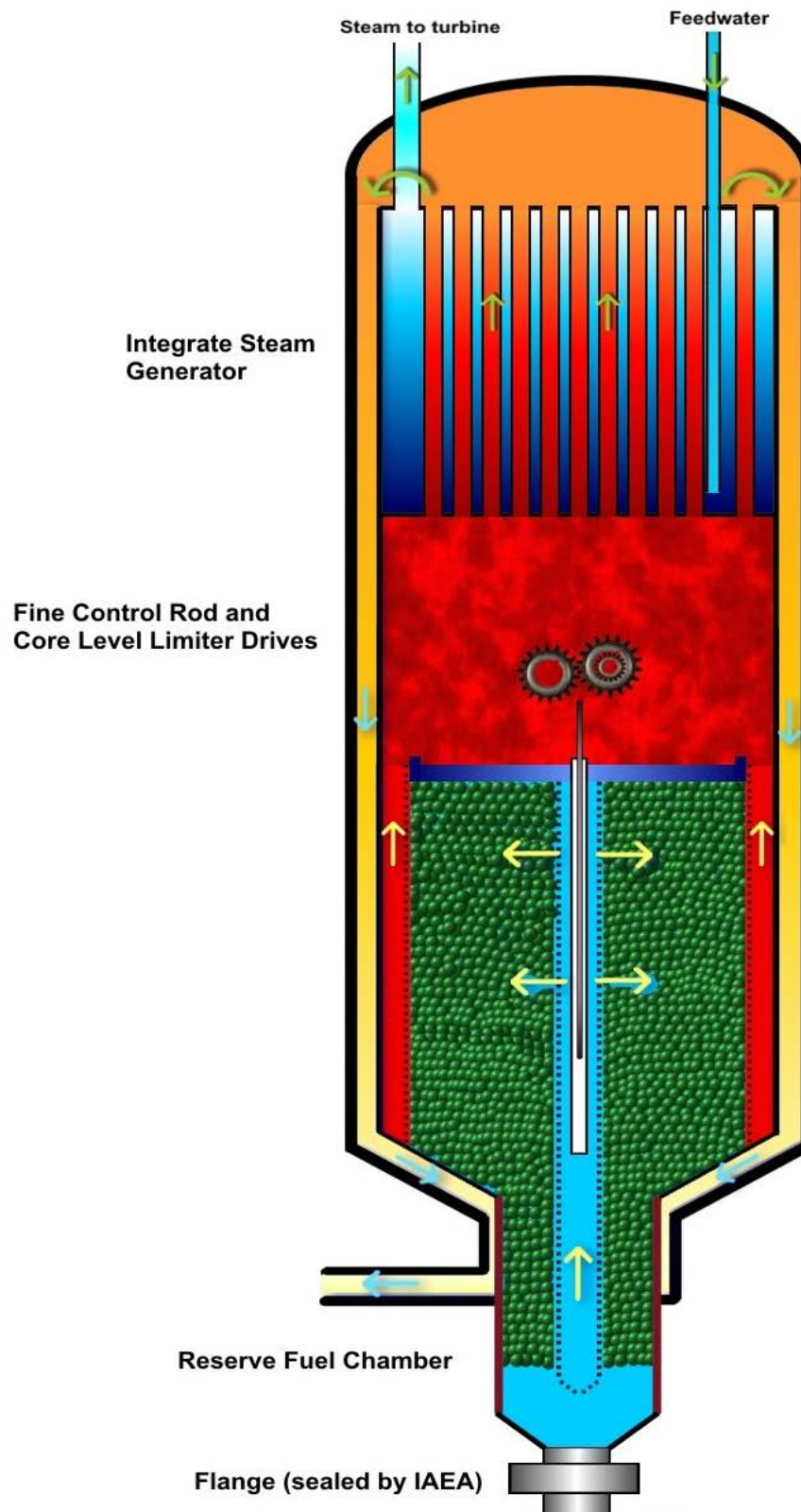


Figura 8.5: Formação do Leito Fixo no FBNR no ponto de Operação



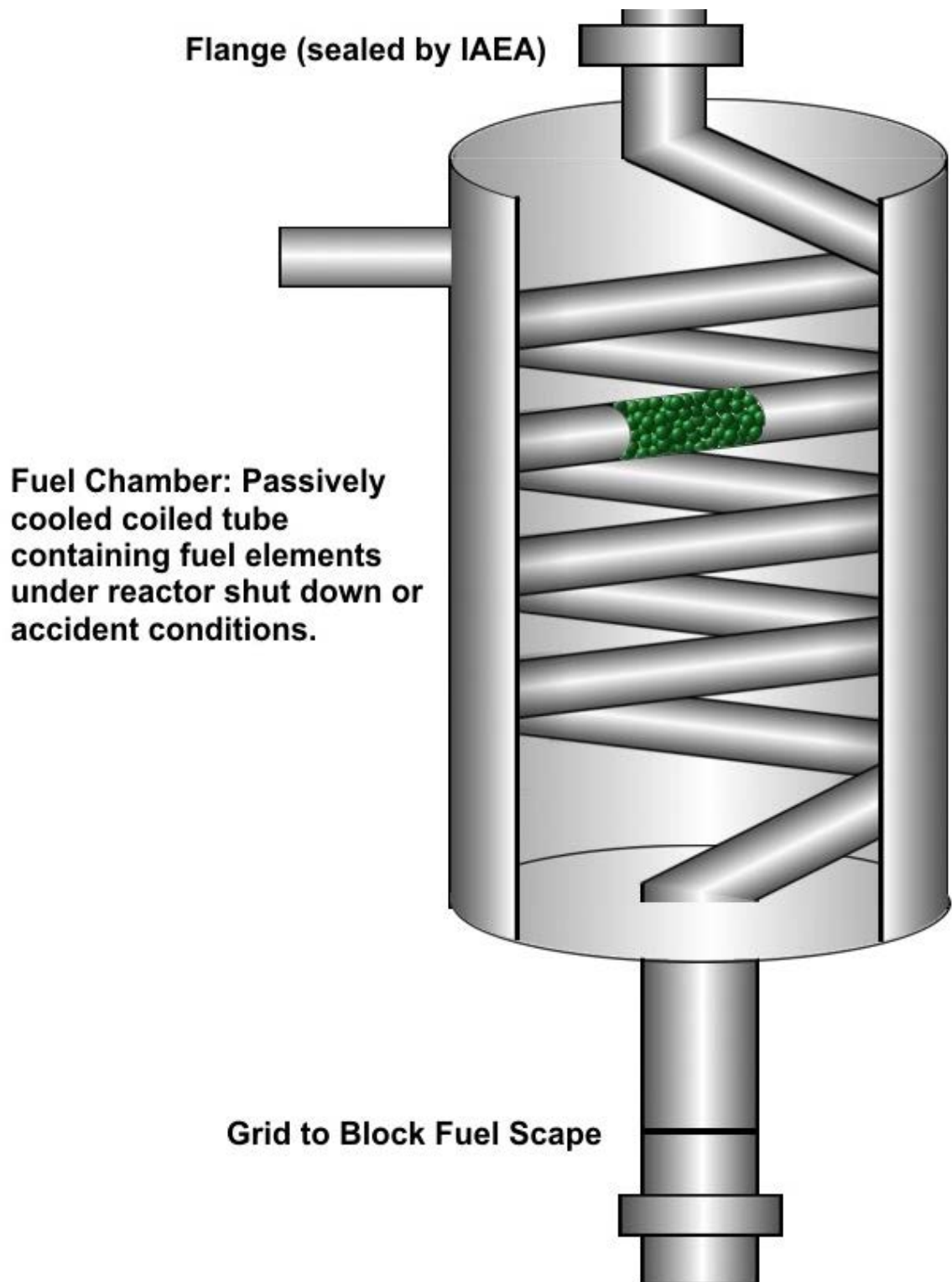


Figura 8.6: Elementos de combustível saem do núcleo do reator pela ação da gravidade e são resfriados por convecção natural quando a bomba cessa o fluxo de água.

Tabela 8.3: 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 <sup>3</sup> )	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 <sup>3</sup> )	747
Aumento de entalpia no núcleo (kJ/kg)	1490
Coeficiente de transferência de calor por ebulição em filme a 300 °C ( W/m <sup>2</sup> °C )	454
Media da densidade do elemento combustível. (gr/cm <sup>3</sup> )	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 <sup>3</sup> )	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 <sup>3</sup> )	3.96
Combustível no núcleo (Toneladas)	9.6
UO <sub>2</sub> 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 <sup>5</sup>
UO <sub>2</sub> 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