

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
USP

Paulo Henrique Soares da Silva

Cogeração aplicada à dessalinização da água em reatores nucleares no Brasil

São Paulo

2016

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
USP

Paulo Henrique Soares da Silva

Cogeração aplicada à dessalinização da água em reatores nucleares no Brasil

Monografia apresentada ao Programa de Educação
Continuada da Escola Politécnica de São Paulo para
obtenção do título de Especialista em Energias
Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Msc. Ronaldo Andreos

São Paulo

2016

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio, seja convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada à fonte.

Silva, Paulo Henrique Soares da

Cogeração aplicada à dessalinização da água em reatores nucleares no Brasil. / Paulo Henrique Soares da Silva -- São Paulo, 2016.
104 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Dessalinização 2. Energia nuclear 3. Água destilada 4. Cogeração.
Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa Angélica pela paciência durante minha ausência durante a elaboração deste trabalho e aulas do curso.

Agradeço aos meus pais Laurinete e Mariano que, por sempre acreditarem, enxergaram há muito tempo mais esta etapa concluída.

Agradeço ao Prof. Msc. Ronaldo Andreos pelas orientações pertinentes e sempre muito objetivas quanto ao desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

A região metropolitana de São Paulo vive sua maior crise hídrica desde 1930, quando começaram as medições nos sistemas de reservatórios fornecedores de água. A situação é pior no sistema Cantareira, cujo nível bate sucessivos recorde negativos desde o início do ano. Responsável pelo abastecimento de 8,1 milhões de pessoas, segundo a Sabesp, – quase metade da população da Grande São Paulo – o Cantareira opera com volume útil esgotado desde Julho.

A crise hídrica em São Paulo chamou a atenção pelo ineditismo e por acontecer numa das regiões mais desenvolvidas e populosas do país. Mas boa parte dos mais de 10 milhões de brasileiros que moram no semiárido nordestino convive com a estiagem ano após ano. A falta contínua de chuvas desde 2011 fez com que, em 2013, ocorresse na região à pior seca dos últimos 50 anos.

Neste contexto, aliado ao fato de que a matriz energética brasileira é extremamente dependente de suas hidroelétricas, apresenta-se a ideia de utilizar, através da cogeração, as tecnologias nuclear e de dessalinização com o objetivo de minimizar os efeitos da falta de água e, ao mesmo tempo, diversificar a matriz.

As usinas nucleares emitem níveis baixíssimos de gases de efeito estufa em sua operação, exigem pequena área para sua construção e são totalmente independentes de fatores climáticos. A dessalinização tem como principal característica a possibilidade de tornar a água salobra em própria para consumo, atacando assim o problema de escassez de água.

A cogeração pode ser o elo entre estas duas tecnologias, fazendo com que uma planta que a princípio seja desenvolvida para gerar energia gere também vapor para o processo de dessalinização.

Palavras-chave: Dessalinização, energia nuclear, água destilada, cogeração, ciclos termodinâmicos

ABSTRACT

The metropolitan region of São Paulo lives your greatest water crisis since 1930, when they started measurements in water reservoirs systems suppliers. The situation is worse in the Cantareira system, which both hit successive negative record since the beginning of the year. Responsible for supplying 8.8 million people - nearly half the population of São Paulo - the Cantareira operates useful volume sold since July.

The water crisis in São Paulo drew attention by originality and place one of the most developed regions and populous country. However, many of the more than 10 million Brazilians living in the northeastern semi-arid lives with drought year after year. The continuing lack of rainfall since 2011 has meant that, in 2013, occurred in the region the worst drought in 50 years.

In this context, coupled with the fact that the Brazilian energy matrix is highly dependent on your hydro, presents the idea of using, through cogeneration, nuclear technology and desalination in order to minimize the effects of lack of water and, while diversify the matrix.

Nuclear power plants emit very low levels of greenhouse gases, require small area for its construction and are completely independent of climatic factors. Desalination has as main characteristic the possibility to make brackish water fit for consumption, so attacking the problem of water scarcity.

Cogeneration maybe the link between these two technologies, making a plant, which was initially developed to generate energy, also generate steam to the desalination process.

Keywords: Desalination, nuclear energy, distilled water, cogeneration, thermodynamics cycles.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição da água no mundo.....	2
Tabela 2 – Visão geral dos reatores de energia e distribuição nuclear.....	30
Tabela 3 - Distribuição dos reatores em operação no mundo utilizados em aplicações não elétricas.....	33
Tabela 4 – Fonte/Potência elétrica instalada.....	41
Tabela 5 – Características principais do reator.....	74
Tabela 6 – Dados técnicos da turbina selecionada.....	76
Tabela 7 – Custos para diferentes tecnologias e 3 diferentes capacidades.....	84

LISTA DE SIGLAS E UNIDADES

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
C	Carbono
Ca	Cálcio
CAREM	Central Argentina de Elementos Modulares
CNEA	Comisión Nacional de Energía Atómica
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CO ₂	Dióxido de Carbono
H	Hidrogênio
IAEA	International Atomic Energy Agency (Agência Internacional de Energia Atômica)
IEA	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
IFUSP	Instituto de Física da Universidade de São Paulo
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Kcal	quilocaloria
kg	quilograma
kW	Quilowatt
kWe	Quilowatt elétrico
kWh	Quilowatt hora
kWt	Quilowatt térmico
Mg	Magnésio
MW	Megawatt
MWe	Megawatt elétrico
MWh	Megawatt hora
MWt	Megawatt térmico

O	Oxigênio
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ppm	partes por milhão
ppt	partes por trilhão
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMR	Small Modular Reactor (Pequeno Reator Modular)
TWe	Terawatt elétrico

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Distribuição da água no mundo	2
Figura 2– Matriz energética brasileira	3
Figura 3– Fluxo energético brasileiro	4
Figura 4 – 1ª Lei da Termodinâmica (Conservação de energia)	9
Figura 5– 2ª Lei da Termodinâmica (Perdas na conversão de energia)	10
Figura 6– Trabalho e Calor em um sistema	11
Figura 7– Princípio de Máquina Térmica	12
Figura 8– Princípio de Máquina Térmica de Resfriamento	13
Figura 9– Esquema do Ciclo de Carnot	14
Figura 10– Representação do Ciclo de Carnot em função do gráfico $T \times S$	15
Figura 11– Ilustração básica do ciclo Rankine	16
Figura 12– Representação do Ciclo Rankine em função do gráfico $T \times S$	17
Figura 13 – Efeito da redução de pressão no condensador – potência	19
Figura 14– Efeito do aumento da pressão na caldeira – potência	19
Figura 15– Efeito do superaquecimento – potência	20
Figura 16– Ciclo Rankine com Reaquecimento	20
Figura 17– Ciclo Rankine com Extração e Regeneração	21
Figura 18– Esquema do Ciclo Bryton	22
Figura 19– Esquema construtivo de uma turbina	23
Figura 20– Processo de criação do elemento combustível	24
Figura 21– Vaso de Pressão	25

Figura 22– Representação de um Vaso de Contenção típico	26
Figura 23– Representação em um Edifício do Reator típico	27
Figura 24– Esquema de funcionamento de um reator nuclear	28
Figura 25– Processos industriais e tipos de reatores empregados por temperatura	32
Figura 26– Custos da eletricidade e emissões de CO ₂ na Alemanha	35
Figura 27– Esquema transformação de energia em calor tradicional	37
Figura 28– Esquema transformação de energia em calor com cogeração	37
Figura 29– Resumo geral FUE	39
Figura 30– Turbina a vapor	42
Figura 31– Corte de uma turbina a vapor multiestágios	44
Figura 32– Tipos de turbina a vapor	45
Figura 33– Esquema simplificado do gerador	46
Figura 34– Diagrama de salinidade da água	49
Figura 35– Destilação Multi-Flash	51
Figura 36– Câmara típica de evaporação de uma planta MSF	52
Figura 37– Destilação de Múltiplo Efeito	54
Figura 38– Configurações HTE e VTE	55
Figura 39– Esquema típico de funcionamento da Osmose Reversa	56
Figura 40– Composição básica de uma Planta RO	57
Figura 41– Central nuclear tipo SMR acoplada a uma planta MED	60
Figura 42– Central nuclear tipo SMR acoplada a uma planta RO	62
Figura 43– Tipos de combustíveis e valores energéticos	63
Figura 44– Foto do núcleo do reator IEA-R1	64

Figura 45 – Construção da Usina de Angra 1 em meados da década de 1970	65
Figura 46 – Centro Experimental Aramar, Iperó, SP	67
Figura 47– Usinas de Angra 1 e Angra 2 atualmente	68
Figura 48 – Construção da Usina de Angra 3	69
Figura 49 – Cogeração em uma planta dessalinizadora tipo MED	73
Figura 50 – Vista em corte da turbina Siemens SST-6000	75
Figura 51 – Balanço energético do sistema	79
Figura 52 – Variação do GOR com o efeito da temperatura em diferentes números de efeitos	80
Figura 53– Condições energéticas da planta e quantidade de vapor destinado ao processo	82

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Motivação e Justificativas	1
1.2.1 O Problema da Água Potável na Atualidade	1
1.2.2 A matriz energética brasileira	2
1.2.3 A crise hídrica no Brasil e os efeitos econômicos	4
1.2.4 A Dessalinização na Geração de Água Potável	6
2. ESTADO DA ARTE	8
2.1 Fundamentos de Termodinâmica e Ciclos de Potência	8
2.1.1 Definição de Termodinâmica	8
2.1.2 Leis da Termodinâmica	8
2.1.3 Trabalho e Calor	10
2.1.4 Máquinas Térmicas	11
2.1.5 Ciclo de Carnot	13
2.1.6 Ciclo Rankine	16
2.1.7 Ciclo Brayton	22
2.2 Energia Nuclear e Aplicações	23
2.2.1 Funcionamento do reator	23
2.2.2 Aplicações	29
2.3 Cogeração	36
2.3.1 Conceito de Cogeração	36
2.3.2 Rendimento da Cogeração	37
2.3.3 Fator de Utilização de Energia	38
2.3.4 Qualificação da Cogeração	39
2.3.5 Equipamentos Empregados	41
2.4 Dessalinização da Água	47
2.4.1 Tecnologias Empregadas	48
2.5 Rejeitos do Processo da Dessalinização	57
2.6 Configurações Básicas e Balanço Energético	58
2.7 Combustíveis Utilizados	62
3. O PROGRAMA NUCLEAR BRASILEIRO	64
3.1 História	64
3.2 O Programa Nuclear “Paralelo”	66

3.3	Situação Atual	66
3.4	Acidentes Radiológicos.....	70
4.	PROPOSTA DE APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO NO BRASIL	71
4.1	Integração da cogeração ao SIN.....	71
4.2	Panorama governamental.....	71
4.3	Descrição técnica do sistema proposto.....	72
4.3.1	Configuração do sistema de cogeração	72
4.3.2	Dados do reator	74
4.3.3	Seleção da turbina.....	75
4.3.4	Condensador	77
4.3.5	Circuito de Acoplamento.....	77
4.4	Balanco Energético.....	77
4.5	Consumo Específico de Vapor	79
4.6	Produção de água potável	80
4.7	Totalização dos custos.....	83
5.	CONCLUSÕES	86
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

1. INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar uma alternativa à atual escassez hídrica no Brasil, através do método da dessalinização da água em um sistema de cogeração instalado em uma planta nuclear.

1.2 Motivação e Justificativas

1.2.1 O Problema da Água Potável na Atualidade

Desde as origens do ser humano, a água tem sido um recurso essencial para a vida e para o desenvolvimento de uma notável variedade de atividades domésticas, agrícolas e industriais. Porém, as fontes de água doce disponíveis no mundo são escassas frente a necessidade de abastecer o consumo da população mundial nos próximos anos.

De acordo com a CNEA, no planeta Terra, se estima que há 1.400 milhões de km³ de água. Conforme é demonstrado na Tabela 1, aproximadamente 97% é água salgada e os 3% restantes correspondem às reservas de água doce. Desses 3%, 1,75% correspondem às fontes de escassa acessibilidade como aquíferos, geleiras e camadas de gelo. Finalmente, aproximadamente 0,75% da água mundial corresponde a reservas de lagos e rios que são aptos e acessíveis para o consumo humano.

Água do mundo		Água doce		Água Doce Superficial	
Oceanos	97%	Geleiras	68,70%	Lagos	87%
Água doce	3%	Água subterrânea	30,10%	Pântanos	11%
		Outros	0,90%	Rios	2%
		Água superficial	0,30%		

Tabela 1 – Distribuição da água no mundo

Fonte: CNEA, 2013

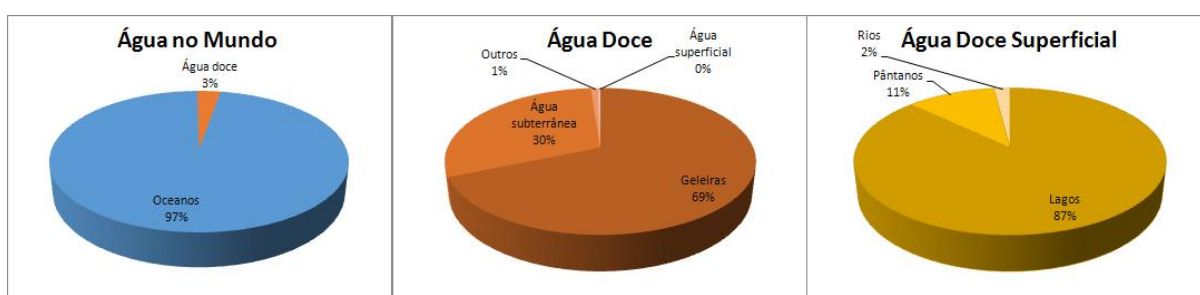


Figura 1 – Distribuição da água no mundo

Fonte: CNEA, 2013

Não é apenas a quantidade, é a qualidade e a acessibilidade da água presente na natureza que a faz um recurso de volumes insuficientes para o futuro próximo. Em muitos casos, em adição, a contaminação resulta em uma ameaça para as fontes naturais de abastecimento de água doce.

Conforme a localização das fontes naturais existentes, o consumo de água per capita e sua disponibilidade variam consideravelmente de acordo com a área geográfica. Paralelamente, existe um rápido incremento no consumo de água como consequência do crescimento demográfico e dos padrões de consumo que buscam uma melhor qualidade de vida.

1.2.2 A matriz energética brasileira

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, o Brasil possui a matriz energética mais renovável do mundo industrializado com 39,4% de sua produção proveniente de fontes como recursos hídricos, biomassa e etanol, além das energias eólica e solar. A Figura 2 ilustra que as usinas hidrelétricas são responsáveis pela geração de mais de 65% da eletricidade do país.

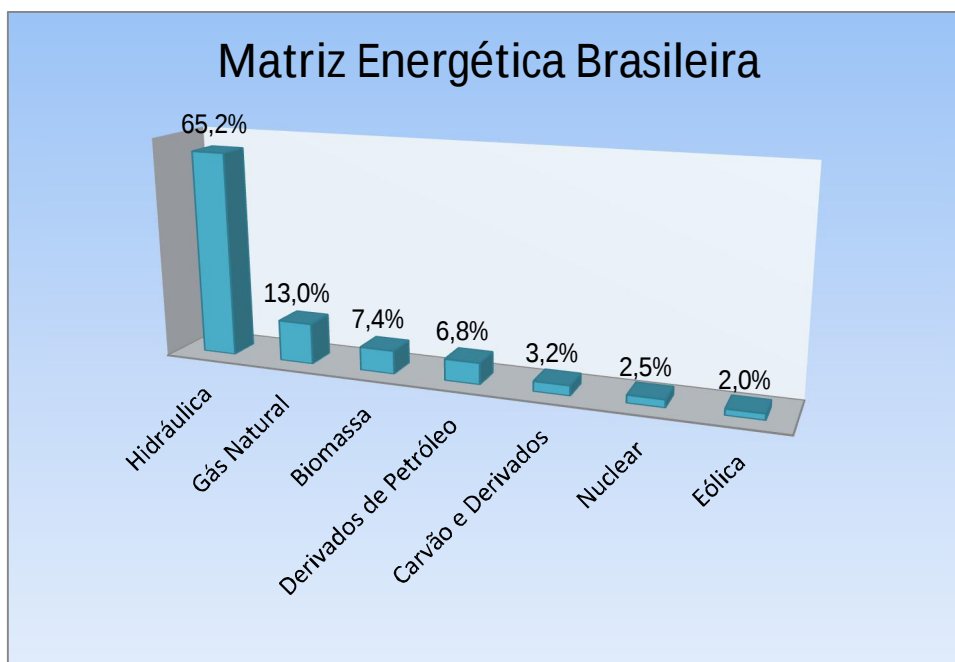


Figura 2 – Matriz energética brasileira

Fonte: ANEEL, 2014

Conforme representado na Figura 3, observa-se que o consumo de energia é composto basicamente pelos setores residenciais e industriais. Juntos eles formam o destino final de mais de 50% da energia produzida.

Fluxo Energético - Eletricidade

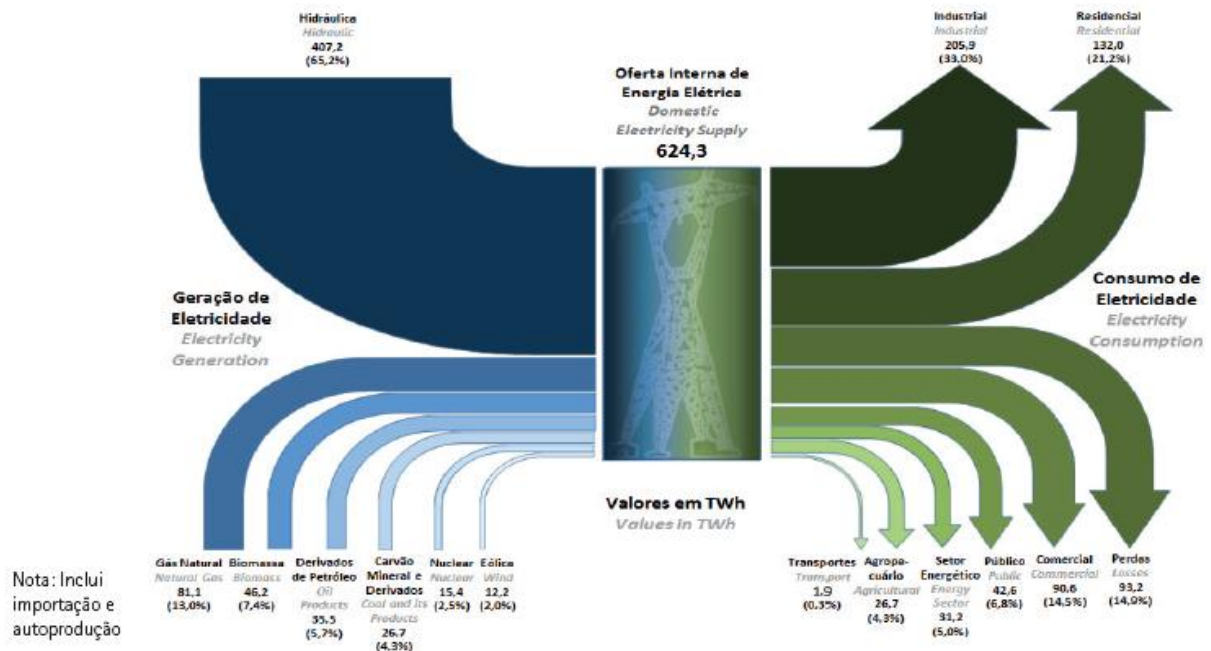


Figura 3 – Fluxo energético de eletricidade brasileiro

Fonte: ANEEL, 2014

Os dados apresentados através dos gráficos mostram um país com energia predominantemente renovável, de fonte limpa e que gera menos emissões de carbono por unidade de energia produzida. Esta percepção, aliada ao fato dos custos de construção mais baixos das usinas hidrelétricas e a alta disponibilidade de água, fizeram com que a matriz energética brasileira se desenvolvesse majoritariamente a partir dessa fonte.

O resultado que pode se ver hoje é que acabou criando-se um país extremamente dependente de apenas uma tecnologia de geração de energia – a hidráulica – e de uma matéria-prima fundamental para essa tecnologia – a água.

1.2.3 A crise hídrica no Brasil e os efeitos econômicos

Este ano, São Paulo, o estado mais populoso do Brasil, passa por uma situação de seca e redução de oferta de água poucas vezes vistos na história do local. Um dos símbolos desta crise é a diminuição drástica do Sistema Cantareira, imenso

reservatório administrado pela Sabesp e que, segundo a mesma, é responsável pelo abastecimento de água de cerca de 8,1 milhões de pessoas. A seca na Região Sudeste do país, associada a fatores ligados à infraestrutura e planejamento, é a responsável pela pior crise hídrica enfrentada pela região.

De acordo com especialistas da própria Sabesp, as causas da crise vão desde a diminuição das chuvas no Estado até o desmatamento, à ocupação desenfreada dos mananciais e à falta de planejamento do governo de São Paulo.

Mas a escassez de água não é um problema exclusivo da maior cidade brasileira. Tanto que, enquanto muito se falou em São Paulo, os níveis dos reservatórios do Rio de Janeiro depararam-se com situação ainda piores. Belo Horizonte, também chegou a sinalizar, no início do ano, a possibilidade do racionamento. Como estas três capitais estão no Sudeste, pode parecer que a crise é restrita a essa região, o que também não é verdade. O Sul do país que, no momento, é tratado como “livre da crise”, passou por situação parecida em 2006, quando uma estiagem atingiu o Paraná, ocasionando falta de água para milhares de pessoas. A seca chegou até mesmo a Curitiba, cidade considerada como capital ecológica do país.

Todo esta situação, iniciada no final de 2014, acabou gerando uma das piores crises do setor elétrico. O desafio de garantir a energia de consumo passou a ser resolvido com a contribuição das usinas térmicas, que são “poluidoras”, mais caras e acabam pressionando o preço das tarifas. Segundo a Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro, nos três primeiros meses deste ano de 2015, o preço da energia subiu 48% e o Brasil passou a ocupar a primeira posição do ranking de maior custo médio da energia para a indústria, com R\$ 534,28 por MWh.

O problema da água estendeu-se também para a economia. A Fipe(Fundação Instituto de Pesquisa Econômicas) estimou que a falta de chuvas respondeu por até 10% da inflação registrada em São Paulo no 1º trimestre de 2015. O motivo é o aumento das tarifas que foram adotadas no início do ano para compensar as perdas pela ativação das termelétricas. Para o caso dos alimentos *in natura*, o percentual foi de 3,5% do avanço do IPC (Índice de Preços ao Consumidor)

De maneira geral, todo setor, industrial ou residencial, dependente de energia elétrica para manter em funcionamento seu processo produtivo ou mesmo para

consumo próprio, é diretamente afetado pela crise. Em momentos como este, onde a crise perdura por um longo período, o impacto estende-se a toda a economia e passa a gerar inflação, aumento de tarifas, paralisação de atividades em indústrias, desemprego, queda na exportações, além do próprio abalo direto da falta de energia.

1.2.4 A Dessalinização na Geração de Água Potável

Em resposta a escassez de água, diversos países têm começado a utilizar sistemas de dessalinização de água que geram água potável de baixa salinidade a partir da água do mar. O uso dessas tecnologias vem sendo incrementado nos últimos tempos, particularmente na África, Ásia e Oriente Médio, onde a escassez de água doce é um dos principais desafios que a população enfrenta na atualidade.

Esses processos são muito promissores, pois ajudam a mitigar o problema da escassez de água. Porém requerem de muita energia, em forma de calor e eletricidade para seu funcionamento.

O uso da energia nuclear para abastecimento energético os processos de produção de água potável, frente a outras fontes de energia, resulta em uma alternativa confiável e segura como solução

Devido à análise da política de geração de energia no Brasil e no mundo e da atual crise hídrica vivida no Brasil é que nasce a ideia da dissertação. A ideia é utilizar em conjunto tecnologias que funcionam muito bem sozinhas com o intuito de solucionar um problema existente (falta de água e energia), e ao mesmo tempo atendendo os padrões mundiais de geração de energia elétrica. A ideia 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 discutido a implantação de novos modelos energéticos, que sejam renováveis, sustentáveis, limpos, gerando assim menos impacto ambiental para as gerações futuras. Pois, aliando-se a cogeração à energia nuclear, ou seja, um sistema que

busca a eficiência energética a uma das fontes mais limpas em termos de emissão de dióxido de carbono, é que se deu a concepção e proposta da dissertação.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Fundamentos de Termodinâmica e Ciclos de Potência

2.1.1 Definição de Termodinâmica

De acordo com Joseph Kestin (1913 – 1993), Engenheiro Polonês, A ciência Termodinâmica é um ramo da física que descreve os processos naturais nos quais as mudanças de temperatura desempenham um papel importante. Tais processos envolvem a transformação de uma forma de energia em outra. Consequentemente, a Termodinâmica lida com leis que governam tais transformação de energia.

2.1.2 Leis da Termodinâmica

A termodinâmica é uma ciência experimental que baseia-se em duas Leis de conservação:

1ª Lei – Conservação de Energia

Estabelece que a quantidade total de energia em um sistema isolado permanece constante. Esta Lei enuncia-se como: “A variação de energia interna de um sistema é igual a diferença entre o calor e o trabalho trocados pelo sistema com o meio exterior”. A Figura 4 abaixo exemplifica esta Lei.

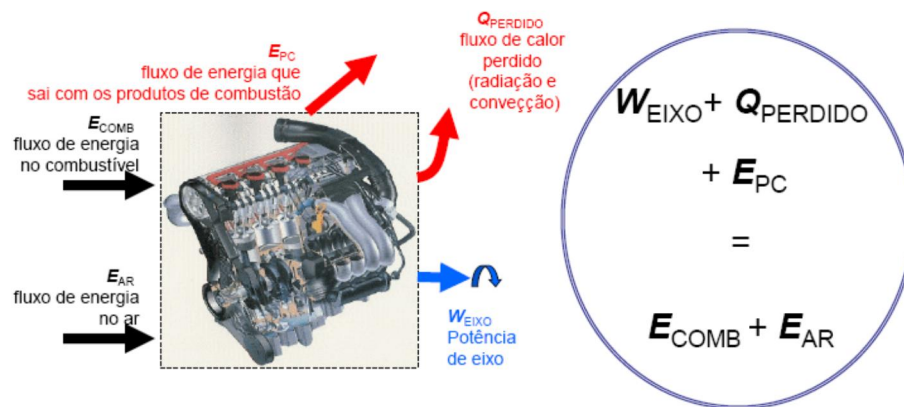


Figura 4 - 1ª Lei da Termodinâmica (Conservação de energia)

Fonte: SIMÕES-MOREIRA, JR.; ANDREOS, R, 2015

2ª Lei da Termodinâmica – Sobre o fluxo de calor e as perdas

Esta é a lei que trata diretamente do rendimento de máquinas térmicas.

De acordo com Clausius (1822-1888), físico e matemático alemão, o calor não pode fluir, de forma espontânea, de um corpo de temperatura menor, para um outro de temperatura mais alta.

Segundo Kelvin, é impossível a construção de uma máquina que, operando em um ciclo termodinâmico, converta toda a quantidade de calor recebido em trabalho, portanto há perdas. Assim, 2ª Lei é exemplificada pela Figura 5.

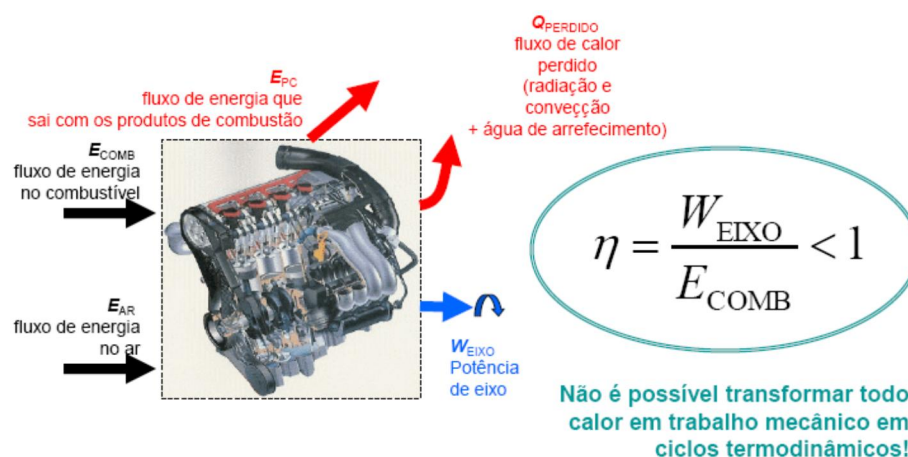


Figura 5 - 2ª Lei da Termodinâmica (Perdas na conversão de energia)

Fonte: SIMÕES-MOREIRA, JR.; ANDREOS, R, 2015

2.1.3 Trabalho e Calor

O trabalho, W , é a forma de interação de energia que um sistema ou volume de controle realiza ou sofre em relação ao meio que o circunda e que pode ser traduzido pela ação de uma força agindo a uma distância. A potência, é a taxa temporal na qual o trabalho é realizado. O trabalho de um sistema simples compressível (reversível) na forma diferencial é dado por:

$$\delta W = PdV$$

δ indica que o trabalho depende do processo executado. O Trabalho total de um sistema será:

$$W_{12} = \int_{v1}^{v2} PdV$$

Calor, Q , é a forma de energia que é transferida através da fronteira do sistema ou da superfície do volume de controle devido exclusivamente a uma diferença de temperatura entre o sistema ou volume de controle e o meio ambiente. O fluxo de calor, $\dot{Q}$, é taxa temporal na qual o calor é transferido. Este processo é ilustrado na Figura 6.

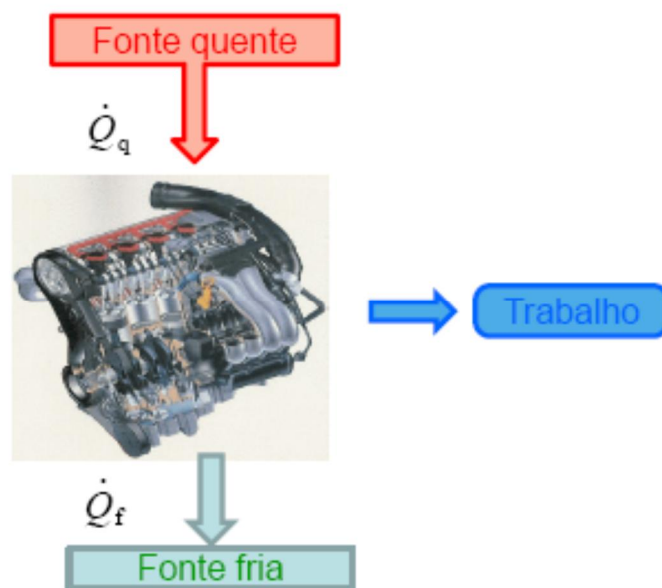


Figura 6 – Trabalho e Calor em um sistema

Fonte: SIMÕES-MOREIRA, JR.; ANDREOS, R, 2015

2.1.4 Máquinas Térmicas

As máquinas térmicas foram os primeiros dispositivos mecânicos a serem utilizados em larga escala na indústria, por volta do século XVIII. Na forma mais primitiva, era usado o aquecimento para transformar água em vapor, capaz de movimentar um pistão, que por sua vez, movimentava um eixo que tornava a energia mecânica utilizável para as indústria da época.

Chamamos máquina térmica o dispositivo que, utilizando duas ou mais fontes térmicas, faz com que a energia térmica se converta em energia mecânica (trabalho). A Figura 7 demonstra o princípio de máquina térmica.

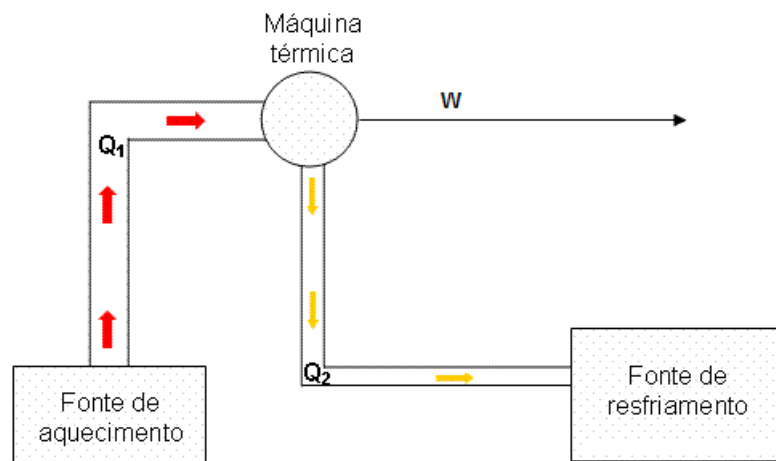


Figura 7–Princípio de Máquina Térmica

Fonte: SIMÕES-MOREIRA, JR.; ANDREOS, R, 2015

A fonte térmica fornece uma quantidade de calor (Q_1) que no dispositivo transforma-se em trabalho (W) mais uma quantidade de calor que não é capaz de ser utilizado como trabalho (Q_2).

Assim é válido que:

$$|W| = |Q_1| - |Q_2| \quad (1)$$

Utiliza-se o valor absoluto das quantidades de calor pois, em uma máquina térmica que tem como objetivo o resfriamento, por exemplo, estes valores serão negativos.

Neste caso, o fluxo de calor acontece da temperatura menor para a maior. Mas conforme a 2ª Lei da Termodinâmica, este fluxo não acontece espontaneamente, logo é necessário que haja um trabalho externo, assim, na Figura 8 temos:

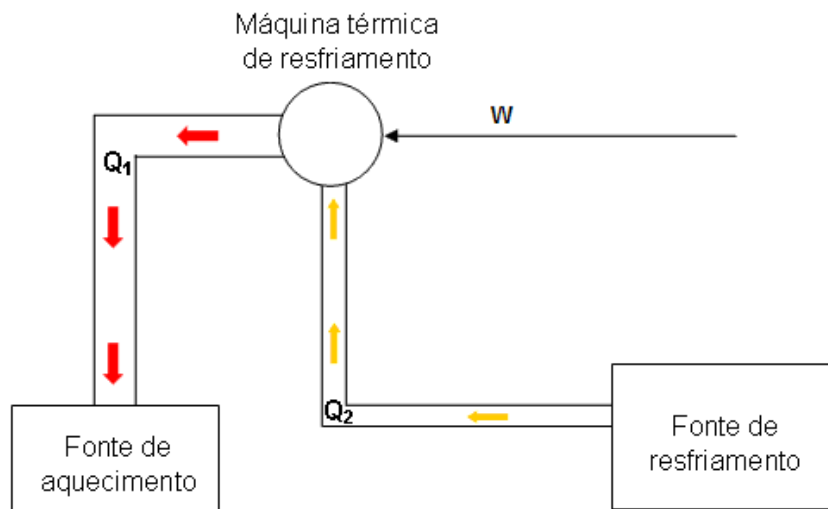


Figura 8 - Princípio de Máquina Térmica de Resfriamento

Fonte: SIMÕES-MOREIRA, JR.; ANDREOS, R, 2015

Defini-se a eficiência térmica de uma máquina térmica como sendo:

$$\text{eficiência térmica} = \frac{\text{trabalho líquido}}{\text{calor total fornecido}} \quad (2)$$

ou

$$\eta = \frac{W_{líq}}{Q_h} = 1 - \frac{Q_l}{Q_h} \quad (3)$$

A eficiência térmica é sempre menor que a unidade, ou seja, não se pode transformar todo o calor em trabalho.

2.1.5 Ciclo de Carnot

A condição de impossibilidade em se obter rendimento 100% de uma máquina térmica foi comprovada pelo Engenheiro Sadi Carnot (1796 – 1832). Sadi então

propôs que uma máquina térmica teórica ideal, funcionaria percorrendo um ciclo particular, hoje designado Ciclo de Carnot.

O ciclo de Carnot é um ciclo idealizado, reversível, no qual o fluido operante é um gás perfeito, que corresponde a duas transformações **isotérmicas** e duas **adiabáticas**, intercaladas. Os processos descritos pelo gás nesse ciclo são:

1º) *expansão isotérmica* 2-3, durante a qual o gás está em contato com o sistema de temperatura constante T_3 (fonte quente), recebendo dele uma quantidade de calor Q_A .

2º) *expansão adiabática* 3-4, durante a qual não ocorrem trocas de calor com o ambiente. O sistema realiza trabalho com diminuição de energia interna e, portanto, de temperatura.

3º) *contração isotérmica* 4-1, durante a qual o gás está em contato com o sistema de temperatura constante T_4 (fonte fria), cedendo a ele uma quantidade de calor Q_B .

4º) *contração adiabática* 1-2, durante a qual o gás não troca calor com o ambiente. O sistema recebe trabalho, que serve para aumentar sua energia interna e, portanto, sua temperatura.

As Figuras 9 e 10 representam, respectivamente, o esquema e o gráfico do Ciclo de Carnot.

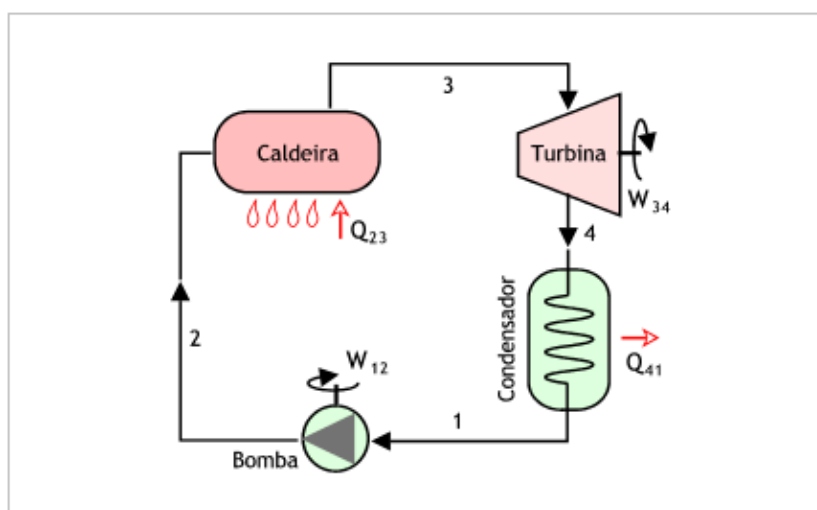


Figura 9 – Esquema do Ciclo de Carnot

Fonte: SOARES, M., 2015

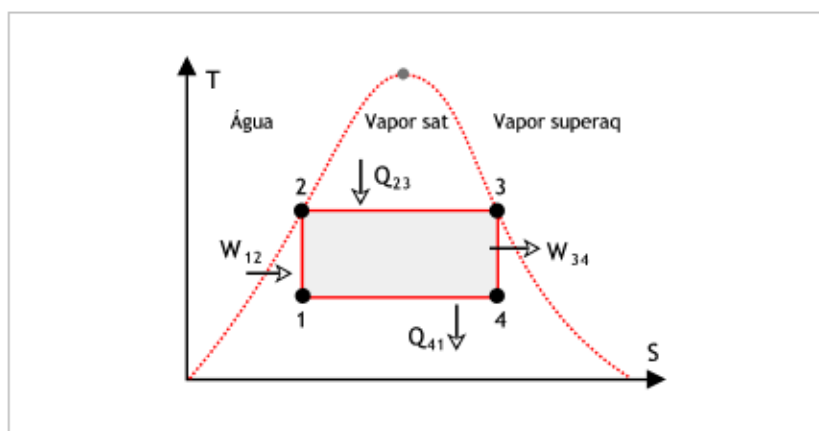


Figura 10 – Representação do Ciclo de Carnot em função do gráfico T X S

Fonte: SOARES, M., 2015

No ciclo de Carnot, os calores trocados (Q_{23} e Q_{41}) e as temperaturas termodinâmicas (T_3 e T_4) das fontes quente e fria são proporcionais, valendo a relação:

$$\frac{Q_{2-3}}{Q_{4-1}} = \frac{T_3}{T_4} \quad (4)$$

Substituindo na equação do rendimento de uma máquina térmica, obtemos, para a máquina de Carnot:

$$\eta = 1 - \frac{T_4}{T_3} \quad (5)$$

Considerando a temperatura da fonte fria (T_4) igual a zero Kelvin (zero absoluto), temos $\eta = 1$ ou $\eta = 100\%$. Entretanto, esse fato contraria a segunda lei da termodinâmica, que garante ser impossível um rendimento de 100%, o que leva a concluir que nenhum sistema físico pode se apresentar com temperatura igual ao zero absoluto.

2.1.6 Ciclo Rankine

O ciclo Rankine é um ciclo termodinâmico reversível que converte calor em trabalho. Este ciclo gera grande parte de toda a energia elétrica produzida no mundo. Ele foi nomeado após a descoberta do polímata escocês William John M. Rankine (1820-1872).

O ciclo Rankine descreve a operação de turbinas à vapor comumente encontrados em estações de produção de energia. Em tais estações, o trabalho é gerado ao se vaporizar e condensar alternadamente um fluido de trabalho (normalmente água, mas pode incluir outros fluidos, como amônia) que segue um ciclo fechado e é constantemente reutilizado, assim como ilustrado na Figura 11. Vapor é também utilizado no caso especial de a fonte de calor ser uma reação de fissão atômica, ou seja, em usinas nucleares

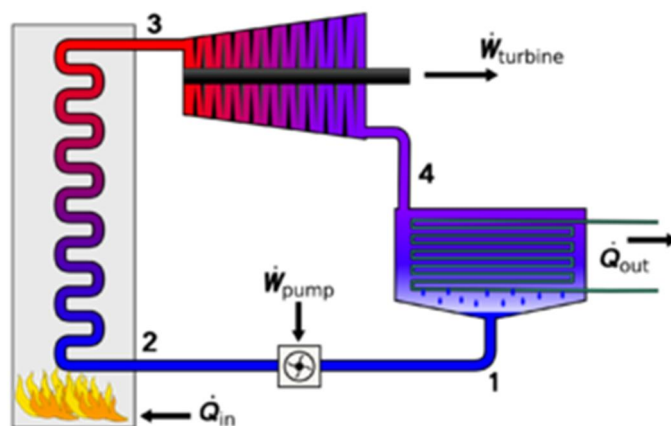


Figura 11 – Ilustração básica do ciclo Rankine

Fonte: YUNUS A.Ç.; MICHAEL A. B., 2013

A modificação básica em relação ao ciclo ideal de Carnot é o deslocamento do final da condensação (ponto 1) para a linha de equilíbrio água / vapor (representado na Figura 12).

Nesta condição, a bomba trabalha apenas com líquido, evitando os inconvenientes (ou impossibilidade prática) do trabalho com água e vapor. Entretanto a turbina continua trabalhando com a mistura de água e vapor, o que é sempre uma limitação prática.

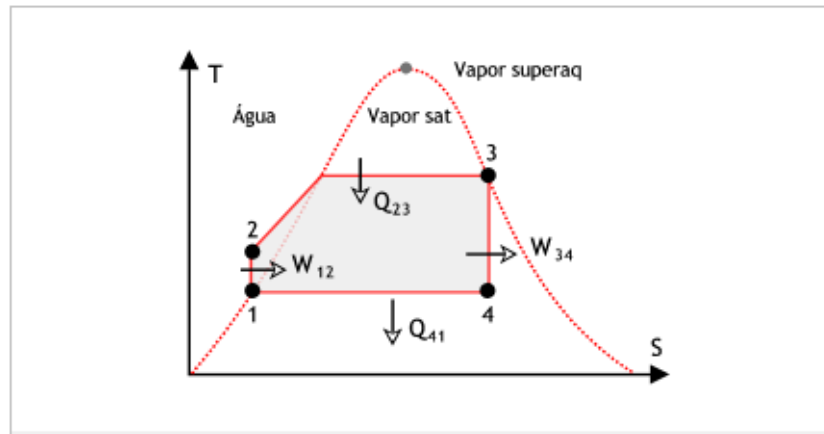


Figura 12 – Representação do Ciclo Rankine em função do gráfico T X S

Fonte: SOARES, M., 2015

2.1.6.1 Análise Energética para o Ciclo Rankine Ideal

O estado 3 é um estado definido no projeto do ciclo. Para um ciclo ideal sem superaquecimento, é o ponto de vapor saturado para a pressão de alta, e para o caso de um ciclo com superaquecimento, deve ser conhecida a capacidade de temperatura máxima do sistema. Então as propriedades de entalpia e entropia devem ser obtidas.

O estado 4 é obtido com a propriedade de entropia do ponto 3, visto o processo de expansão ser isentrópico. Com base na pressão de baixa e na entropia do ponto 3, uma interpolação deve ser realizada para a obtenção da entalpia, ou então a regra da alavanca deve ser utilizada para se determinar o título de saída da turbina:

$$\Phi = \Phi_{ls} + x(\Phi_{vs} - \Phi_{ls}) \quad (6)$$

O estado 1, via de regra, deve ser dimensionado para o estado de líquido saturado, de modo a evitar um sub-resfriamento desnecessário que ocasiona um maior consumo de combustível e uma menor temperatura de saída na caldeira.

O estado 2, é obtido matematicamente através do conceito de uma bomba operando de maneira reversível. Desta forma, de acordo com a primeira lei da termodinâmica,

$$w_b = m(h_3 - h_4) \quad (7)$$

E de acordo com a segunda lei da termodinâmica, considerando que o volume específico muda muito pouco no estado de líquido comprimido,

$$w = - \int_1^2 v dP = m[v_1(P_3 - P_2)] \quad (8)$$

Lembrando que, para as propriedades 2 e 4 obtidas através desta metodologia, deve ser levado o sub índice “s”, que denota um processo isoentrópico, ou seja, ideal.

2.1.6.2 Aumento na eficiência do ciclo Rankine

Existem algumas formas de elevar a eficiência de ciclos a vapor (Çengel e Boles, 2013):

- a) Reduzir a pressão no condensador – Figura 13;

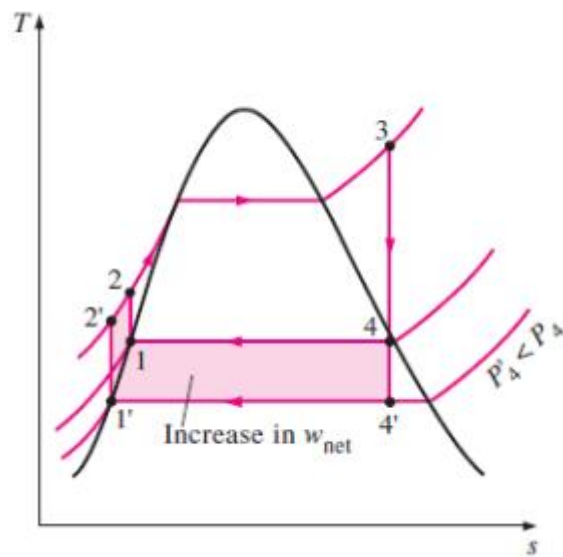


Figura 13 – Efeito da redução de pressão no condensador – potência

Fonte: Cengel e Boles, 2013

b) Elevar a pressão na caldeira – Figura 14;

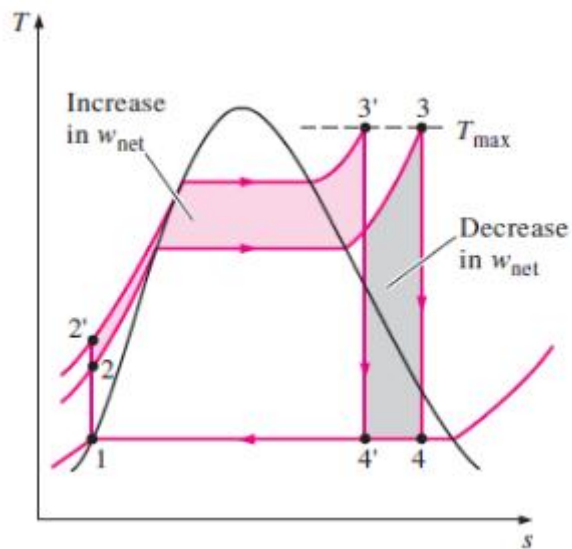


Figura 14 – Efeito do aumento da pressão na caldeira – potência

Fonte: Cengel e Boles, 2013

c) Superaquecimento – Figura 15

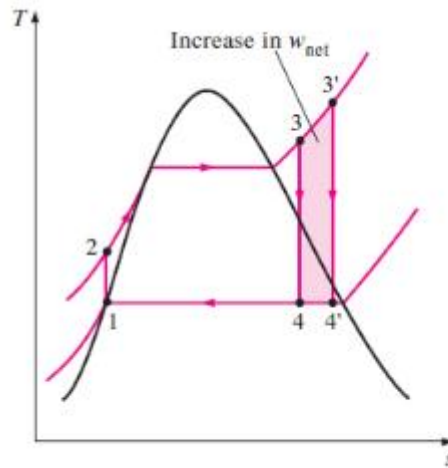


Figura 15 – Efeito do superaquecimento – potência

Fonte: Cengel e Boles, 2013

Para as propostas (a), (b) e (c) em se elevar a eficiência, a tratativa é a mesma: obtém-se as propriedades para cada ponto, realiza-se a correção das entalpias com eficiências isoentrópicas da bomba e da turbina e realiza-se o cálculo do sistema.

d) Reaquecimento em estágios – Figura 16;

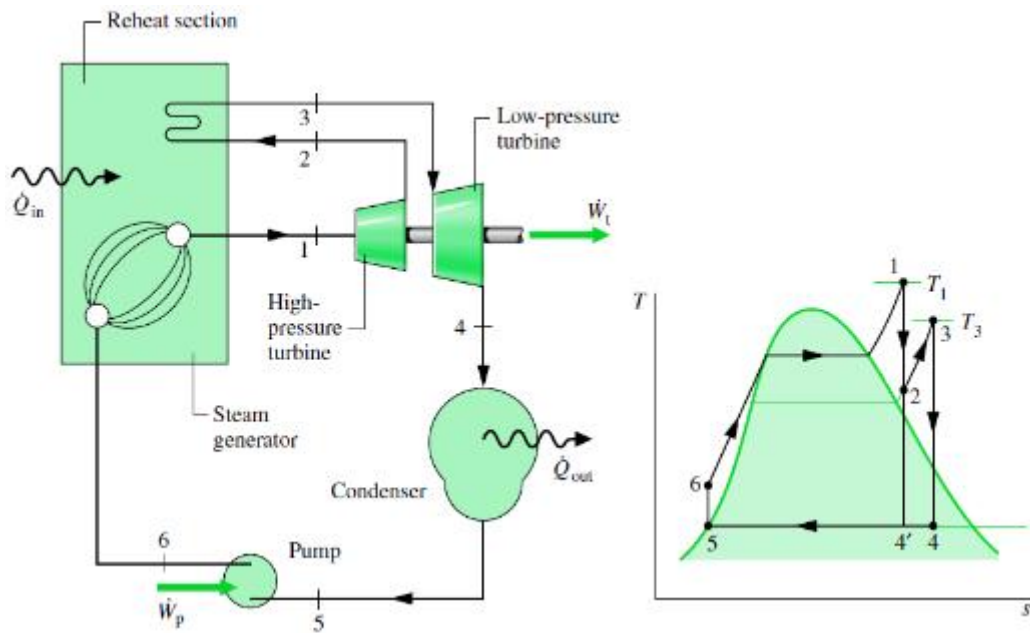


Figura 16 – Ciclo Rankine com Reaquecimento

Fonte: Moran e Shapiro, 2006

Na proposta (d) faz-se necessário conhecer a(s) pressão(ões) intermediária(s), e a temperatura de reaquecimento. Novos pontos surgem, mas a metodologia é a mesma.

O ciclo Rankine com reaquecimento opera utilizando duas turbinas em série. A primeira turbina recebe o vapor da caldeira à alta pressão, liberando-o de tal maneira a evitar sua condensação. Este vapor é então reaquecido, utilizando o calor da própria caldeira, e é utilizado para acionar uma segunda turbina de baixa pressão. Entre outras vantagens, isto impede a condensação vapor no interior das turbinas durante sua expansão, o que poderia danificar seriamente as pás da turbina

e) Extração com regeneração – Figura 17.

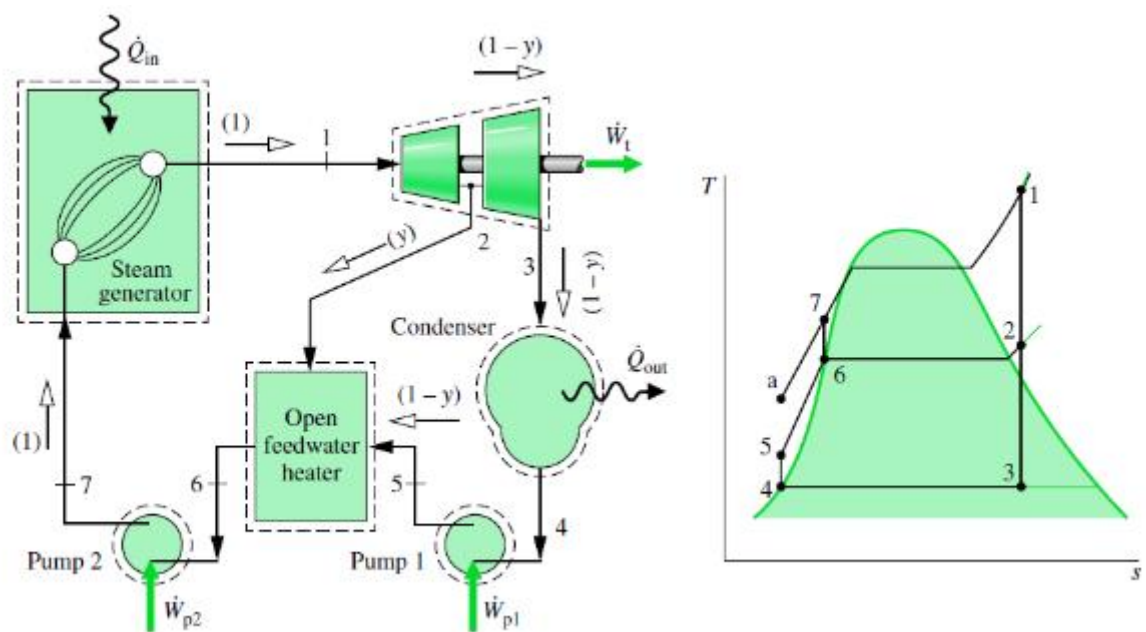


Figura 17 – Ciclo Rankine com Extração e Regeneração

Fonte: Moran e Shapiro, 2006

Nesta proposta, o fator mais importante é levantar as vazões em cada componente, visto haver uma extração no primeiro estágio da turbina.

2.1.7 Ciclo Brayton

Também denominado **Ciclo de Joule**, é o processo teórico dos motores de turbina a gás, ou simplesmente *turbinas a gás*. A Figura 18 indica o esquema básico

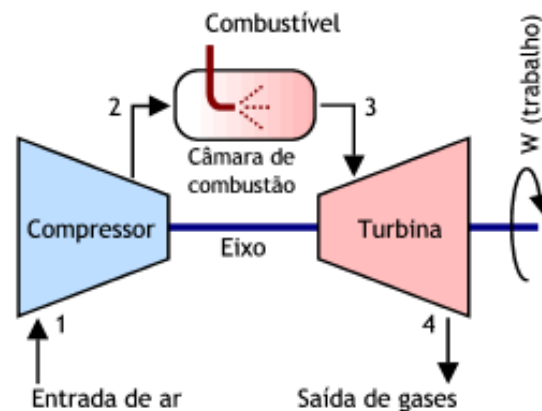


Figura 18 – Esquema do Ciclo Brayton

Fonte: SOARES M., 2015

A partir do esquema da Figura 18, dá-se que entre 1 e 2 o ar é comprimido de forma adiabática por um compressor tipo axial.

Ao passar pelo *queimador* ou *câmara de combustão* (de 2 a 3), o ar se expande devido ao fornecimento de calor pelo processo de combustão. Isso ocorre supostamente sob pressão constante porque a forma construtiva da câmara oferece pouca resistência ao fluxo.

O ar aquecido pela combustão movimenta uma turbina num processo teoricamente adiabático (de 3 a 4).

Saindo da turbina, o ar troca calor com o ambiente num processo claramente isobárico.

Compressor e turbina são montados no mesmo eixo, de forma que uma parte do trabalho fornecido é usado no próprio processo de compressão.



Figura 19 – Esquema construtivo de uma turbina

Fonte: SOARES, M., 2015

Turbinas a gás são usadas principalmente em aviões e na geração de energia elétrica, mas há também embarcações e mesmos veículos terrestres com este tipo de motor.

Portanto, o trabalho produzido pode ser extraído em forma de acionamento mecânico ou fluxo de ar no caso de uma turbina aeronáutica.

O diagrama da figura 18 não corresponde ao modo construtivo real. Normalmente há vários queimadores dispostos em círculo entre o compressor e a turbina. A Figura 19 dá um arranjo básico de uma turbina aeronáutica tipo jato puro, mas há várias outras configurações de acordo com a aplicação pretendida

2.2 Energia Nuclear e Aplicações

2.2.1 Funcionamento do reator

Reator nuclear é uma câmara de resfriamento hermética, blindada contra a radiação, onde é controlada uma reação nuclear para a obtenção de energia, produção de materiais fissionáveis como o plutônio para armamentos nucleares, propulsão de submarinos e satélites artificiais ou para pesquisas.

Um reator nuclear do tipo Angra 1 e Angra 2 é conhecido como PWR (Pressurized Water Reactor = Reator a Água Pressurizada), porque opera com água sob alta pressão.

O urânio, enriquecido a cerca de 3,2% em urânio-235, é colocado, em forma de pastilhas de 1cm de diâmetro, dentro de tubos (“varetas”) de 4cm de comprimento, feitos de uma liga especial de zircônio, denominada “zircalloy”.

As varetas, contendo o urânio, conhecidas como Vareta de Combustível, são montadas em feixes, numa estrutura denominada ELEMENTO COMBUSTÍVEL.

O urânio-235, por analogia, é chamado de combustível nuclear, porque pode substituir o óleo ou o carvão, para gerar calor.

As varetas são fechadas (conforme mostrado na Figura 20), com o objetivo de não deixar escapar o material nelas contido (o urânio e os elementos resultantes da fissão) e podem suportar altas temperaturas

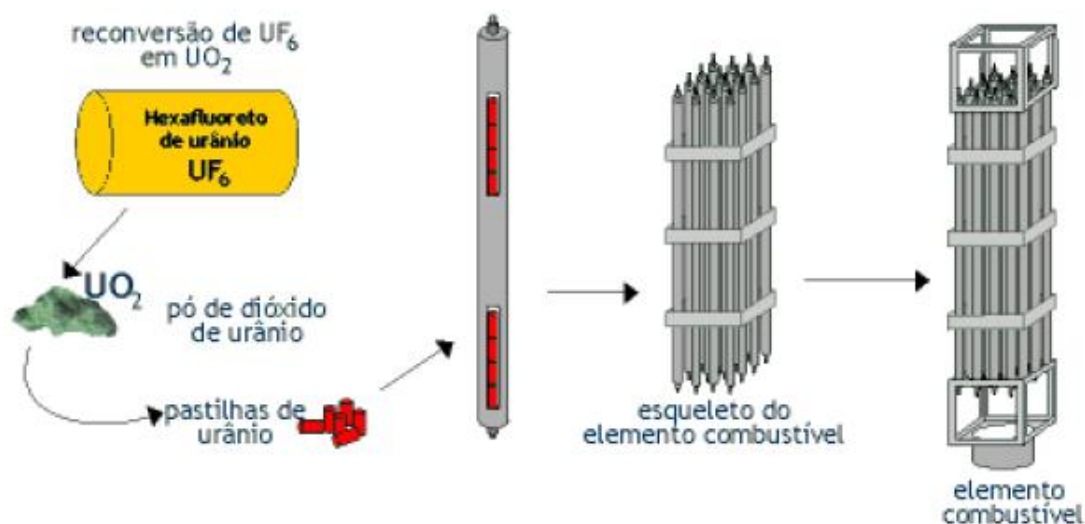


Figura 20 – Processo de criação do elemento combustível

Fonte: CNEN, 2003

A vareta de combustível é a primeira barreira que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente.

Os elementos combustíveis são colocados dentro de um grande vaso de aço, com “paredes”, no caso de Angra 1, de cerca de 33 cm e, no caso de Angra 2, de 23,5 cm.

Esse enorme recipiente, denominado Vaso de Pressão do Reator, mostrado na Figura 21, é montado sobre uma estrutura de concreto, com cerca de 5 m de espessura na base.

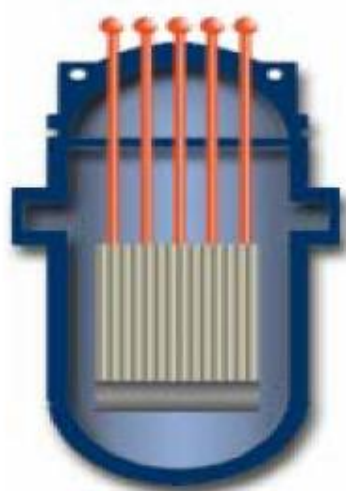


Figura 21 – Vaso de Pressão

Fonte: CNEN, 2003

O Vaso de Pressão do Reator é a segunda barreira física que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente.

O Vaso de Pressão do Reator e o Gerador de Vapor são instalados em uma grande “carcaça” de aço, com 3,8 cm de espessura em Angra 1.

Esse envoltório, construído para manter contido os gases ou vapores possíveis de serem liberados durante a operação do reator, é denominado Contenção.

No caso de Angra 1, a Contenção tem forma de um tubo (cilindro). Em Angra 2 é esférica. As duas configurações são apresentadas abaixo na Figura 22.

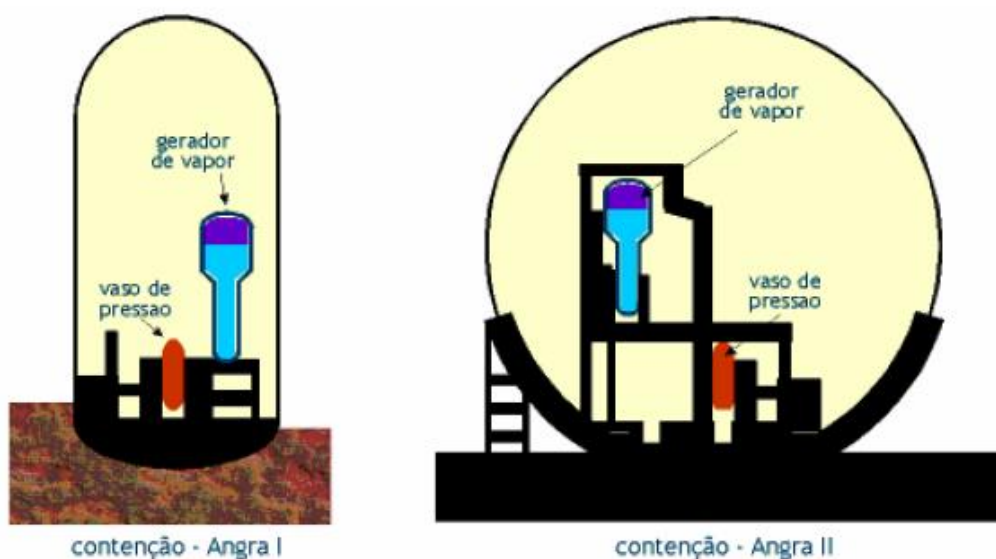


Figura 22 – Representação de um Vaso de Contenção típico

Fonte: CNEN, 2003

A Contenção é a terceira barreira que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente.

Um último envoltório, de concreto, revestindo a Contenção, é o próprio Edifício do Reator (Figura 23). Tem cerca de 1m de espessura em Angra 1.

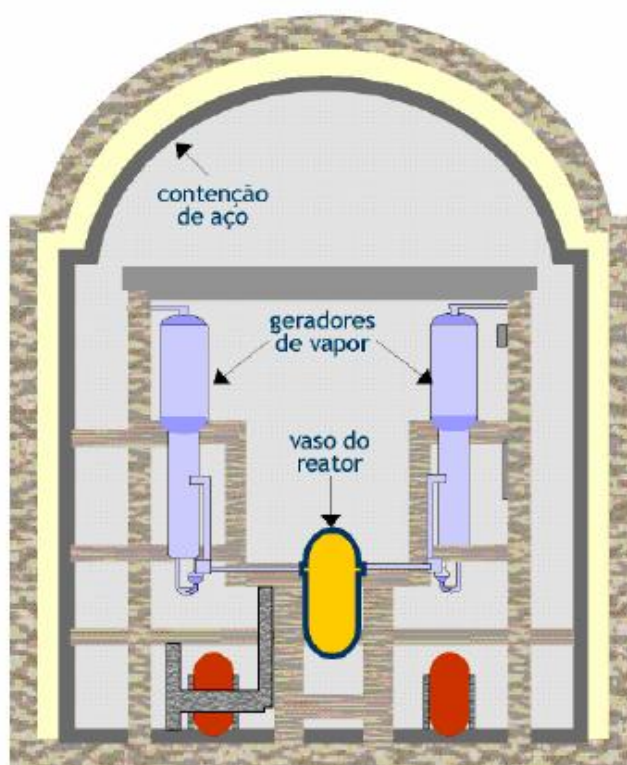


Figura 23 – Representação em um Edifício do Reator típico

Fonte: CNEN, 2013

O Edifício do Reator, construído em concreto e envolvendo a Contenção de aço, é a quarta barreira física que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente e, além disso, protege contra impactos externos (queda de aviões e explosões).

Circuito Primário

O Vaso de Pressão contém a água de refrigeração do núcleo do reator (os elementos combustíveis). Essa água aquecida circula pelo Gerador de Vapor, em circuito fechado, isto é, não sai desse sistema, chamado de Circuito Primário. Angra 1 tem dois geradores de Vapor; Angra 2 tem quatro.

A água que circula no Circuito Primário (em amarelo na Figura 24) é usada para aquecer uma outra corrente de água, que passa pelo Gerador de Vapor.

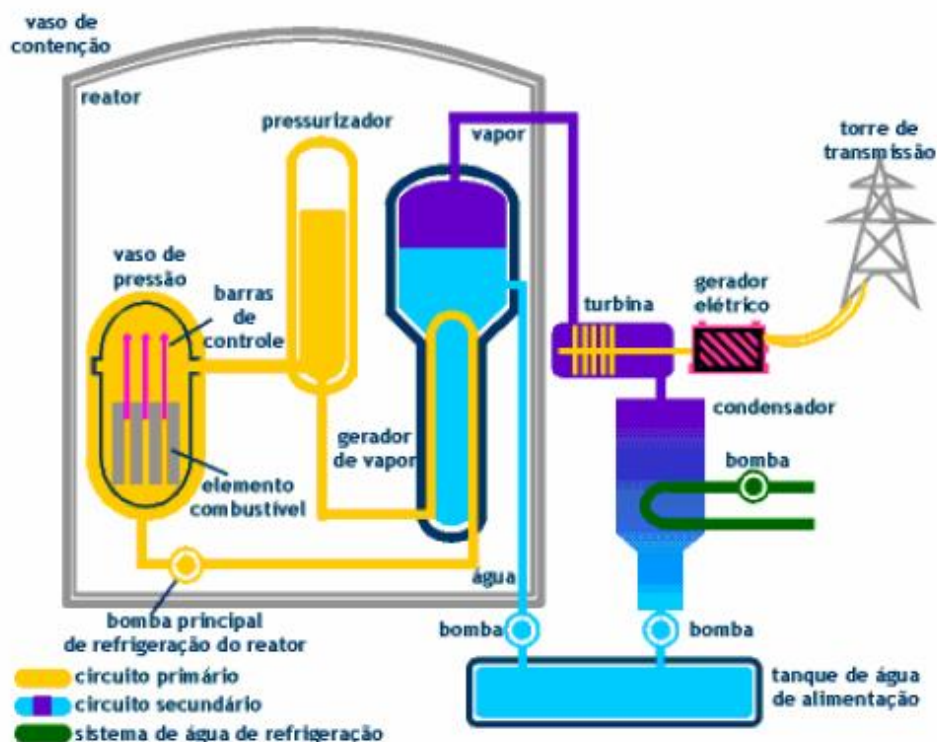


Figura 24 – Esquema de funcionamento de um reator nuclear

Fonte: CNEN, 2013

Circuito Secundário

A outra corrente de água, que passa pelo Gerador de Vapor para ser aquecida e transformada em vapor, passa também pela turbina, em forma de vapor, acionando-a. É, a seguir, condensada e bombeada de volta para o Gerador de Vapor, constituindo um outro Sistema de Refrigeração, independente do primeiro. O sistema de geração de vapor é chamado de Circuito Secundário.

A independência entre o Circuito Primário e o Circuito Secundário tem o objetivo de evitar que, danificando-se uma ou mais varetas, o material radioativo (urânio e produtos de fissão) passe para o Circuito Secundário. É interessante mencionar que a própria água do Circuito Primário é radioativa.

2.2.2 Aplicações

De acordo com a IAEA, atualmente, a energia nuclear fornece cerca de 15% do total de energia consumida em mais de 30 países e representa cerca de 6% da matriz energética mundial. As demais fatias consistem essencialmente de petróleo (33%), carvão (30%) e gás natural (24%), sendo que o setor industrial, de transporte, residencial e comercial são os segmentos com maior demanda de energia eléctrica e térmica no mundo.

A Tabela 2 dá um panorama atual sobre a energia nuclear no mundo.

País	Reatores em operação		Reatores em construção		Suprimento de energia nuclear em 2014	
	Nº de unidades	Capacidade Líquida (MWe)	Nº de unidades	Capacidade Líquida	(TWe)-h	Representação do Total
Argentina	3	1627	1	25	5,3	4,1
Armênia	1	375			2,3	30,7
Bielorrússia			2	2218	NA	NA
Bélgica	7	5927			32,1	47,5
Brasil	2	1884	1	1245	14,5	2,9
Bulgária	2	1926			15	31,8
Canadá	19	13500			98,6	16,8
China	23	19007	26	25756	123,8	2,4
República Checa	6	3904			28,6	35,8
Finlândia	4	2752	1	1600	22,6	34,7
France	58	63130	1	1630	418	76,9
Alemanha	9	12074			91,8	15,8
Hungria	4	1889			14,8	53,6
Índia	21	5308	6	3907	33,2	3,5
República do Irã	1	915			3,7	1,6
Japão	48	42338	2	2650	0	0
República da Coreia	23	20717	5	6370	149,2	30,4
México	2	1330			9,3	5,6
Holanda	1	482			3,9	4
Paquistão	3	690	2	630	4,6	4,3
Romênia	2	1300			10,8	18,5
Rússia	34	24654	9	7371	169,1	18,6
Eslováquia	4	1814	2	880	14,4	56,8
Eslovênia	1	688			6,1	37,3
África do Sul	2	1860			14,8	6,2

Espanha	7	7121			54,9	20,4
Suécia	10	9470			62,3	41,5
Suíça	5	3333			26,5	37,9
Emirados Árabes			3	4035	NA	NA
Reino Unido	16	9373			57,9	17,2
Ucrânia	15	13107	2	1900	83,1	49,4
Estados Unidos	99	98639	5	5633	798,6	19,5
TOTAL	432	371134	68	65850	2369,8	725,7

Tabela 2 - Visão geral dos reatores de energia e distribuição nuclear

Fonte: IAEA, 2014

Graças ao desenvolvimento tecnológico alcançado nos últimos anos, as usinas nucleares conseguiram adquirir potencial para poder fazer uma contribuição significativa para algumas atividades industriais e domiciliares, não apenas como geradores de eletricidade, mas também como fornecimento de vapor como fonte de calor. Essas atividades, que são conhecidos como aplicações não elétricas da energia nuclear, permitem diversificar amplamente os campos de aplicação de usinas nucleares.

Assim, uma usina de energia nuclear não é mais um módulo que gera eletricidade e se torna também um produtor de vapor para fornecer vários processos industriais de interesse. Nestes casos, as centrais nucleares trabalham em cogeração, ou seja, produz simultaneamente electricidade e energia térmica útil. Uma das principais vantagens de cogeração é a utilização de vapor baixa temperatura que não gera eletricidade. Isto resulta num aumento do FUE (Fator de Utilização de Energia) da planta.

Processos industriais que necessitam de vapor são diversos e cobrem um amplo espectro de temperatura. Por sua vez, dependendo das condições de vapor exigidos, diferentes tipos de reatores nucleares são capazes de se tornar fornecedores, entre outros: BWR (Boiling Water Reactor), PWR (Pressurized Water Reactor), LWGR (Light-Water Graphite Reactor), AGR (Advanced Gas Reactor) SCWR (Supercritical Water Reactor), sendo este último ainda em desenvolvimento.

Dentro dos processos em alta temperatura, acima de 200°C, encontram-se a produção de hidrogênio, a gaseificação do carvão, refino de petróleo e na reforma de gás natural, entre outros.

Num intervalo de temperaturas mais baixas (70-200°C), se localizam a dessalinização de água do mar, a indústria química e de papel, e aquecimento domiciliar.

A figura 25 mostra alguns dos processos industriais acima referidos, com a temperatura de vapor necessário e os tipos de usinas de energia nuclear, que são capazes de fornecê-lo.

Internacionalmente, a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) promove o uso da energia nuclear em aplicações não elétricas e mantém vários fóruns e conferências internacionais destinado a reforçar seu fortalecimento: Grupo de Trabalho Técnico em Dessalinização Nuclear, Coordenado Programa de Pesquisa em Métodos Avançados para Dessalinização Nuclear, aplicações nãoelétricas de Energia Nuclear: dessalinização da água do mar, Produção de Hidrogênio e outras aplicações industriais, Workshop de Avaliação de Aplicações Não Elétricas.

Nos últimos anos, várias agências e projetos internacionais têm mostrado interesse em expandir seus programas de desenvolvimento sobre questões relacionadas com aplicações não elétricas acopladas a reatores SMR (pequenos reatores modulares). Tal é o caso da OCDE / NEA (Organização para a Cooperação Econômica / Agência de Desenvolvimento de Energia Nuclear) EURATOM (Comunidade Europeia da Energia Atômica) e GIF (Generation IV International Forum).

O uso de aplicações de cogeração, como por exemplo, dessalinização, com a produção de energia nuclear têm gerado resultados satisfatórios em diversos países.

No Brasil, onde estão localizadas as Usinas de Angra I, II e onde está sendo construída Angra III, ainda não existem sistemas de cogeração empregados à dessalinização da água. Durante todo o desenvolvimento deste trabalho poderá se observar que esta seria uma forma de diversificar ainda mais a matriz energética e, ao mesmo tempo, auxiliar no combate à crise hídrica através da produção de água potável.

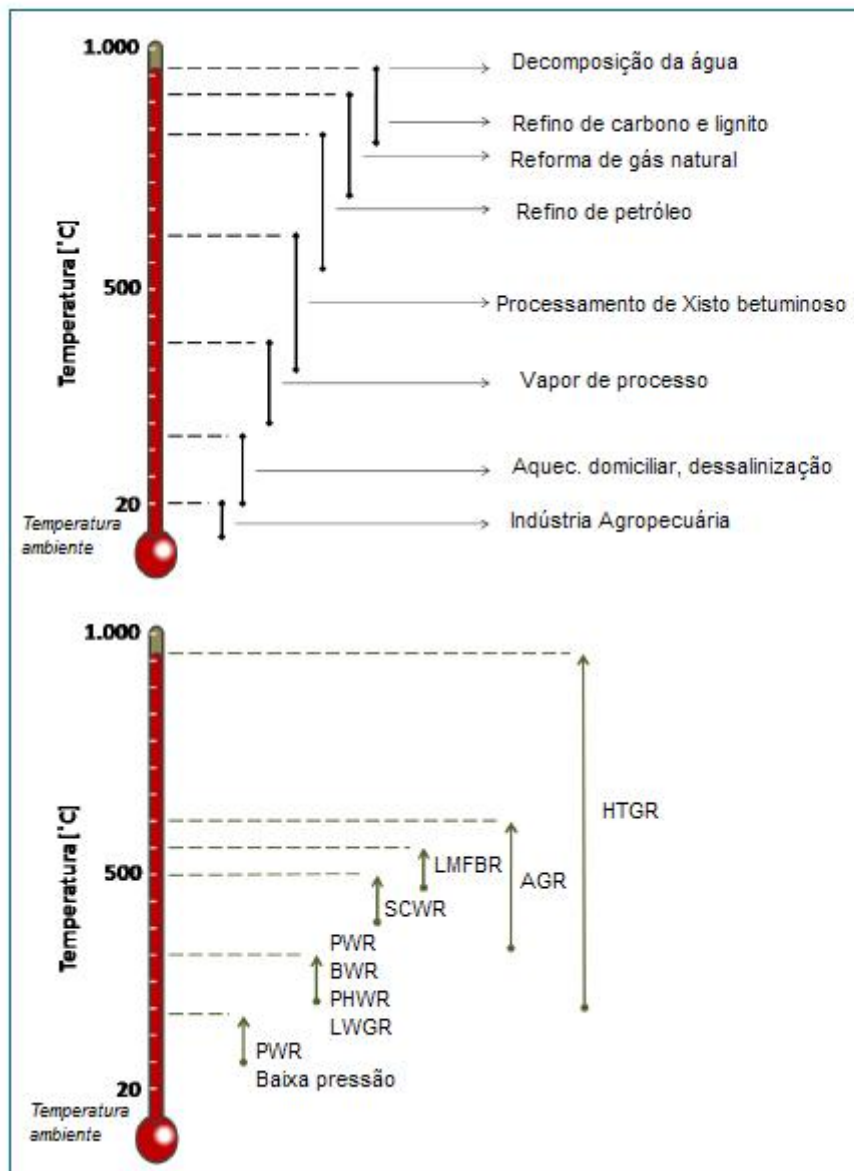


Figura 25 – Processos industriais e tipos de reatores empregados por temperatura

Fonte: CNEA, 2013

Na tabela 3 encontram-se alguns dos países envolvidos e as aplicações não elétricas que eles têm adotado.

País	Reator							Aplicação não elétrica
	Nome	Tipo	Potência Elétrica Total [Mwe]	Potência Térmica Total [MWt]	Ano de início da construção	Ano de conexão à rede	Ano de início da operação	
Bulgária	Kozloduy 5/6	PWR	1.906	6.000	1980/82	1987/91	1988/93	DH
República Checa	Temelini	PWR	930	3.000	1987	2002	2002	DH
Hungria	Paks-2/3/4	PWR	1.318	4.125	1974/79/79	1984/86/87	1984/86/87	DH
Índia	Rajasthan*1/2/3/4	PHWR	681	2.988	1965/68/90/2000	1972/80/2000	1973/81/2000	PH
	Madras 1/2	PHWR	404	1.602	1971/72	1983/85	1984/86	DS
Paquistão	Kanupp	PHWR	125	433	1966	1971	1972	DS
Romênia	Cernavod A1	PHWR	655	2.180	1982	1996	1996	DH
Russia	Balakovo 1/2/3/4	PWR	3.800	12.000	1980/81/82/84	1985/87/88/93	1985/88/89/93	DH, PH
	Kursk 1/2/3/4	LWGR	3.700	12.800	1972/73/78/81	1976/79/83/85	1977/79/84/86	DH, PH
Eslováquia	Bohunice – 3/4	PWR	816	2.750	1976	1984/85	1985	DH
Suiça	Goesgen	PWR	970	2.900	1973	1979	1979	DH
Ucrânia	Zaporozhe – 1/2/3/4/5/6	PWR	5.700	18.000	1980/81/82/83/85/86	1984/85/86/87/89/95	1985/86/87/88/89/96	DU
(*) DS: Dessalinização, DH: Aquecimento domiciliar, PH: Vapor para Processos Industriais								

Tabela 3 – Distribuição dos reatores em operação no mundo utilizados em aplicações não elétricas

Fonte: CNEA, 2013

Como se apresentou anteriormente, muitas das centrais nucleares, atualmente em uso ou em desenvolvimento, têm sido utilizadas para dessalinização da água do mar. O tipo de reator considerado para isto é o refrigerado por água, ou, reator de água leve em ebulição (BWR) e reator de água leve a pressão (PWR/PHWR). Os reatores refrigerados por metais líquidos e por gás também podem ser usados para tal fim, mas são propícios para aplicações não elétricas de maior temperatura.

Angra I, II e III (em construção) são do tipo PWR. Além de ser o mais usado reator para usinas atômicas no mundo, este tipo de reator também é o mais usado em navios e submarinos nucleares.

2.2.3 Barreiras à geração nuclear

Dentre os vários impeditivos à expansão da geração nuclear no mundo, o destaque com certeza é a questão da segurança.

Os acidentes em usinas nucleares são de grande perigo para as pessoas que residem próximas a elas. Nestes acidentes, é elevado o risco de contaminação das pessoas, solo, água e animais. Uma vez contaminadas por radiação, estas pessoas podem morrer ou desenvolver câncer de diversos tipos. A contaminação ao meio ambiente também é problemática, pois pode levar centenas de anos para que ocorra a total descontaminação do local do acidente e imediações afetadas.

O último grande acidente ocorrido em instalações nucleares, ainda recente na memória da grande população, foi o de Fukushima.

No dia 11 de Março de 2011, hora local, o nordeste do Japão foi atingido por um terremoto de 8,9 graus na escala Richter, com epicentro próximo da costa. A maior parte das construções e das instalações industriais com risco de explosões colapsaram imediatamente, com milhares de mortes. Quinze reatores na área foram diretamente afetados pelo terremoto, mas, em função da rede externa de energia ter colapsado, os reatores desligaram imediatamente e entraram em funcionamento os geradores de emergência que permitiram manter as usinas em condição segura.

Cerca de 1 hora após o terremoto, ocorreu um tsunami que alcançou ondas de 10 metros de altura e varreu a costa, penetrando vários quilômetros terra adentro resultando em mais de 10.000 mortos. Onze usinas nucleares ainda resistiram a este evento, mas as 4 usinas de Fukushima tiveram todos os seus grupos geradores atingidos pela água, conseqüentemente pararam de funcionar e a refrigeração do núcleo foi comprometida.

Os resultados foram contínuos vazamentos de água contaminada e alguns no mar. Apesar de nenhuma morte por exposição à radiação ter sido relatada, cerca de 300 mil pessoas foram evacuadas da área, no que se tornou o maior desastre nuclear desde o acidente nuclear de Chernobil. Após o acidente diversos países passaram a tomar duras medidas de contenção ou até término das atividades nucleares em seus territórios.

A Alemanha, por exemplo, está desativando gradualmente suas usinas como parte de um plano que pretende um blecaute nuclear total até 2022. Por outro lado, o país tem a tarifa residencial mais cara da Europa, além de ser um país com uma das maiores emissões de CO₂ da comunidade européia, conforme pode ser visto na Figura 26. O programa alemão de substituição das nucleares pelas renováveis tem imposto pesado ônus sobre os consumidores alemães. Para pagar a conta, o subsídio veio sob a forma de aumentos na tarifa. A nível residencial o aumento foi de 47%, somente no ano de 2013. Isto significa que cada alemão está pagando mais 230 euros por ano pela mesma energia que consumia, o que ocasionou o aumento na inadimplência nas contas de energia elétrica da classe pobre alemã.

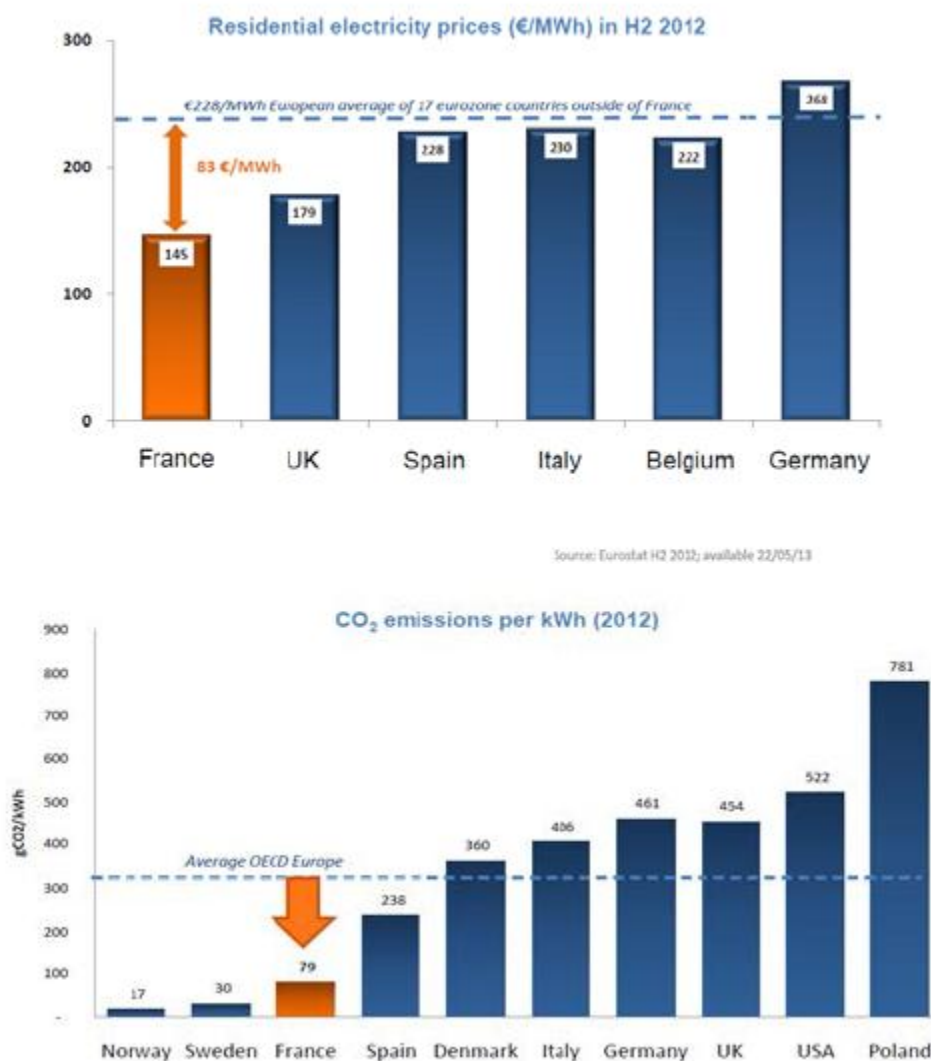


Figura 26 – Custos da eletricidade e emissões de CO₂ na Alemanha

Fonte: IEA, 2012

Outras barreiras que pode ser citadas como impeditivas a expansão do número de instalações nucleares também são a geração de grande quantidade de lixo nuclear, o custo elevado da implantação da usina e a alteração dos ecossistemas litorâneos da região em função do despejo da água aquecida proveniente da refrigeração do reator.

2.3 Cogeração

2.3.1 Conceito de Cogeração

A cogeração é definida como um processo de produção combinada de calor e eletricidade, proporcionando o aproveitamento de mais de 70% da energia térmica proveniente dos combustíveis utilizados nesse processo.

Por mais eficiente que seja uma máquina térmica, a maior parte da energia contida no combustível usado para o seu acionamento é transformada em calor e perdida para o meio-ambiente.

A 2ª Lei da Termodinâmica já prevê que não é possível a construção de uma máquina que, operando em um ciclo termodinâmico, converta toda a quantidade de calor recebido em trabalho. O certo é que, no máximo 40% da energia do combustível do diesel usado em um gerador podem ser transformados em energia elétrica.

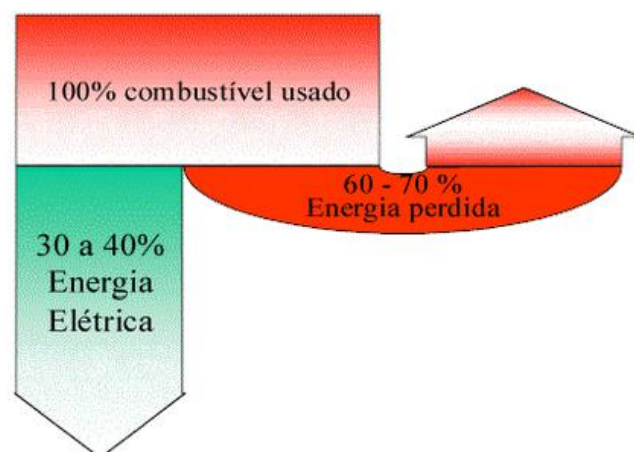


Figura 27 – Esquema tradicional de transformação de energia em calor

Fonte: INEE, 2014

Como muitas indústrias e prédios comerciais necessitam de calor (vapor ou água quente), foi desenvolvida uma tecnologia denominada cogeração, em que o calor produzido na geração elétrica é usado no processo produtivo sob a forma de vapor.

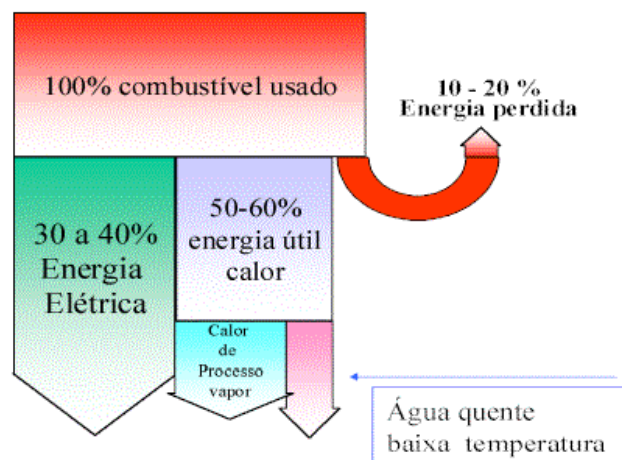


Figura 28 – Esquema transformação de energia em calor com cogeração

Fonte: INEE, 2014

2.3.2 Rendimento da Cogeração

O rendimento da cogeração é o fator importante a ser observado, é um percentual que indicará o quanto está sendo utilizado de energia útil no processo. Dá-se as equações abaixo:

$$\eta_e = \frac{E}{C} \quad (\text{Rendimento Elétrico}) \quad \text{Eq.(9)}$$

$$\eta_T = \frac{Qu}{C} \quad (\text{Rendimento Térmico}) \quad \text{Eq.(10)}$$

$$\eta_G = \frac{E+Qu}{C} \quad (\text{Rendimento Global}) \quad \text{Eq.(11)}$$

Sendo:

η = Rendimento

E = Energia elétrica produzida

Qu = Calor útil produzido

C = Combustível consumido

Na figura 27 é demonstrado que, em um sistema convencional dos 100% da energia da fonte primária, apenas entre 30% e 40% é recuperado para geração de energia elétrica. Já a Figura 28 representa um sistema de cogeração, onde que para os 100% da energia da fonte primária apenas entre 10% e 20% são desperdiçados, entre 30% e 40% são convertidos em geração de energia elétrica e entre 50% e 60% para produção de energia térmica.

2.3.3 Fator de Utilização de Energia

O fator de utilização de energia, FUE (do inglês – “energy utilization factor”). Tem como objetivo demonstrar a porcentagem de utilização entre a energia do combustível da fonte primária com o trabalho a ser produzido tanto elétrico como térmico. A Eq.(12) abaixo demonstra o que está sendo proposto:

$$FUE = \frac{W+Qu}{m \cdot PCI} \quad (12)$$

Sendo:

W = Potência no eixo produzido pela máquina (kW)

Qu = Taxa de calor útil produzido ou recuperado (kW)

PCI = Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg)

m = Vazão mássica de combustível (kg/s)

A idéia principal é que os sistemas de cogeração se aproximem dos 100%. No entanto quanto maior for o aproveitamento térmico maior será o valor do FUE, podendo chegar até 85%.

A Figura 29 mostra um resumo geral que demonstra os valores rendimento (η_e) e FUE para cada tipo de tecnologia:

Gerador	η_e	Cogeração (FUE)
MCI	25 a 45%	~ 85%
TV	30 a 45%	~ 50%
TG	35 a 45%	~ 75%
μ TG	25 a 33%	~ 85%
Ciclo Combinado	Até 57%	~ 75%

Figura 29 – Resumo geral FUE

Fonte: SIMÕES-MOREIRA, JR.; ANDREOS, R, 2015

Sendo:

MCI = Motor à combustão interna

TV = Turbina a vapor

TG = Turbina a gás

μ TG = Micro turbina a gás

2.3.4 Qualificação da Cogeração

A ANEEL criou a resolução normativa nº 235, de 14 de novembro de 2006, que estabelece os requisitos para a qualificação de centrais termelétricas cogeneradores de energia e dá outras providências. Descrito por SIMÕES-MOREIRA, JR.; ANDREOS, R, (2014).

“ [...] O dispositivo desta resolução visa estabelecer os requisitos para o reconhecimento da qualificação de centrais termelétricas cogradoras, com vistas à participação nas políticas de incentivo ao uso racional dos recursos energéticos. Esta resolução é válida para pessoa física e jurídica.

Requisitos para a qualificação

A central termelétrica cogradora, para fins de enquadramento na modalidade de “cogeração qualificada”, deverá atender os seguintes requisitos:

1. Estar regularizada perante ANEEL, conforme o disposto na legislação específica e na Resolução no 112, de 18 de maio de 1999.
2. Preencher os requisitos mínimos de racionalidade energética, mediante o cumprimento das inequações (a) e (b) respectivamente:

a) $\frac{E_t}{E_f} \geq 15\%$

b) $\left(\frac{E_t}{E_f}\right) \div X + \frac{E_e}{E_f} \geq F_c \%$

Onde:

E_f – Energia da Fonte: energia recebida pela central termelétrica geradora, no seu regime operativo médio, em kWh/h, com base no conteúdo energético específico, que no caso dos combustíveis é o Poder Calorífico Inferior (PCI);

E_e – Energia da utilidade eletromecânica: energia cedida pela central termelétrica cogradora, no seu regime operativo médio, em kWh, em termos líquidos, ou seja, descontado da energia bruta gerada o consumo em serviços auxiliares elétricos da central;

E_t – Energia da utilidade calor: energia cedida pela central termelétrica cogradora, no seu regime operativo médio, em kWh, em termos líquidos, ou seja, descontado das energias brutas entregues ao processo as energias de baixo potencial térmico que retornam à central;

F_c% - Fator de cogeração: parâmetro adimensional definido em função da potência instalada e da fonte da central termelétrica cogradora, o qual aproxima do conceito de Eficiência Exergética;

X – Fator de ponderação: parâmetro adimensional definido em função da potência instalada e da fonte da central termelétrica cogeneradora, obtido da relação entre a eficiência de referência da utilidade calor e da eletromecânica, em processos de conversão para obtenção em separado destas utilidades.”

Fonte/Potência elétrica instalada	X	FC%
Derivados de Petróleo, Gás Natural e Carvão:		
Até 5 MW	2,14	41
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,13	44
Acima de 20 MW	2,00	50
Demais combustíveis:		
Até 5MW	2,50	32
Acima de 5MW e até 20 MW	2,14	37
Acima de 20 MW	1,88	42
Calor recuperado de processo:		
Até 5MW	2,60	25
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,17	30
Acima de 20 MW	1,86	35

Tabela 4 – Fonte/Potência elétrica instalada

Fonte: ANEEL, 2015

2.3.5 Equipamentos Empregados

Os principais equipamentos do sistema de cogeração das centrais nucleares são: turbina a vapor, o gerador elétrico e o próprio reator nuclear que servirá como gerador de vapor. A seguir será abordado de maneira sucinta os princípios de funcionamento assim como as tecnologias empregadas.

2.3.4.1 Turbina a vapor

A turbina a vapor é uma máquina térmica que transforma a energia cinética do vapor em energia mecânica na ponta do seu eixo. Esse equipamento acoplado a um gerador síncrono é capaz de produzir energia elétrica. Nesse contexto a turbina torna-se um dos principais equipamentos do sistema de cogeração.

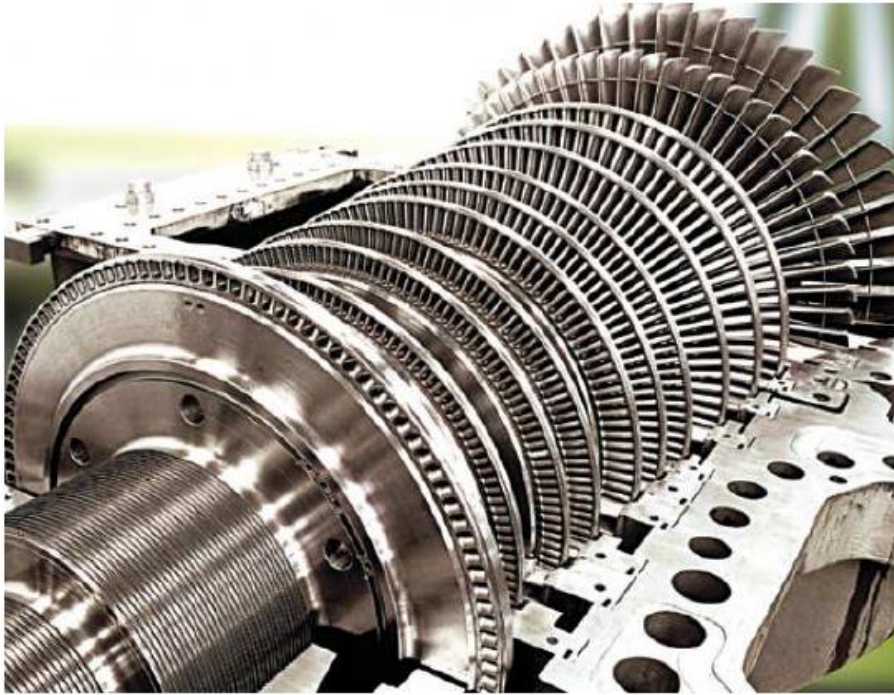


Figura 30 – Turbina a vapor
Fonte: TGM, 2015

SANTOS (2012, p.44) descreve “[...] Uma grande vantagem das turbinas a vapor é a possibilidade da utilização de energia térmica do vapor em processos industriais através de extrações reguláveis na sua seção de fluxo após o aproveitamento de parte deste potencial térmico do vapor para a geração de energia mecânica no eixo. [...]”. Em outras palavras, pode-se utilizar a turbina a vapor como gerador de energia mecânica e térmica ao mesmo tempo. Essa afirmação irá depender da configuração do sistema de cogeração da planta.

Como observado na figura 30, a turbina é composta por palhetas móveis fixadas ao eixo, sendo esse fixo ao estator. A concepção mecânica é similar ao de um gerador

elétrico, sendo a máquina composta por uma parte fixa designada, estator, e uma parte móvel “rotor” neste caso atribui-se essa função as palhetas fixadas ao eixo.

A quantidade de palhetas móveis determina se a turbina é de simples estágios, melhor dizendo, apenas um único conjunto de palhetas, ou se é de multiestágios composta por vários conjuntos de palhetas. A figura 31 demonstra um corte para melhor entendimento de uma turbina multiestágios e seus principais elementos.

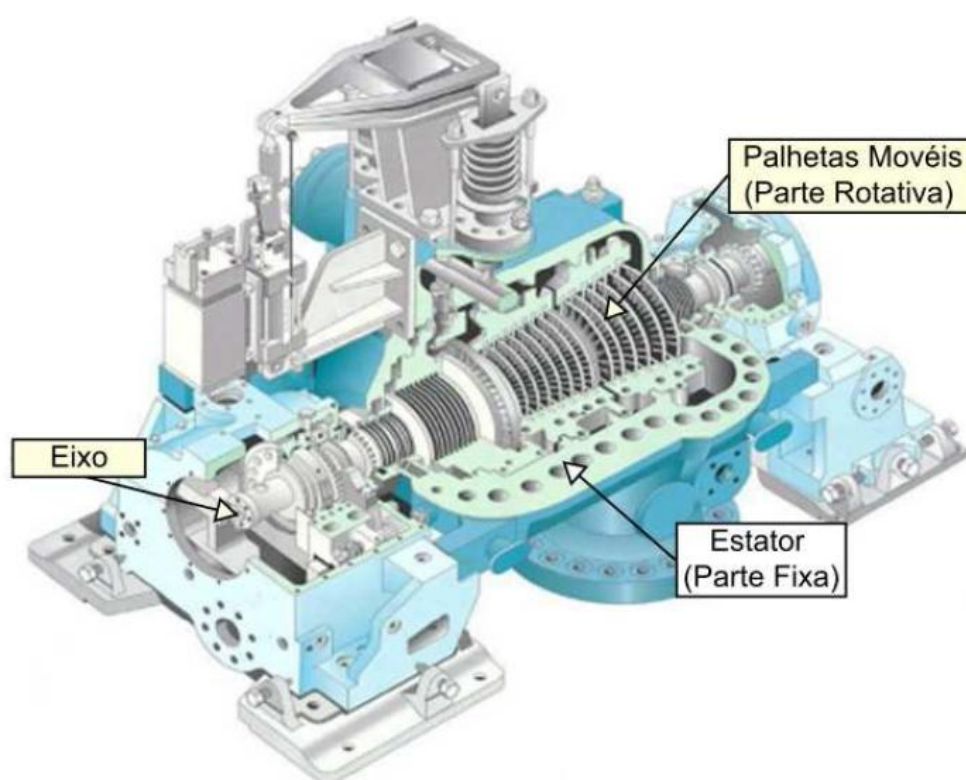


Figura 31 – Corte de uma turbina a vapor multiestágios

Fonte: SANTOS, FERNANDO ALVES DOS, 2012

O nível de pressão na saída da turbina a vapor é importante devido a aplicação que o vapor que dela sai pode oferecer. Em decorrência disto, pode haver dois tipos de turbina a vapor: as de contrapressão e as de condensação.

Nas turbinas de contrapressão, a vazão de vapor que entra na turbina é a mesma entregue aos processos e equipamentos após a saída do vapor, sendo que o vapor resultante encontra-se em pressões acima da atmosférica.

Nas turbinas de condensação, o vapor rejeitado encontra-se em pressões inferiores à atmosférica. A vantagem disto encontra-se na diferença de entalpia entre os dois estados termodinâmicos, fazendo com que haja uma maior potência de eixo produzida e consequente maior produção elétrica.

Tanto as turbinas a vapor de contrapressão quanto às turbinas de condensação podem conter extrações, ou seja, retiradas de vapor em determinado ponto da turbina, num nível de pressão de interesse do processo, podendo vir a serem chamadas de turbinas de contrapressão e extração e turbinas de condensação e extração, respectivamente. A Figura 17 ilustra os tipos de turbinas de contrapressão e turbinas de condensação.

De acordo com o exposto, ao se projetar uma instalação que contenha um ciclo térmico, mediante condições elétricas conhecidas, deve-se selecionar a turbina requerida. Para isto deve-se considerar uma variável importante, a qual é chamada de *steam rate* (*SR*), ou consumo específico de vapor, dado em kg/kWh, definida como a vazão mássica de vapor (*m*, em hg/s) requerida por unidade de potência gerada (*W*, em kW) em uma turbina, conforme a Eq.(9).

$$SR = \frac{3600 \sum m_i}{We} \quad (13)$$

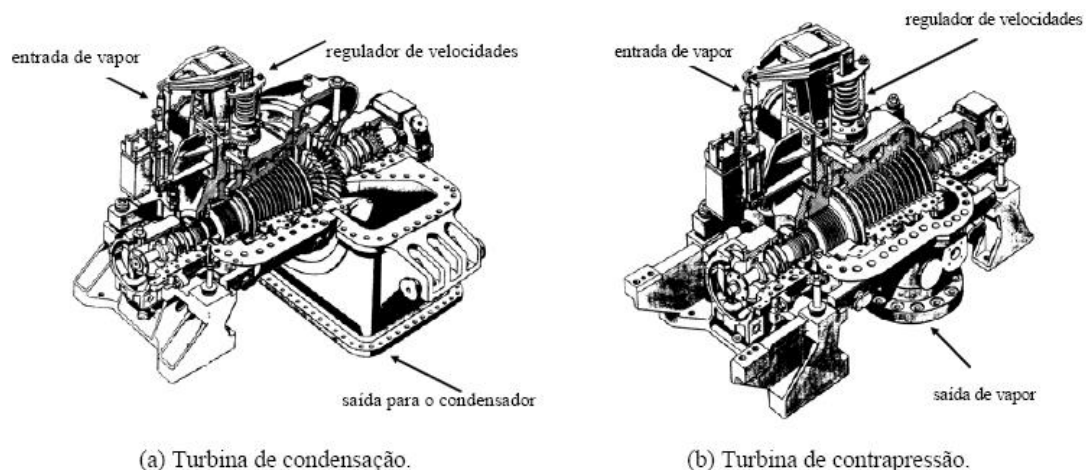


Figura 32 – Tipos de turbina a vapor

Fonte: FERREIRA, EDUARDO M., 2008

2.3.4.2 Gerador Elétrico

O gerador elétrico ou máquina elétrica rotativa é responsável pela transformação da energia mecânica disponibilizada pela turbina em energia elétrica. Em usinas nucleares utilizam-se máquinas síncronas, que possuem o seguinte princípio de funcionamento; através de uma corrente contínua injetada no campo localizado no rotor é produzido um campo magnético. O rotor é acionado pela turbina, produzindo um campo magnético girante no interior da máquina. Enfim o campo girante induzirá um conjunto de tensões trifásicas no enrolamento do estator. A Figura 33 ilustra os principais elementos do gerador síncrono.

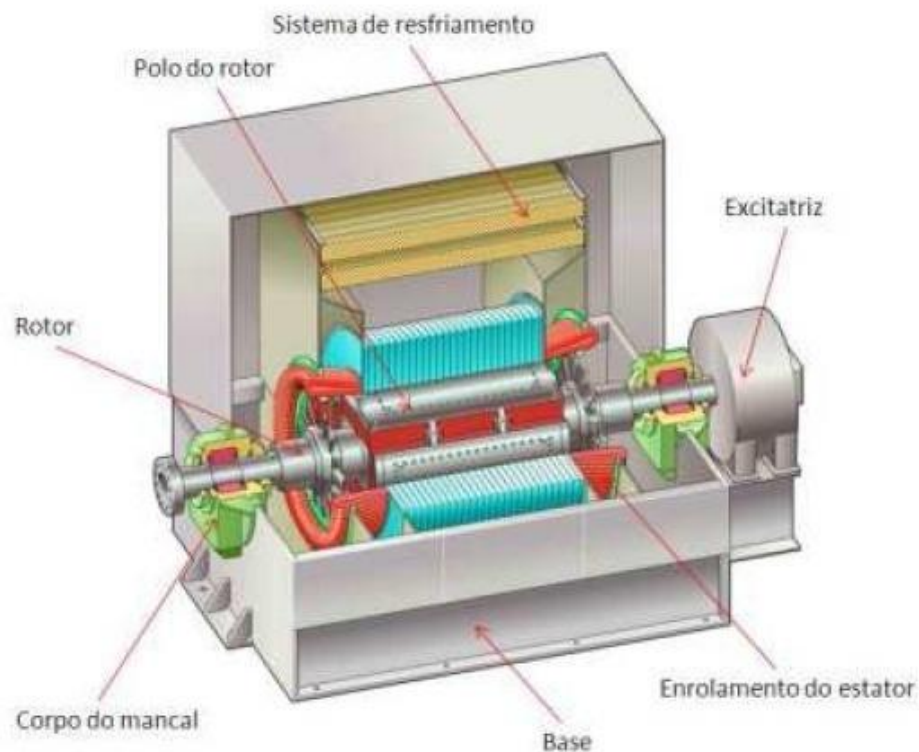


Figura 33 – Esquema simplificado do gerador

Fonte: SANTOS, FERNANDO ALVES DOS, 2012

Os principais componentes do gerador são:

- **Estator ou armadura:** Parte fixa presa à carcaça do gerador que aloja os enrolamentos que são submetidos à indução e produzem a força eletromotriz. Este é o induzido da máquina;
- **Rotor:** Parte girante que aloja as bobinas de campo. Estas bobinas são responsáveis pela indução eletromagnética nas bobinas de armadura. Este é o indutor da máquina;
- **Mancais:** Peças que promovem a sustentação do rotor. Estas são continuamente lubrificadas por óleo durante a operação a fim de facilitar o movimento de rotação do eixo e refrigerar o ponto de contato entre os componentes;
- **Excitatriz:** Fonte de corrente contínua responsável pela alimentação das bobinas do indutor a fim de controlar o nível de tensão do gerador;
- **Sistema de refrigeração:** Podem ser do tipo ar-ar ou ar-água. Responsável por manter a temperatura do gerador sob determinados limites operacionais.

Os geradores empregados em termelétricas em centrais nucleares são de eixo horizontal de pequeno diâmetro e longo comprimento. E são do tipo síncrono trifásico, isto é, cuja rotação de operação está diretamente relacionada ao número de pólos magnéticos e a frequência, como mostra a Eq.(14)

$$\eta = \frac{f}{p} \quad (14)$$

Sendo:

η = Rotação do eixo [rps]

f = Frequência [Hz]

p = Par de polos magnéticos

2.4 Dessalinização da Água

A dessalinação da água compreende uma série de processos físico-químicos que tendem a reduzir, e em alguns casos eliminar, a salinidade natural da água (íons em solução). A qualidade da água a obter é função do uso que se dará a mesma. Por exemplo, existem numerosos processos químicos na indústria que se abastecem de água de muita alta pureza, isto é, com muita baixa concentração de íons na solução (tipicamente a água destilada). Isto se deve a necessidade de evitar a deterioração dos materiais que constituem a planta e aumentar sua vida útil.

Muito diferente é o caso da qualidade da água para consumo humano que contém uma certa concentração de íons. Segundo padrões permitidos, a salinidade máxima da água potável é aproximadamente 400ppm. Para fazer uma comparação rápida, a água marinha tem uma salinidade de cerca de 36.000 ppm.

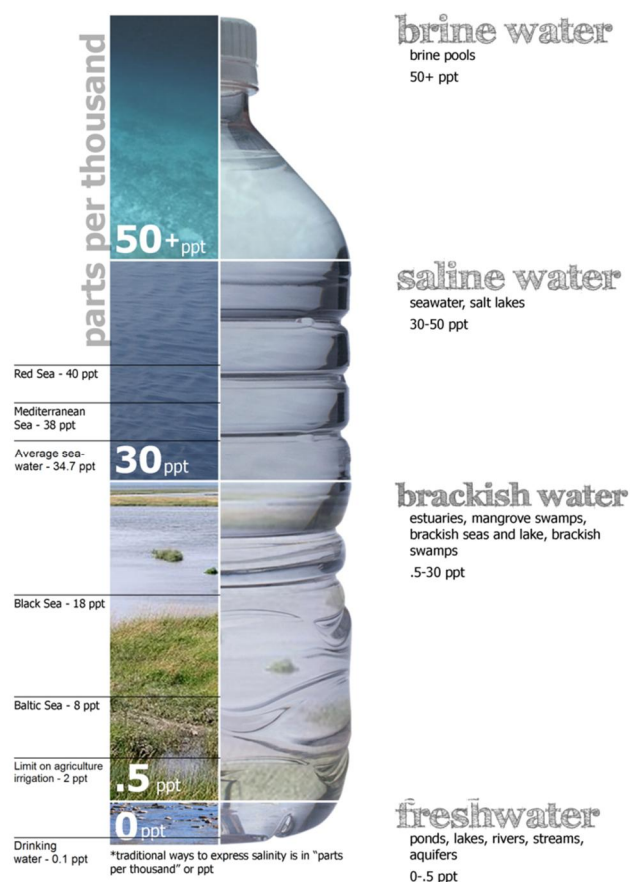


Figura 34 – Diagrama de salinidade da água

Fonte: Wikimedia, 2015

Como se observa, as características da água requerida para processos industriais se diferem da exigida para consumo humano e é por isso que as tecnologias vigentes para o tratamento da água em ambos os casos são distintas.

Uma alternativa para a produção de água destinada a consumo industrial ou água potável é o tratamento da água do mar mediante um processo de dessalinização. As tecnologias utilizáveis para levar a cabo este processo são separadas em dois grandes grupos: a destilação e a osmose reversa.

2.4.1 Tecnologias Empregadas

Existem tipicamente dois métodos de destilação: a destilação de múltiplo efeito (MED – *Multi Effect Destilation*) e a evaporação multi-flash (MSF – *Multi Stage Flash*). Ambos processos utilizam energia em forma de calor para evaporar água e por esta razão são classificados como térmicos.

O processo de destilação se baseia na evaporação parcial da água permanecendo os íons dissolvidos no líquido não evaporado. O vapor gerado na destilação é condensado obtendo-se água de baixa salinidade. A descarga destes processos é salmoura residual e produzem água industrial de alta qualidade. Estes processos só fazem uso de vapor, de baixa temperatura tal como se apresentou na Figura 25.

O objetivo destes processos é a máxima recuperação de energia, a qual se mede com o índice GOR (*Gain Output Ratio*) que representa a relação entre a quantidade de água produzida e o vapor empregado. Os processos de destilação requerem grandes quantidades de calor e a tecnologia aplicada a eles busca otimizar seu aproveitamento.

2.4.1.1 Destilação Multi-Flash (MSF)

O método MSF consiste na ebulição da água salobra através de uma série de etapas sucessivas de evaporação, nas quais a pressão e a temperatura vão diminuindo progressivamente, obtendo-se água dessalinizada em cada passo. Se considera uma metodologia confiável capaz de lograr altas produções por unidade operativa.

2.4.1.2 MSF – Once Trough

Nesta configuração, a água a dessalinizar é pré-aquecida na Zona de Recuperação de Calor pelo vapor produzido em cada câmara e chega a Zona de Entrada de Calor onde é proporcionada a energia principal para sua ebulição por troca de calor com o

vapor de serviço. Ao atravessar ambas as seções, a água alcança uma temperatura de 90° - 100°C (ver Figura 35).

Atravessadas estas duas seções, ingressa na câmara de evaporação (primeira etapa), a qual se encontra operando a uma pressão menor que a pressão de saturação correspondente a temperatura de ingresso. Se produz uma ebulição espontânea o “flashing” na qual uma parte da água se converte em vapor. O vapor que se gera em cada etapa atravessa os separadores de gotas para levar a cabo a remoção de possíveis gotas de salmoura arrastadas pelo mesmo vapor.

Finalmente, este vapor se condensa nos trocadores de calor localizados na parte superior de cada câmara, obtendo-se água destilada como produto.

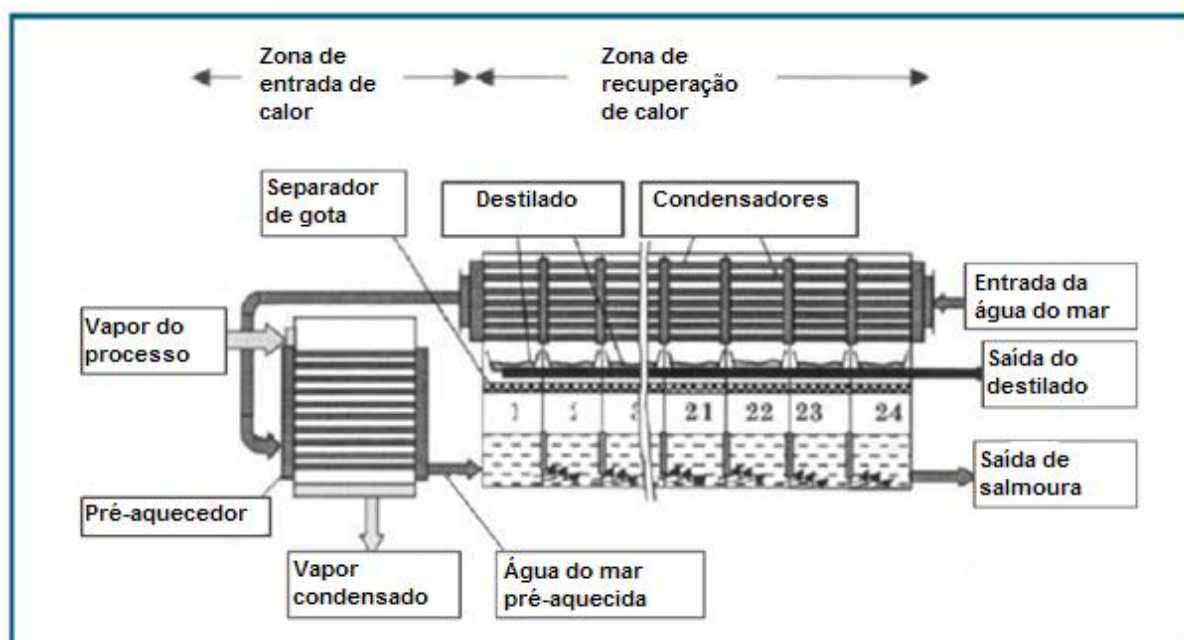


Figura 35 – Destilação Multi-Flash

Fonte: CNEA, 2013

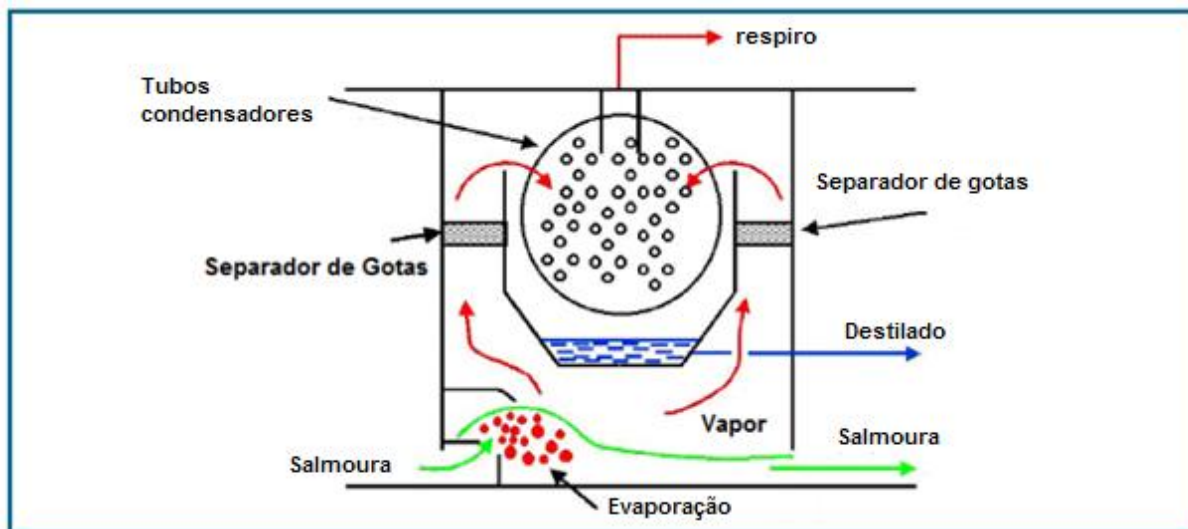


Figura 36 – Câmara típica de evaporação de uma planta MSF

Fonte: CNEA, 2013

Pelo interior dos tubos destes trocadores, circula a corrente de alimentação (água a dessalinizar) desde a etapa N até a etapa 1, quer dizer, em contracorrente com o produto da destilação e vai aumentando sua temperatura durante o trajeto.

Finalmente, a salmoura passa para a seguinte etapa mais concentrada de onde se repete novamente o processo de evaporação-condensação. Este processo se repete em etapas subsequentes as quais operam a temperaturas e pressões progressivamente decrescentes, expondo-se a solução a sucessivas evaporações.

As plantas MSF, têm sido construídas para uso comercial desde 1950 porque são consideradas uma tecnologia comprovada e madura com capacidade de dessalinização que vão desde os 4.000 até 60.000 m³/dia de produção de água.

Como se mencionou anteriormente, a eficiência de uma planta dessalinizadora se avalia com o índice GOR. Um aumento neste índice implica maiores superfícies de troca e, em consequência, maior número de câmaras de evaporação. Isto se traduz em um incremento dos custos econômicos. Para plantas tipo MSF, o máximo encontrado é 12:1-14:1, com uma faixa de operação usual de 8:1-10:1.

A qualidade da água que se produz é 5-25 ppm STD (Solidos Totais Dissolvidos) de uma concentração inicial de 35.000-45.000 ppm STD.

As plantas MSF representam um consumo elétrico de aproximadamente 3 a 5 kWh/m³ de água por sistemas de bombas e ejetores de vácuo. Este parâmetro depende do fluxo de destilado e, em consequência, do GOR requerido. Por sua vez, o consumo calórico se encontra na faixa dos 45-120kWh/m³.

As plantas MSF necessitam de pré-tratamentos químicos na água de alimentação a fim de evitar a formação de incrustações nos evaporadores e o avanço dos processos de corrosão sobre superfícies metálicas. A presença de íons de sulfato, bicarbonatos, cálcio e magnésio, entre outros, dá origem a deposição de compostos alcalinos como CaCO₃ e Mg(OH)₂. Isto reduz a transferência de calor e diminui a taxa de produção. Para controlar a tendência de formação de compostos alcalinos, a água de alimentação é tratada com aditivos químicos.

2.4.1.3 Destilação de Multi Efeito (MED)

As primeiras plantas MED foram introduzidas em 1960 operando com capacidades menores aos 500m³/dia chegando na atualidade a capacidades próximas aos 36.000m³/dia.

Nas plantas MED se utilizam uma sucessão de evaporadores conectados entre si nos quais o vapor gerado em cada um destes é usado no próximo estágio para obter a evaporação de água enquanto que o aporte de energia principal se faz sobre o primeiro evaporador, tal como mostra a Figura 37.

A água de alimentação (água a dessalinizar) é pré-aquecida na etapa de condensação do vapor que é gerado no último estágio e ingressa no primeiro estágio onde eleva sua temperatura ao ponto de ebulição com a ajuda do vapor auxiliar. A água do mar a ingressar na primeira câmara, é pulverizada sobre a superfície dos tubos do evaporador pelos quais circula o vapor de serviço.

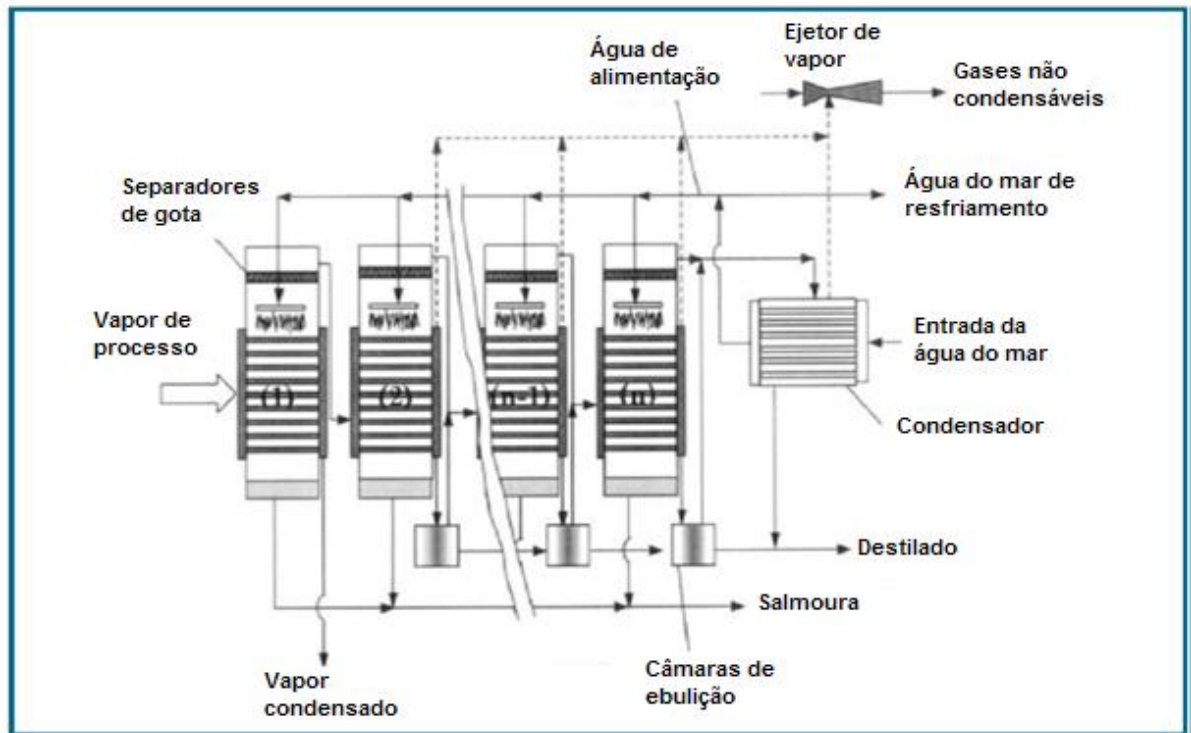


Figura 37 – Destilação de Múltiplo Efeito

Fonte: CNEA, 2013

Ao entrar em contato com a superfície, a água de alimentação é distribuída em forma de película delgada descendente, favorecendo assim sua evaporação e transformação em vapor. Este vapor é recolhido, depois de passar pelos separadores de gotas, e é enviado ao evaporador do seguinte estágio o qual opera a uma menor pressão e temperatura em relação ao anterior. O vapor gerado no estágio N se condensa no interior dos tubos do estágio N+1 e é recolhido como destilado em forma de água dessalinizada.

Como resíduo de cada efeito se obtém a salmoura, a qual é extraída do sistema ou enviada à etapa seguinte para continuar o processo de evaporação, segundo a configuração do equipamento que se utiliza.

Assim como para as plantas MSF, a destilação MED tem várias etapas conectadas em série a diferentes pressões de operação, reduzindo assim o ponto de ebulição em cada etapa pelo efeito da diminuição da dita pressão. Isto permite que a água de alimentação experimente múltiplas evaporações, em sucessivos estágios, utilizando somente o calor entregue pelo vapor auxiliar no primeiro estágio.

Na destilação tipo MED, são usados dois tipos de configurações:

HTE – Da sigla em inglês, Horizontal Tube Effect, Efeito de Tubo Horizontal

VTE – Da sigla em inglês, Vertical Tube Evaporation, Evaporação em Tubo Vertical

As configurações HTE e VTE são apresentadas abaixo na Figura 38.

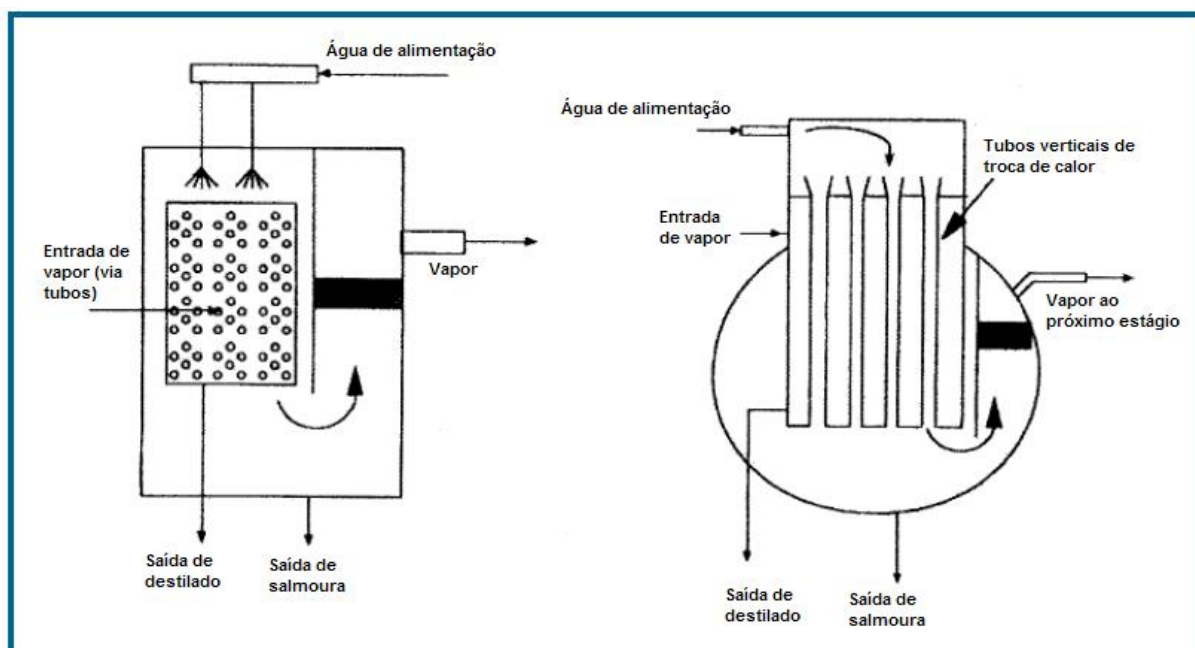


Figura 38 – Configurações HTE e VTE

Fonte CNEA, 2013

A quantidade de água dessalinizada para essas tecnologias se encontram em uma faixa de 50-16.000m³/dia para configurações do tipo HTE e de 16-20.000m³/dia para as VTE.

Os valores de GOR coincidem com N-1 (N: número de estágios). Ao aumentar o número de estágios, incrementa-se este parâmetro. Valores típicos se encontram na faixa de 2:1-24:1. Por exemplo, as plantas HTE-MED podem incorporar grande quantidade de estágios chegando a ter valores de GOR maiores que 20:1. Porém, estas configurações podem trabalhar em altas temperaturas (maiores que 130°C) o que implica o uso de materiais de alto custo para evitar a formação de incrustações.

Estas plantas dessalinizadoras apresentam um consumo energético nos sistemas de bomba de 0,9-4,5 kWh/m³ aproximadamente e um consumo calórico de 25-160kWh/m³.

Geralmente, a qualidade da água produzida é similar a obtida em processos MSF: 5-25 ppm SDT de uma concentração inicial de 35.000-45.000 ppm SDT.

Algumas configurações HTE-MED operam abaixo dos 70°C, o que limita a velocidade de corrosão e de formação de incrustações e, por consequência, a redução dos tratamentos químicos da água. Por esta razão se alcançam altos coeficientes de transferência de calor. Por sua vez, se evita o uso de materiais resistentes à corrosão de muito alto custo podendo fazer uso de alumínio, ligas de cobre para tubos de evaporadores e aços inoxidáveis/carbono para carcaça.

A tecnologia MED é mais moderna que a conhecida MSF e se considera que tem mais capacidade de ser desenvolvida e otimizada no futuro.

2.4.1.4 Osmose Reversa

O método utilizado para dessalinizar a água, Osmose Reversa (RO – Reverse Osmosis), funciona por um processo físico-químico diferente. A água salina é bombeada em alta pressão através de uma série de membranas semipermeáveis. Estas membranas deixam passar moléculas de água e impedem a passagem dos íons na solução. Desta maneira, uma parte da água é filtrada e recoletada como água de baixa salinidade enquanto são retidos do outro lado os sais e demais íons em uma solução salina mais concentrada. Este método consome energia elétrica para o funcionamento das bombas, mas também se pode utilizar calor para pré-aquecer a água salina e obter um maior rendimento da planta.

Na Figura 39 a seguir é mostrado um esquema típico de Osmose Reversa.

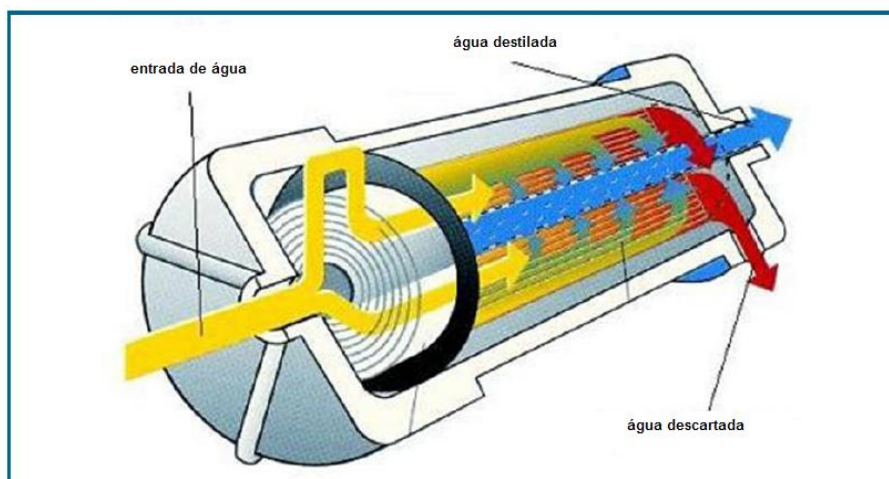


Figura 39 – Esquema típico de funcionamento da Osmose Reversa

Fonte: CNEA, 2013

Na tecnologia aplicada, atualmente, as membranas buscam melhorar a permeabilidade da água e reduzir cada vez mais a permeabilidade dos íons para obter água de melhor qualidade.

As membranas podem ser constituídas de polímeros naturais ou sintéticos, devendo cumprir certas condições: boa seletividade, baixa resistência à passagem de fluxo e alta estabilidade mecânica e química. Exemplos delas são: acetato de celulose, triacetato e poliamidas.

Antes de seu ingresso nos módulos da RO, a água a dessalinizar se submete a tratamentos químicos.

Os pré-tratamentos da água de alimentação são necessários para evitar a sujidade e deterioramento das membranas. Dependendo do tipo de membrana e qualidade da água de alimentação, os tratamentos químicos podem variar em cada caso.

Os pós-tratamentos dependem do uso final que se dará a água. A água, proveniente dos módulos de RO, se encontram dentro dos limites permissíveis para o consumo humano. No caso de se necessitar de água com maior pureza, estes tratamentos são necessários para reduzir as concentrações a 20-50 ppm. Por sua vez, se deseja-se água com baixa condutividade, faz-se a desmineralização por troca iônica.

Na Figura 40 é mostrado um esquema simplificado dos componentes básicos de uma planta RO.

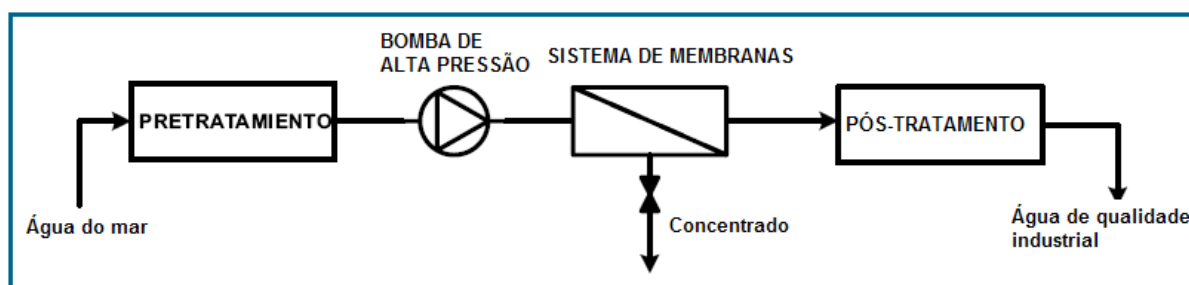


Figura 40 – Composição básica de uma Planta RO

Fonte: CNEA, 2013

Os requisitos energéticos dependem das condições da água de alimentação (concentração de sais, temperatura etc.) e do local onde se instala a planta dessalinizadora. Os valores usuais são 5-8kWh/m³ de água de produto, sendo que 85% é correspondente ao consumo de bombas.

Comparado com os processos térmicos, a Osmose Reversa apresenta menor consumo energético, simplicidade na operação, baixo custo de manutenção e redução dos fenômenos de corrosão por operar em temperatura ambiente.

As plantas de RO trabalham com capacidades que vão de uns poucos metros cúbicos até dezenas de metros cúbicos (50.000 m³/dia) e com menor qualidade de água se comparado aos métodos térmicos: 410-500 ppm de SDT.

Na atualidade está se implementando os chamados processos híbridos. Estes processos combinam plantas de RO e MED, resultando maior economia em muitos casos.

2.5 Rejeitos do Processo da Dessalinização

Conjuntamente com a obtenção da água potável a partir do processo de dessalinização, gera-se também uma corrente de água bastante concentrada em sais

(aproximadamente 70.000 mg/L de STD) que deve ser disposta em local apropriado (Kim, 2009).

Nas grandes usinas de dessalinização pelo mundo, a principal destinação do rejeito é seu retorno ao mar; esta alternativa de disposição seria ideal considerando-se o poder de diluição dos oceanos, porém, como alertam Hoepner e Latteman (2002) é conveniente considerar a fragilidade do ecossistema. Para Einav e Lokiec (2002), os prejuízos aos ecossistemas marinhos devem não só a alta concentração do rejeito, mas, também, à presença de compostos químicos que foram usados no pré-tratamento da água.

Ahmed et al. (2003) confirmam a viabilidade técnica de se tratar rejeitos de dessalinização em instalações de estrutura simples, usando a tecnologia de cristalização de sais. Com base na análise destes autores, vários tipos de sais, incluindo cloreto de sódio, hidróxido de magnésio, cloreto de cálcio, carbonato de sódio e sulfato de sódio, podem ser produzidos. Esses produtos são de alta qualidade e estão na demanda de várias indústrias.

No nordeste do Brasil, onde se dessaliniza água salobra mediante dessalinizadores de pequeno porte, outras alternativas que não apenas as usuais devem ser avaliadas e propostas. Em algumas comunidades do sertão, com água salobra da dessalinização cultivavam-se peixes, mais precisamente a tilápia (espécie que mais se adaptou ao sistema) e camarões. Também são usadas plantas halófitas, em especial, a *Atriplex nummularia*, que tem alta tolerância aos sais, conseguindo absorver grande quantidade de água salgada quando irrigada com a salmoura. Essas plantas são fontes ricas em proteína e caroteno e servem de alimentação ao gado cultivado no sertão nordestino (Soares, 2006).

2.6 Configurações Básicas e Balanço Energético

Como se mencionou anteriormente, uma central nuclear pode ter funções secundárias para aplicações não elétricas de caráter industrial e domiciliar.

As tecnologias existentes podem ser utilizadas para criar as mais variadas configurações. Entretanto, do ponto de vista técnico, o objetivo é sempre visar o aproveitamento máximo do consumo específico de vapor, além, é claro, de suprir a quantidade de água e eletricidade do local selecionado para instalação da planta.

Desta maneira, pode-se apresentar 2 configurações básicas para uma central nuclear multipropósito utilizando as tecnologias descritas anteriormente:

- Em primeiro lugar, um esquema em que o acoplamento do reator é feito a uma planta dessalinizadora tipo MED para produção de água. Tal acoplamento se realiza através do circuito secundário e seu objetivo é utilizar parte do calor gerado no núcleo do reator para alimentar o processo de destilação.

O Circuito Secundário no estado de vapor alimenta a turbina que move o gerador elétrico. Este vapor, que não entra em contato com a água do reator, se encontra em alta pressão e temperatura. O acoplamento da planta MED ao Secundário é realizado mediante à extração de uma fração da corrente de vapor que circula pela turbina. Esta corrente de vapor condensa em um trocador entregando sua energia a um Circuito de Acoplamento por onde circula água pressurizada que transfere seu calor a planta MED através de outro trocador. O vapor do Circuito Secundário não está em contato direto com a água salina que se pretende tratar.

A Figura 41 da página seguinte demonstra o esquema do circuito estudado.

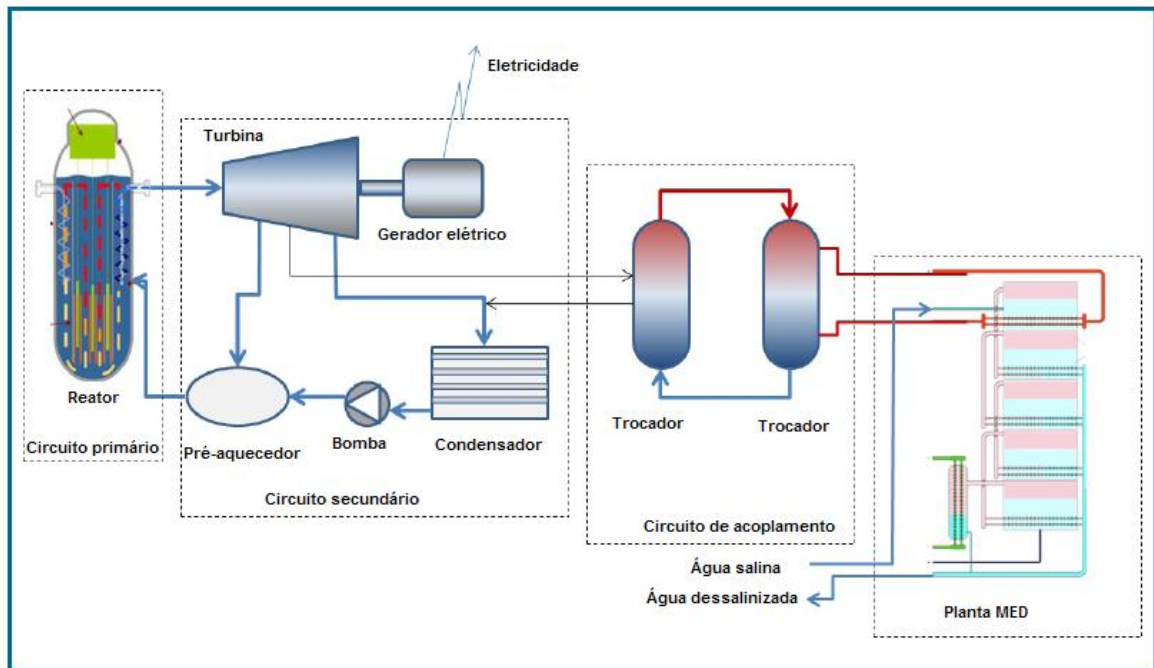


Figura 41 – Central nuclear tipo SMR acoplada à uma planta MED

Fonte: CNEA, 2013

Ao extrair vapor da turbina do Circuito Secundário, diminui-se a produção de eletricidade. A porcentagem de diminuição desta potência, ou seja a incidência de acoplamento de uma planta MED, varia de acordo com as condições termodinâmicas do acoplamento e dos diferentes esquemas de conexão.

Um dos resultados mais representativos é exatamente a possibilidade de acoplar um reator SMR a uma planta dessalinizadora tipo MED, gerando de forma conjunta eletricidade e água potável. Os esquemas de acoplamento mostram que é possível alcançar uma produção de água desmineralizada de 4.000-4.300 m³/dia e simultaneamente poderá se abastecer de energia elétrica 88.000 habitantes.

Uma vantagem adicional da implementação desta tecnologia, é a possibilidade de se produzir água desmineralizada para abastecer os próprios processos da central nuclear além da produção de água potável. Isto amplia a faixa de aplicação da planta dessalinizadora ao otimizar o uso dos recursos da água, incrementando seu valor agregado e dando maior autonomia a central.

- Como opção ao sistema MED, outra configuração é o acoplamento de sistemas modulares RO a um reator SMR. O dito acoplamento é principalmente elétrico e, em menor medida, térmico.

Como se mencionou anteriormente, o uso destes dispositivos exige um pré-tratamento físico-químico da água a dessalinizar no intuito de se evitar o deterioramento e sujidade das membranas e da degradação dos materiais constitutivos, em geral. Por outro lado, é necessário o uso de bombas de muita alta pressão para elevar a pressão da água de alimentação acima de sua pressão osmótica natural.

Para suprir as demandas energéticas das bombas, estas são alimentadas com energia elétrica gerada no circuito secundário do reator. O acoplamento dos equipamentos de Osmose Reversa a um reator é do tipo térmico mediante ao pré-aquecimento da água a tratar, a fim de aumentar o rendimento dos sistemas de membranas por uma parte; e a alimentação elétrica dos sistemas de acionamento, bombas de alta energia, por outra.

Para tal acoplamento, se propõe um circuito similar ao descrito na planta MED com o objetivo de se garantir o fluxo de calor desejado para o aumento de temperatura da água de alimentação.

Na Figura 42 é mostrado um esquema simples de acoplamento de um reator SMR aos módulos de Osmose Reversa segundo descrito anteriormente.

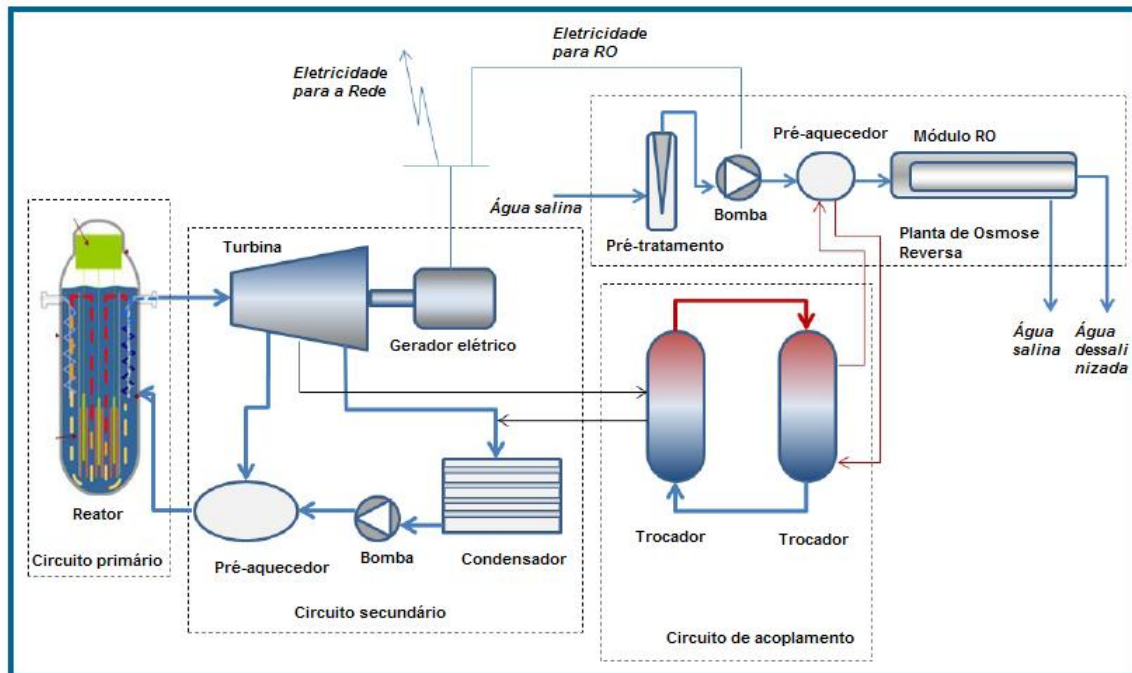


Figura 42 – Central nuclear tipo SMR acoplada à uma planta RO

Fonte CNEA, 2013

2.7 Combustíveis Utilizados

Tanto as turbinas como os motores à combustão podem ser alimentados por diversos tipos de combustível, que por sua vez apresentam variados valores de PCI e PCS (Poder Calorífico Superior - PCI + Calor Latente de Vaporização da Água de Constituição).

Como já desrito anteriormente, os reatores nucleares utilizam o urânio como combustível primário e que também possui seu conteúdo energético específico.

Na Figura 33 são apresentados os diversos tipos de combustíveis utilizados nos sistemas de cogeração e seus respectivos valores energéticos.

Gás Combustível	PCI (kcal/kg)	PCS (kcal/kg)	Combustível Sólido e líquido	Conteúdo energético (kcal/kg)
Gás Natural Campos	14.600	16.200	Carvão seco	7.000
Gás Natural Santos	14.400	16.000	Turfa	882
Gás Natural Bolívia	14.900	16.500	Gasolina	9.600
GLP	11.000	12.000	Petróleo Br	10.800
Hidrogênio	28.500	33.900	Urânio	19.000x10 ⁶
Metano	11.900	13.300	Madeira	3.500
Propano	11.000	12.000	Alcool hidratado	6.800

Figura 43 – Tipos de combustíveis e valores energéticos

Fonte: FURUKAWA, IFUSP, 2004

3. O PROGRAMA NUCLEAR BRASILEIRO

3.1 História

No Brasil, a pesquisa teórica sobre energia nuclear teve início da Universidade de São Paulo (USP), no final de 1930. Na década seguinte, o Brasil tornou-se fornecedor de recursos minerais (monazita, tório e urânio) para projetos nucleares experimentais nos Estados Unidos, como o Projeto Manhattan.

Até meados de 1950, o programa nuclear não havia avançado muito, exceto pela compra, por 80.000 dólares, de três centrífugas da Alemanha Ocidental. Embora as centrífugas tenham chegado ao Brasil em 1956, entraram em funcionamento apenas na década de 1970. Orçamentos limitados e instabilidade política causaram os atrasos.

Em 1957, o Brasil obteve seu primeiro reator para pesquisa, por meio do programa norte-americano “Átomos para a Paz”. O IEA-R1, como se tornou conhecido quando chegou no Instituto de Energia Atômica (IEA), em São Paulo, foi o primeiro reator a entrar em funcionamento no hemisfério sul.

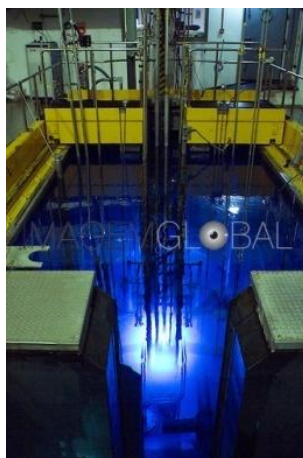


Figura 44 – Foto do núcleo do reator IEA-R1

Fonte: IPEN, 2010

Em 1968, impulsionado por seu grande crescimento econômico, o Brasil, governado por Costa e Silva, convidou diferentes empresas e consórcios a

apresentarem projetos para a construção de sua primeira usina nuclear. Após receber cinco propostas diferentes, optou-se pela oferta feita pela empresa baseada nos EUA Westinghouse Electric Company, envolvendo reatores de água pressurizada (PWR). Simultaneamente, o Brasil dialogou com Alemanha Ocidental, e um acordo de cooperação nuclear entre Brasília e Bonn foi assinado. Enquanto a CNEN finalizava os detalhes do contrato com a Westinghouse, entre maio de 1971 e Abril de 1972, a Comissão de Energia Atômica dos Estados Unidos (USAEC) aprovou o fornecimento de combustível nuclear para a primeira usina nuclear do Brasil, Angra 1. O contrato entre a CNEN e a Westinghouse foi assinado em abril de 1972 e logo começou a construção de Angra 1.

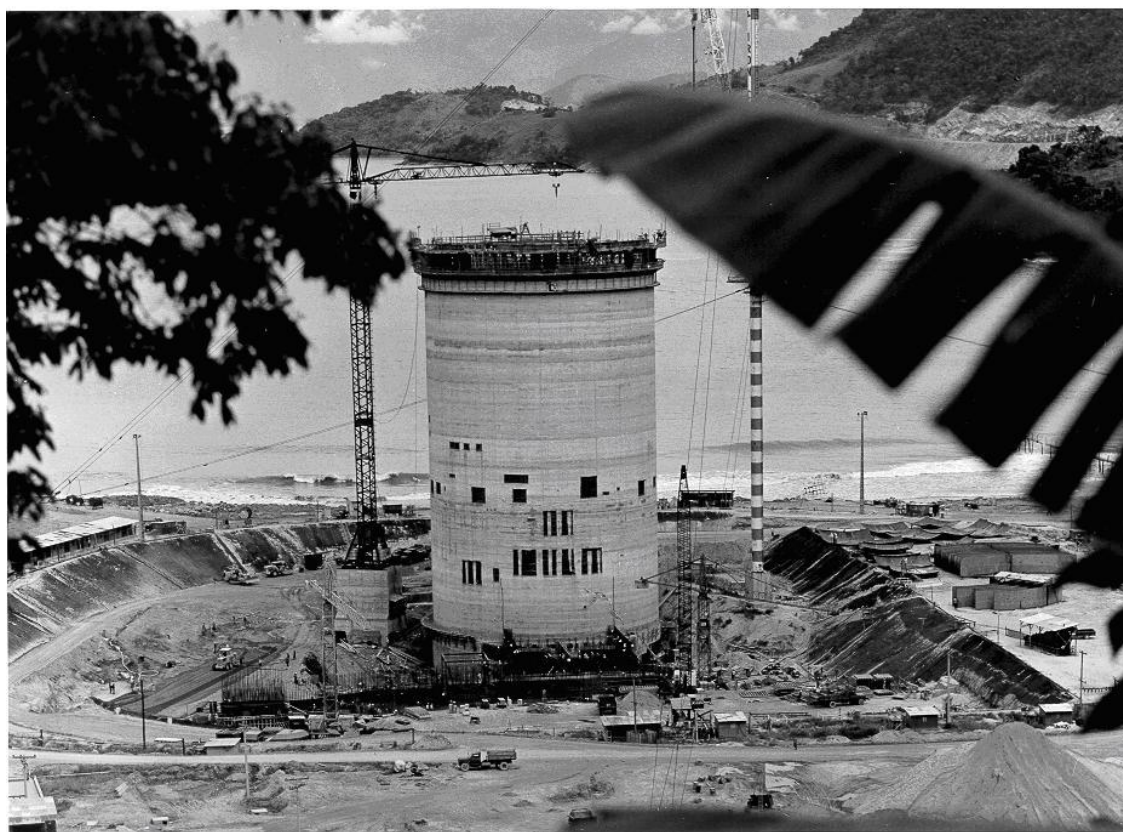


Figura 45 – Construção da Usina de Angra 1 em meados da década de 1970

Fonte: Eletronuclear, 2015

Ainda em cooperação com a Alemanha Ocidental, a construção do reator de Angra 2 teve início em 1976. No entanto, o projeto enfrentou atrasos na construção e aumento de custos, os quais motivaram profundas críticas no Brasil, ensejando a

criação de uma CPI em 1978, o qual investigou o acordo nuclear entre Brasil e Alemanha.

3.2 O Programa Nuclear “Paralelo”

Em 1978, em meio a frustrações com o acordo nuclear com a Alemanha Ocidental, crescentes restrições impostas pelos EUA à tecnologia nuclear e o recém-criado Grupo de Fornecedores Nucleares (Nuclear Suppliers Group – NSG), o Brasil desenvolveu um projeto nuclear secreto, coordenado pela CNEN e implementado pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), que havia substituído o IEA em São Paulo. O objetivo original do projeto era desenvolver tecnologia autônoma para a produção de hexafluoreto de urânio (UF₆).

O projeto evolui e tornou-se um programa, de modo a incluir pesquisa acerca de todas as fases da produção de energia nuclear, de reatores para propulsão naval e de artefatos nucleares explosivos. Conhecido como Programa Nuclear “Autônomo” ou “Paralelo”, foi controlado de perto pelos militares, sendo que cada uma das forças armadas dedicou recursos para a busca de métodos diferentes para o enriquecimento de urânio. Esse programa militar paralelo foi conduzido concomitantemente ao programa civil, coordenado pela Nuclebrás.

Após um período de várias notícias que supostamente apontavam testes com explosivos nucleares e tentativas do Brasil importar urânio enriquecida da China, em 1987 o presidente José Sarney revelou publicamente que o Brasil havia alcançado a capacidade de enriquecer urânio por meio de um programa nuclear secreto.

3.3 Situação Atual

Em 1988, A Nuclebrás foi transformada em uma nova instituição, a Indústrias Nucleares do Brasil (INB), associada à estrutura da CNEN e responsável pela extração, processamento e tratamento industrial de urânio.

No mesmo ano, o Centro Experimental Aramar (CEA), foi inaugurado em Iperó, no interior de São Paulo. Sob a tutela da Marinha, o CEA continua sendo um dos principais centros nucleares do Brasil, onde são conduzidas pesquisas sobre o desenvolvimento de um reator nuclear e atividades de enriquecimento de urânio em escala piloto.



Figura 46 – Centro Experimental Aramar, Iperó, SP

Fonte: Marinha do Brasil, 2015

A Usina de Angra 1, que teve sua primeira reação nuclear em cadeia em 1982 e que entrou em funcionamento comercial em 1985, enfrentou diversos problemas. Entre 1982 e 1992, as operações em Angra foram interrompidas 16 vezes, por razões diferentes.

A crise econômica que prejudicava o desenvolvimento do projeto nuclear brasileiro nos anos 80 teve continuidade na década seguinte. As atividades nucleares foram reduzidas, o programa para o desenvolvimento de um submarino nuclear chegou a um impasse e planos para a construção de duas usinas nucleares adicionais foram colocadas em espera. Somente em 1994 o governo brasileiro decidiu retomar a construção de Angra 2.

Em 2001, mais de duas décadas após o início de sua construção, a usina nuclear de Angra 2 entrou em operação comercial.



Figura 47 – Usinas de Angra 1 e Angra 2 atualmente

Fonte: Eletronuclear, 2015

Em 2004 entrou em funcionamento a Fábrica de Combustível Nuclear um centro da INB para o enriquecimento de urânio em escala comercial, mas, devido a diversos desentendimentos entre Brasil e AIEA, a Fábrica iniciou suas atividades somente em 2006. Hoje ela produz cerca de 10% de todo o urânio extraído no Brasil – detentor da sétima reserva mundial. O restante continua a ser enriquecido em outros países, principalmente no Canadá e na Europa.

Em 2007, o Brasil anunciou o ambicioso Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030), o qual afirma a necessidade de aumentar a produção de energia no Brasil e propõe que uma capacidade adicional de 5,345 megawatts (MW) de energia nuclear seja instalada até 2030. Para tornar isso possível, o plano apoia a conclusão de Angra 3 – cuja construção teve início em 2010 e segue em curso – e recomenda a construção de quatro usinas nucleares em todo o país. Embora Angra 3 permaneça em construção e deva entrar em operação em 2019, a construção das quatro novas usinas nucleares no PNE 2013 não foi iniciada. Na realidade, o PNE 2030 está sendo atualizado e deve ser substituído pelo PNE 2050 no final de 2015. É incerto saber o

que constará nele sobre a ampliação do setor nuclear, entretanto em diversas declarações dadas neste ano de 2015 o governo continua afirmando a intenção de construir 4 novas usinas até o ano de 2030.



Figura 48 – Construção da Usina de Angra 3

Fonte: Eletronuclear, 2014

No final de 2008, foi assinado um acordo com a França que criou uma parceria entre os dois países em matéria de defesa, o qualos franceses concordaram em trabalhar com o Brasil na construção de quatro submarinos convencionais e um de propulsão nuclear. Espera-se que a construção do submarino nuclear tenha início em 2016, na Unidade de Fabricação de Estruturas Metálicas (UFEM) da Marinha, localizada em Itaguaí, Rio de Janeiro. A data estimada para a conclusão é 2023, e o submarino deve entrar em funcionamento em 2025.

Em maio de 2013, a Redetec, órgão administrativo brasileiro responsável pela gestão de recursos para inovação nuclear, contratou a empresa argentina INVAP para construir um reator multipropósito no Brasil. O reator deve entrar em funcionamento

em 2018, no CEA. A INVAP é a empresa que, juntamente com a CNEA, está atualmente construindo o reator CAREM na Argentina, o qual poderá ser acoplado a uma planta de dessalinização e que serviu como base de estudo deste trabalho sobre as tecnologias de dessalinização existentes.

3.4 Acidentes Radiológicos

O Brasil nunca registrou nenhum acidente grave relativo ao programa nuclear, isto inclui a operação das usinas de Angra, todo o processo de extração, enriquecimento e armazenamento do urânio utilizado. Cerca de 10 acidentes menores foram registrado desde 1986 até os dias de hoje, mas nenhum que tenha provocado algum tipo de dano irreversível a trabalhadores ou civis.

A acidente radiológico mais grave registrado no Brasil foi o que ocorreu em Goiânia no ano de 1987 a partir a contaminação por Césio-137. Entretanto, o acidente iniciou-se a partir do momento em que um aparelho de radioterapia foi encontrado em uma clínica abandonada e posteriormente desmontado, gerando a contaminação. Este é o maior acidente radioativo do mundo ocorrido fora de usinas nucleares.

4. PROPOSTA DE APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO NO BRASIL

4.1 Integração da cogeração ao SIN

Para a inserção da cogeração ao SIN é necessário que o sistema atenda os requisitos de qualificação estipulados pela ANEEL, como citado no capítulo dois deste trabalho. Hoje no Brasil as duas usinas nucleares existentes - Angra 1 e Angra 2 – operam conectadas ao SIN, entretando apenas com o objetivo de fornecimento direto de energia elétrica, ou seja, a potência térmica gerada pela queima de combustível é totalmente direcionada para a turbina que, por sua vez, converte em energia elétrica e disponibiliza para o sistema. A potência térmica não convertida em energia elétrica, cerca de 66% do total de vapor, é condensada e novamente direcionada à turbina para efeitos de ganho de rendimento.

Pelo fato do programa nuclear brasileiro ter sido concebido e direcionado desde seu início para o controle do Estado, toda e qualquer atividade nuclear no país é monopólio da União e este é um dos pontos limitantes para a implantação da cogeração nas usinas. A visão de produzir com eficiência e posteriormente comercializar energia é um conceito relativamente novo e que vem sendo aplicado, em sua grande maioria, por empresas privadas que visam lucrar sobre a venda, principalmente em resposta ao preços crescentes do MW/h atingidos nos últimos anos.

4.2 Panorama governamental

A perspectiva atual de monopólio da União pode estar começando a mudar. O plano do governo de instalar novas usinas nucleares para a geração de energia no país inclui a expectativa de atrair sócios privados para atuar nos empreendimentos em parceria com a Eletronuclear, estatal que pertence ao Grupo Eletrobrás. A idéia, segundo o próprio Governo já declarou e foi noticiado em Junho deste ano, já está em curso e avalia diferentes formas de o capital privado entrar nas operações.

Uma possibilidade é encaminhar ao Congresso Nacional um projeto de emenda constitucional (PEC) que acabe com o monopólio da União sobre as atividades nucleares. Pela constituição, apenas o governo pode processar urânio e gerenciar atividades nucleares no País.

Uma segunda alternativa, que evita a necessidade de se alterar a Constituição, também tem sido discutida. A idéia é que na sociedade entre Eletronuclear e empresa privada, a estatal continue 100% responsável pela manipulação e gestão do combustível nuclear, enquanto o sócio privado responderia por questões de cunho administrativo.

As discussões ainda estão no início, mas a Eletronuclear acredita na possibilidade de se realizar uma leilão para contratação de uma nova usina nuclear em 2016. O ministro de Minas e Energia, Eduardo Braga, defende o retorno das usinas nucleares para os planos do setor.

De qualquer forma, este pode ser o primeiro passo para a a implantação da cogeração em usinas nucleares nacionais, seja com o intuito de dessalinização ou qualquer outra aplicação não elétrica.

A partir dessa possibilidade, também se desenvolve a proposta central do trabalho e norteia este capítulo, isto é, uma usina operando através da cogeração produzindo, simultaneamente, eletricidade e vapor para dessalinização da água do mar e geração de água potável.

4.3 Descrição técnica do sistema proposto

4.3.1 Configuração do sistema de cogeração

Para o presente estudo iremos utilizar um sistema de cogeração com turbina a vapor. É o mesmo esquema utilizado nas duas usinas brasileiras em operação e na terceira atualmente em construção. Este trecho do circuito, composto pela turbina, gerador, condensador, bomba e pré-aquecedor, é denominado circuito secundário

Conectada ao sistema de cogeração estará uma planta do tipo MED (Destilação Multi Efeito) e um circuito intermediário de troca de calor

A Figura 49 exemplifica todo o processo, inclusive o circuito primário o qual é representado pelo reator nuclear.

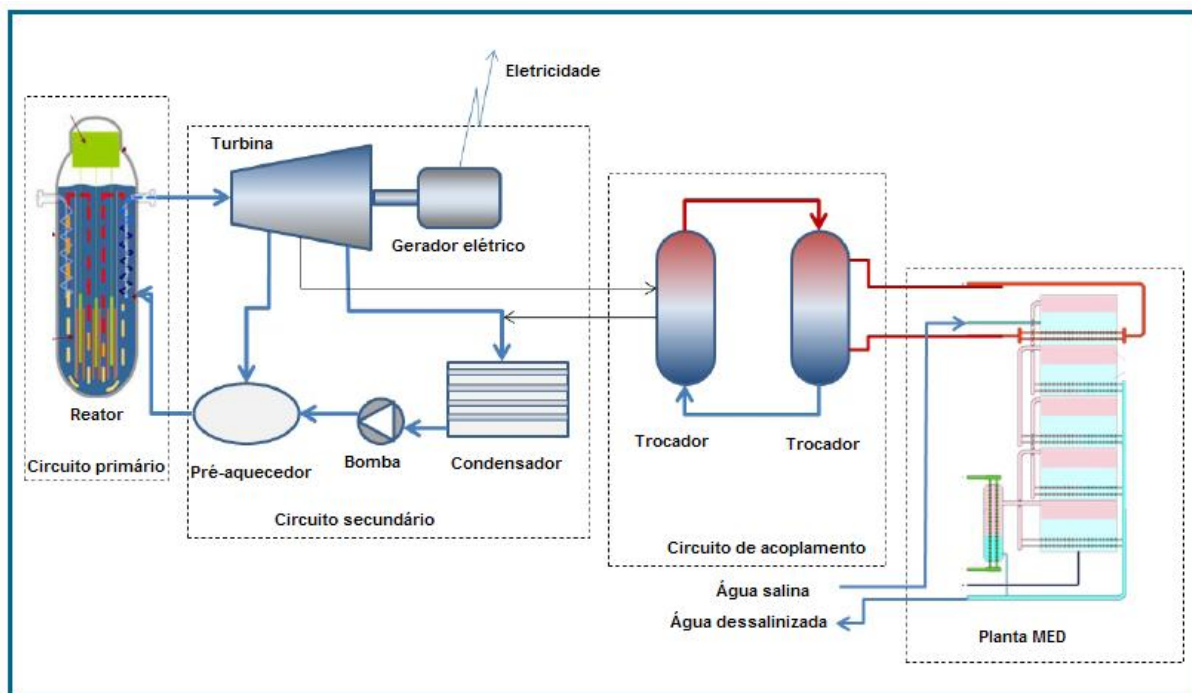


Figura 49 – Cogeração em uma planta dessalinizadora tipo MED

Fonte: CNEA, 2013

A opção pela planta MED deve-se ao fato desta tecnologia apresentar a melhor relação custo por qualidade de água produzida.

Enquanto que em uma planta dessalinizadora operando por Osmose Reversa atinge qualidade de água em uma faixa entre 250 a 500 ppm, uma planta que trabalha através da destilação MED atinge uma faixa entre 5 a 25 ppm.

Quanto ao custo, comparando entre as tecnologias de destilação, uma planta MSF exige aproximadamente o dobro do custo de uma do tipo MED. Isto deve-se a fato, principalmente, do custo elevado das bombas de alta pressão. Em valores atuais, uma destilação por multi efeito custa entre 0,6 a 0,96 U\$/m³ de água destilada.

A escolha pela destilação MED ainda é sustentada por seu consumo específico de energia ser menor em relação às outras opções. Fato que será mais detalhado adiante

4.3.2 Dados do reator

Para simular o comportamento de uma usina nuclear operando com cogeração, será utilizado como premissa fundamental a capacidade prevista de geração de Angra 3, 1.350 megawatts elétricos (MWe). A partir deste ponto toda a concepção de funcionamento será modificada, afinal como já esclarecido a proposta de Angra é exclusivamente fornecer energia elétrica.

Para este trabalho que além da geração de energia, pretende fazer uma análise sobre produção de água dessalinizada, a geração elétrica será da ordem de 1.200 megawatts elétricos (MWe). Como será detalhado adiante, este número diferencia-se do primeiro justamente em função da aplicação da cogeração, já que os equipamentos adotados serão bastante similares aos usados na usina brasileira.

As características do reator também serão baseadas no reator de Angra 3, assim serão apresentados no final da análise resultados bem próximos à realidade do que se pode obter em termos de ganho de eficiência no processo e, especificamente neste caso, geração de água potável. Estas características são apresentadas na Tabela 4.

Tipo de reator	Água pressurizada / PWR
Faixa operacional contínua	80% - 100%
Material combustível	Urânio enriquecido
Material de revestimento	Zircaloy 4 (Zr)
Densidade média de potência do combustível	36,4 (kW/kg U)
Refrigerante	H ₂ O

Tabela 5 – Características principais do reator

Fonte: Eletronuclear, 2015

4.3.3 Seleção da turbina

A partir do valor de potência elétrica a ser gerada na turbina, é determinada a turbina que irá suprir esta demanda.

A turbina Siemens SST-6000 é destinada especificamente à plantas nucleares, é um modelo muito similar à turbina presente em Angra 2/3e a que será utilizada nesta análise.

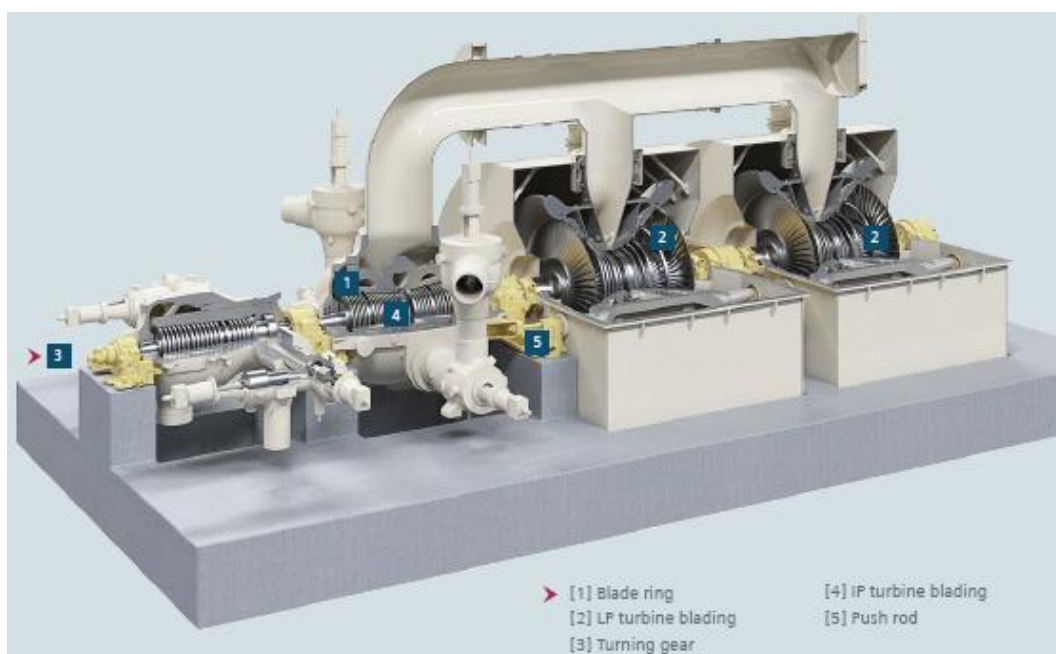


Figura 50 – Vista em corte da turbina Siemens SST-6000

Fonte: Siemens, 2015

Na tabela 5 é apresentada a especificação técnica da turbina.

Fabricante	Siemens
Modelo	SST-6000
Tipo	Turbina a vapor
Frequência de operação	50 ou 60Hz
Velocidade	3.000 ou 3.600 rpm
Potência elétrica	300MW a 1.200MW
Potência elétrica com reaquecimento	1.000MW a 1350MW
Eficiência elétrica	46%
Condições de vapor na entrada da turbina	
Temperatura	280°C
Pressão	64.2 (kg/cm ²)
Vazão	7.398 (t/h)

Tabela 6 – Dados técnicos da turbina selecionada

Fonte: Siemens, 2015

Como foi mostrado na tabela anterior, a turbina SST-6000 tem uma potência nominal de até 1.350 MW se configurada para trabalhar com reaquecimento. Este tipo de arranjo permite obter a maior eficiência disponível da turbina – no caso desta 50%. Entretanto para se alcançar este valor é necessário utilizar todos seus canais de extração para que seja feita a realimentação a partir do estágio de baixa pressão para o estágio de alta pressão.

A extração sendo direcionada à cogeração, como no caso da dessalinização, ocasiona em uma maior eficiência térmica em detrimento à eficiência elétrica.

De acordo com LAPA (2005, pag. 26) “[...] O vapor que sai da turbina de Angra 2 no estágio de alta pressão e encaminha-se para a baixa pressão está com pressão de 11 bar e temperatura em torno de 260°C. Na exaustão atinge a pressão de cerca de 0,09 bar [...]”. Para a configuração proposta no trabalho, será utilizado um canal de extração intermediário da alta pressão, de 0,31 bar e temperatura de aproximadamente 70°C. A entalpia de vaporização da água neste caso é de 2.333,0 kJ/kg

4.3.4 Condensador

Com a função de condensar o vapor que atravessa as turbinas e manter o vácuo para otimizar a eficiência das turbinas, o condensador é uma caixa de 170 toneladas composta por até 35 mil tubos, que são feitos de cobre, aço ou titânio. A troca de calor é feita com a água do mar, que circula em um circuito isolado do circuito secundário.

4.3.5 Circuito de Acoplamento

O vapor de exaustão do circuito secundário é misturado ao fluido do circuito de acoplamento e redirecionado ao condensador para que seja feito o posterior aquecimento e reinjeção na turbina, completando assim o ciclo Rankine. A ilustração da Figura 49 é um esquema simplificado do processo. Em uma central nuclear tipo PWR existem diversos circuitos de aquecimento de vapor advindos do estágio de baixa pressão da turbina, no qual o fluido de exaustão direcionado ao condensador é obtido apenas na última extração.

O circuito de acoplamento é mais um dispositivo que busca a segurança do sistema inteiro, pois isola a água advinda da central nuclear da água que será dessalinizada e posteriormente consumida.

4.4 Balanço Energético

Com base na produção de energia elétrica assumida (1,2 GWe), toma-se o balanço energético dos Circuitos 1 e 2.

A Energia de Vapor na entrada da turbina é definida através da Eq.(15) :

$$E_{vp} = \frac{E_e}{\eta_e} \quad (15)$$

Sendo:

E_{vp} = Energia de entrada do vapor

E_e = Energia elétrica gerada

η_e = Rendimento elétrico da turbina

Assim, temos que a energia de vapor necessária para atender a demanda elétrica é da ordem de 2,6 GW.

A Energia Térmica na descarga da turbina é a diferença entre a Energia de Entrada do Vapor e a Energia Elétrica gerada:

$$E_t = E_{vp} - E_e \quad (16)$$

Sendo:

E_{vp} = Energia de entrada do vapor

E_t = Energia térmica gerada

E_e = Energia elétrica gerada

De posse destas grandezas a etapa seguinte é desenvolver os cálculos para todo o balanço energético da etapa de cogeração da planta. Na Figura 51 são apresentados todos os valores obtidos.

Balanco Energético -		Dados Turbina Siemens	
Disponibilidade	95%	SST -6000	
Turbina	SST-6000 1 x	ISO	
Potência Elétrica Gerada	1140000 kWe	Ee	1.200.000,0 kW
Eficiência Elétrica	46,0%	ne	46,0%
Energia de Entrada do Vapor	2478261 kW	E _{VP}	2.608.696 kW
Densidade de Energia do Urânio	16.090.000.000 kcal/kg	nt	54,0%
Vazão de Urânio	0,13 kg/h	Et	1.408.696 kW
Eficiência Térmica Turbina	54,0%		
Potência Térmica Gerada na Turbin	1338261 kWt		

Figura 51 – Balanço energético do sistema

Em função da alta densidade de energia do urânio, é possível observar que uma massa pequena desse combustível é requerida para gerar a quantidade de vapor desejada. É válido lembrar que este é um valor teórico. A reação em cadeia só ocorre acima de determinada massa de urânio, denominada massa crítica, que para o U-235 é de aproximadamente 3,25kg.

É importante lembrar que uma usina nuclear gera eletricidade por meio de combustão externa, ou seja, o combustível (urânio) não entra em contato com o fluido de trabalho (água).

Uma central a vapor como esta, por exemplo, não opera em ciclo combinado (Rankine + Brayton), justamente porque o objetivo não é somente ganhar eficiência na geração de energia, mas também manter a temperatura média de rejeição de vapor.

4.5 Consumo Específico de Vapor

O consumo específico de vapor é um indicador de performance que vem sempre associado às unidades de dessalinização térmica (MSF e MED) para representar a razão entre a água doce produzida e o respectivo consumo de vapor. Este indicador, conhecido como GOR (Gain Output Ratio) cuja unidade é $\text{kg}_{\text{produto}} / \text{kg}_{\text{vapor}}$. O GOR depende no número de efeitos ou etapas, dos parâmetros de operação e geralmente

varia inversamente com o consumo específico térmico e diretamente com o número de efeitos ou etapas.

Utilizando como base a Figura 52 será utilizado para os demais cálculos GOR 7, que é o valor típico de GOR para uma unidade HTE-MED operando com água de alimentação a 70°C e de 9 estágios.

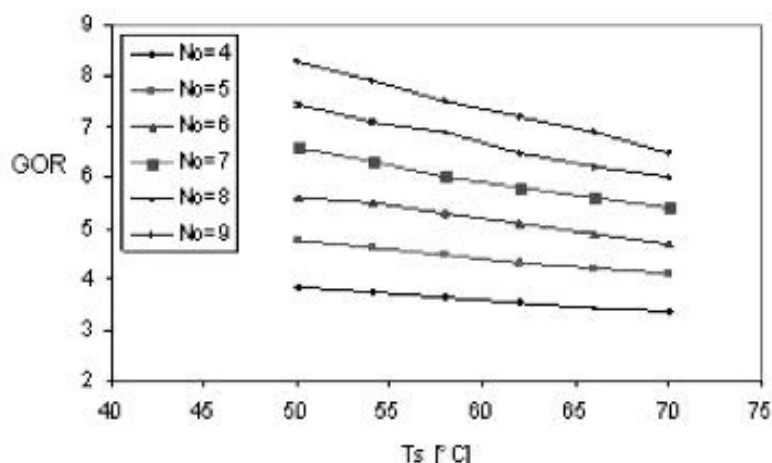


Figura 52 – Variação do GOR com o efeito da temperatura em diferentes números de efeitos.

Fonte: Kamali, Abassi, Vanini e Avval, 2007

É importante salientar que os valores de GOR vêm sendo aprimorados anualmente em função da melhoria dos materiais empregados e equipamentos utilizados. Atualmente existem diversas unidades MED acopladas a termo-compressores em operação no mundo com valores de GOR acima de 10.

“Elevando-se a temperatura convencional de água de alimentação de 70°C para 85°C, eleva-se em até 16 o número de efeitos, o GOR é acrescido em 28% e a produção de água em 42%” (GENDEL, 2013, pag.3). Entretanto, como já foi dito, a corrosão dos equipamentos passa a ser um inconveniente.

4.6 Produção de água potável

Ao se projetar uma usina de dessalinização, o primeiro parâmetro a se considerar é a necessidade de água destilada para o objetivo que se deseja atender, seja para um processo industrial ou para uma cidade que atenda um número determinado de pessoas. Na proposta da monografia, partiu-se da premissa de energia térmica disponível na turbina empregada e também da vazão de vapor na entrada da mesma.

Analisando teoricamente o modelo proposto, é possível chegar a produção de água potável apenas aplicando a própria definição de GOR:

$$GOR = \frac{\text{água produzida}}{\text{vapor consumido}} \quad (17)$$

Aplicando o valor do GOR selecionado e potência térmica disponível, temos que:

$$\text{água produzida} = \frac{(1338,26 \text{ MWt}) \left(\frac{3600 \text{ seg}}{\text{h}} \right) \left(\frac{24 \text{ h}}{\text{dia}} \right)}{\left(\frac{1,34 \text{ MJ}}{\text{kg}} \right) \left(\frac{1000 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right)} * 7 = 604.014 \text{ m}^3 / \text{dia} \quad (18)$$

A taxa de produção de água para uma única planta nuclear de 1200 MW(e) seria impressionante. Atualmente, a maior de planta de dessalinização do mundo é 800.000 m³/dia (a capacidade de Marafiq Jubail, Arábia Saudita). O Estado do Rio de Janeiro consome aproximadamente 1,6 milhões m³/dia, portanto, esta quantidade seria o suficiente para abastecer 38% da população do Estado.

Entretanto, existem alguns fatores a considerar, já que está sendo considerada uma aplicação muito próxima da existente em Angra 3.

Normalmente nos sistemas de regeneração cada extração consome entre 10 a 15% do fluxo de vapor da turbina. Esse é o mesmo valor indicado pelos fabricantes para que as perdas de carga não passem a influenciar muito no rendimento da máquina. Então, o cálculo será refeito de forma que apenas 15% da vazão de vapor da turbina – isto equivale a 1.110ton/hora - seja extraída para o processo de cogeração. Obtem-se então, que cerca de um terço da potência térmica disponível na turbina será

utilizada como vapor de processo da dessalinização, conforme pode ser visualizado na Figura 53.

Energia para geração de vapor saturado @ 0,31 bar

T saturação @ 0,31 bar / f (Psat)	70	C
T inicial	280	C
Calor específico da água	4,2	kJ/kg.K
Entalpia de Vaporização água @ 0,31 bar	2333,0	kJ/kg
Q total	1451	kJ/kg vapor
Q total	0,40	MWh/ ton
Demanda de Vapor proposta	447,4	MW
Demanda de Vapor (Qu)	322117,02	MW/mês
Vapor gerado para processo nas temperaturas adotadas	1109,98	ton vapor/h

Figura 53 – Condições energéticas da planta e quantidade de vapor destinado ao processo

No ponto de extração para o processo de dessalinização, a turbina opera como condensação, já que a temperatura de saída está abaixo da atmosférica. O Calor a ser entregue à turbina (Q total) é obtido através da Eq.(19).

$$\Delta h = c_p * \Delta T \quad (19)$$

Onde:

Δh = Diferença de entalpia

C_p = Calor específico da água

ΔT = Diferença de temperatura

Desta forma, retornando à Eq.(17), que representa o ganho do sistema, chega-se ao total de água destilada produzida.

$$\text{água produzida} = \frac{1110\text{ton}}{h} * 7$$

Resolvendo a equação, chega-se ao total de água destilada produzida de 186.480 m³/dia.

Hoje sabe-se que a usina de Angra 2 tem capacidade energética para abastecer 26% da população do Estado do Rio de Janeiro. A produção de água potável através desta proposta de dessalinização atenderia cerca de 722.000 mil pessoas, ou seja, cerca de 11% da mesma população.

Fazendo uma relação direta entre produção e água, sem considerar os próprios custos de operação e manutenção, uma usina deste tipo gera 1m³/dia de água potável a cada 6W de capacidade instalada.

4.7 Totalização dos custos

Os custos da dessalinização variam significativamente dependendo do tamanho e tipo da planta de dessalinização, da fonte e da qualidade da água de alimentação, da necessidade de pré-tratamento, da automação e controle, da localização da planta, das condições do lugar, da qualificação do laboratório de qualidade, da vida útil da planta e, não menos importante, dos custos de energia. Água com baixa salinidade requer menor consumo de energia e uma baixa dosagem de produtos químicos anti-incrustantes. Plantas com capacidade conseguem um maior aproveitamento de energia e, portanto, apresentam um menor custo de água por m³. No entanto, elas também requerem alta quantidade de energia, ou seja, precisam dispor de uma boa infraestrutura de energia nos arredores, e geram um grande volume de solução salina concentrada que deve ser disposta corretamente (Zhou, 2005).

Para a dessalinização da água do mar, o método de OR tem se tornado o mais usado atualmente (2015), devido, principalmente, ao decréscimo nos preços das membranas. Contudo, os sistemas de dessalinização em larga escala (mais que 500.000 m³ de água por dia) em muitos países, como China ou Oriente Médio, usam

principalmente métodos térmicos. Nesses casos, o custo da água produzida varia entre 0,50 US\$/m³ e 1,00 US\$/m³. O custo vai sendo acrescido de forma inversamente proporcional ao tamanho da planta, conforme apresentado na Tabela 6. A explicação é que unidades pequenas usam principalmente energia renovável, bem como devido à baixa economia de escala, o custo é alto (Tzen, 2006). Apenas a título de comparação, segundo a Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE, 2015), a população obtém água a um custo de R\$ 3,16/m³ (0,83 US\$/m³, considerando o dólar a R\$ 3,80, segundo o Banco Central do Brasil). Este valor é muito próximo ao valor pago pela água dessalinizada em várias partes do mundo

	Capacidade (m³/dia)	Custo de Investimento (US\$×10⁶)	Custo da água (\$/m³)
RO	10.000	20,1	0,95
	50.000	74,0	0,70
	275.000	293,0	0,50
	500.000	476,7	0,45
MSF	10.000	48,0	1,97
	50.000	149,5	1,23
	275.000	498,1	0,74
	500.000	759,6	0,62
MED	10.000	28,5	1,17
	50.000	108,4	0,89
	275.000	446,7	0,67
	500.000	734,0	0,60

Tabela 7 – Custos para diferentes tecnologias e 3 diferentes capacidades

Fonte: Wittholz e Lewis, 2008

Conforme já abordado anteriormente, a escolha pela tecnologia MED de dessalinização deu-se em função do melhor custo específico deste sistema, isto é, é a opção que possui menor valor de investimento pela maior quantidade de água destilada no final do processo.

Atrelado ao custo de investimento, também se acrescentam os custos de ingestão/emissão da água do mar, serviços auxiliares, operação e manutenção, que somados adicionam 30% sobre o valor do custo total.

Como este estudo foi sendo embasado em uma central nuclear já existente, os custos do sistema de cogeração e da usina como um todo foram descartados neste momento, bem como os custos de energia, operação e manutenção.

O objetivo é chegar ao valor que seria agregado pelo fato da usina passar a operar com cogeração. E, para este caso em particular, o custo total da planta dessalinização proposta fica em torno de 400 milhões de dólares.

5. CONCLUSÕES

Como exposto no presente trabalho as usinas nucleares associadas à cogeração geram diversas vantagens para o país.

Primeiramente a construção de novas usinas deste tipo possibilitam uma maior diversificação da matriz energética, já que o Brasil possui uma geração predominantemente hidráulica e sofre muito em momentos de seca como o que está acontecendo neste momento. A geração nuclear destaca-se pelo fato de não estar condicionada a qualquer sazonalidade atribuída às condições naturais, já que tem o urânio como seu combustível primário. Urânio, que por quilograma produz de energia o equivalente a 7,6 milhões de litros de gasolina.

As questões do espaço físico e preço também são um destaque. Segundo a ABEN (Associação Brasileira de Energia Nuclear), para gerar, por exemplo, 225MWe, uma usina nuclear requer 100km², enquanto que para gerar a mesma potência, uma usina solar necessita de 10.000km² e a eólica uma espaço de 240.000km². Quanto ao preço da energia, são apenas R\$ 25 por megawatt, quando uma hidroelétrica custa ao menos R\$ 75 e uma térmica, cerca de R\$ 600.

A questão segurança ainda é um dilema quando o assunto é usinas nucleares. Entretanto, além de todos os sistemas já tradicionalmente dispostos nestes casos, pode-se projetar um sistema de automação para toda instalação, o qual bloquearia o fluxo de água na unidade MED de forma eletromecânica – uma válvula de bloqueio acionada por sensores - a partir do momento em que se detectasse qualquer anomalia na central nuclear. Assim, ao menor sinal de problema, seja vazamento de água do circuito primário ou mesmo um tubo do condensador furado, o tratamento e fornecimento de água seria cessado até a solução do problema.

Sobre a cogeração, esta é o pilar fundamental neste processo todo. Ela permite a aproveitamento de grande parte do calor que estaria sendo desperdiçado em um processo comum e aumenta o rendimento de todo o sistema. Utilizando novamente

Angra 3 como base de comparação, a usina produz três vezes mais calor do que energia elétrica útil. No estudo feito neste trabalho, a quantidade de energia de vapor é menor em função da melhor eficiência da turbina, mas ainda assim é maior que a quantidade de energia disponibilizada.

Infelizmente, a participação da cogeração na matriz energética brasileira ainda é singela quando nos comparamos a outros países industrializados no resto do mundo. O fato deve-se a diversos entraves regulatórios, falta de incentivos e a falta de uma política clara da exportação de excedentes elétricos para o produtor.

A cogeração pode ter diversos tipos de aplicações e uma delas, a dessalinização, foi descrita neste trabalho como uma forma de contribuição na resolução do problema da crise hídrica.

Ao final do estudo proposto, onde uma central de dessalinização estaria concetada à uma usina com as características similares à de Angra 3, obteve-se cerca de 186.000m³/d de água destilada disponível para consumo ou aplicação em qualquer outro processo. A unidade de Kalpakkam na Índia, por exemplo, opera com um reator produzindo 500MWe e 100MWt, os quais são destinados à dessalinização da água, onde 75% da água é destinada ao consumo da população e 25% é desmineralizada e retorna para arrefecimento do próprio reator.

Retornando a quantidade de água obtida, este é um volume suficiente para abastecer a cidade de Santo André (SP) ou Osasco (SP).

O custo do sistema, caso novamente seja pensado na Usina de Angra 3 que está em construção e cujo orçamento está em 14 bilhões de reais, representa um acréscimo de apenas 6% no custo estimado da usina brasileira em construção – já descontada a conversão da moeda.

A maior expectativa para este setor é que a construção de novas usinas realmente sejam incorporadas ao planejamento do governo. Que aos poucos o setor privado seja incorporado aos modelos de negócios para que se busque maior eficiência aos processos de geração de energia, permitindo assim pensar na venda de energia em leilões como é feito hoje para as fontes eólicas e mais recentemente para as solares. Finalmente, para que o país esteja melhor preparado para futuras

crises hídricas que possam ocorrer, através da diversificação de sua matriz energética associada a pouca emissão CO₂.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASSI, A.; VANINI, SEYED A. S.; AVVAL, MAJID S. **Artigo – Thermodynamic Design and Parametric Study of MED-TVC.** Desalination, 2008

AHMED, M.; ARAKEL, A.; HOEY, D.; THUMARUKUDY, M. R.; GOOSEN, M. F. A.; HADDABI, M. A.; BELUSHI, A. A. **Feasibility of Salt Production from Island RO Desalination Plant Reject Brine: A Case Study.** Desalination, v.158, 109-117, 2003

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica.** 7ª Ed. Editora Mc Graw Hill, 2013

Comissão Nacional de Energia Atômica (CNEA – Argentina). **Boletim Energético 31.** 1º Semestre de 2013, Ano XVI

EINAV, R.; LOKIEC, F. **Environmental Aspects of a Desalination Plant in Ashkelon.** Desalination, 156, 79-85, 2003

FERREIRA, EDUARDO M. Síntese **Otimizada de Sistemas de Cogeração e Dessalinização.** Tese de Doutorado, Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2008.

HOEPNER, T.; LATTEMAN, S. **Chemical Impacts from Seawater Desalination Plants: A Case Study of the Northern Red Sea.** Desalination, 152, 133-140, 2002

International Atomic Energy Agency (IAEA). **Nuclear Power Reactors in the World.** Reference Data Series nº2, 2015 Edition

KHAMIS, I. **A Global Overview on Nuclear Desalination.** Vienna - International Atomic Energy Agency (IAEA), 2009.

KIM, Y.; KIM, S.; KIM, Y.; LEE, S. **Overview of Systems Engineering Approaches for a Large-scale Seawater Desalination Plant with a Reverse Osmosis Network.** Desalination, 238, 312-332, 2009

LAPA, NELBIA da S. **Otimização da Eficiência de uma Usina Nuclear do Tipo PWR.** Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

LUCA, RAFAEL DE. **Proposta de Geração de Energia e Água Potável para a Região Semiárida do Nordeste Brasileiro.** Porto Alegre. Monografia (Graduação em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012

PETERSON, F. e HAIHUA, Z. Artigo - **An Optimized System for Advanced Multi-Effect Distillation (AMED) Using Waste Heat from Closed Gas Brayton Cycles.**2006.

REIS, LINEU. B. dos **Notas de aula – Geração Termelétrica.** 2012.

SANTOS, FERNANDO A. dos **Análise da Aplicação da Biomassa da Cana como Fonte de Energia Elétrica: Usina de Açúcar, Etanol e Bioeletricidade.** Dissertação de Mestrado, USP, 2012

SANTOS, José J. C. S. **Avaliação Exergoeconômica das Tecnologias para a Produção Combinada de Eletricidade e Água Dessalinizada.** Dissertação de Mestrado, Itajubá, 2005.

SIEMENS, **Folha de Dados – SST-PAC 6000 – Steam Turbine Package,** 2015

SOARES, M. T. **Destinação de Águas Residuais Provenientes do Processo de Dessalinização por Osmose Reversa.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.20, n.3, 730-737, 2006

TORRI, JÚLIA B. **Dessalinização de Água Salobra e/ou Salgada: Métodos, Custos e Aplicações.** Porto Alegre. Monografia (Graduação em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015

TZEN, E. **Renewable Energy Sources for Desalination.** In: Workshop on Desalination Units Powered by RES, Athens, 2006

VIEIRA, PAULO **Aspectos de Segurança das Usinas da CNAAA em Consideração do Acidente na Usinas de Fukushima no Japão.** Conferência Internacional de Energia Nuclear, 2011

Wittholz, M. e Lewis, D. **Estimating the cost of desalination plants using a cost database.** Artigo, University of Adelaide, 2008

ZHOU, Y.; TOL, R.S.J. **Evaluating the costs of desalination and water transport, Water Resource.** Res. 41, 2005