



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

MARLLON FRAGA SILVA

**CONVERSÃO DE UMA CENTRAL TERMELÉTRICA A VAPOR DE UMA
USINA SIDERÚRGICA EM PLANTA DUAL PARTINDO DE UMA
REPOTENCIAÇÃO USANDO CICLO COMBINADO**

VITÓRIA

2016

MARLLON FRAGA SILVA

**CONVERSÃO DE UMA CENTRAL TERMELÉTRICA A VAPOR DE UMA
USINA SIDERÚRGICA EM PLANTA DUAL PARTINDO DE UMA
REPOTENCIAÇÃO USANDO CICLO COMBINADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Orientador: Prof. Dr.: José Joaquim Conceição Soares Santos.

VITÓRIA

2016

MARLLON FRAGA SILVA

CONVERSÃO DE UMA CENTRAL TERMELÉTRICA A VAPOR DE UMA
USINA SIDERÚRGICA EM PLANTA DUAL PARTINDO DE UMA
REPOTENCIAÇÃO USANDO CICLO COMBINADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Orientador: Prof. Dr.: José Joaquim Conceição Soares Santos.

Aprovado em 23 de novembro de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. José Joaquim Conceição Soares Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. João Luiz Marcon Donatelli
Universidade Federal do Espírito Santo
Co-Orientador

Prof. Dr. Rafael Sartim
Universidade Federal do Espírito Santo

Esp. Raphael Colombo Baptista
ArcelorMittal Tubarão

Esp. Ricardo Caus Bernardo
ArcelorMittal Tubarão

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus familiares, amigos e namorada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo da minha vida, e não somente nestes anos como universitário, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Ao meu avô Dario, cujo caráter sempre foi inspiração para minha vida.

Agradeço a minha mãe Elisabeth, fonte de energia que sempre me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

Ao meu pai Anamir, que apesar de todas as dificuldades me fortaleceu e foi muito importante.

Minha irmã Bianca, que mesmo morando a 10500 km de distância, sempre incentivou e ajudou a nunca desistir.

Agradeço aos meus padrinhos, Helder e Rose, ao incentivo, apoio e estímulo para enfrentar as barreiras da vida.

À Janaína, pessoa com quem amo partilhar a vida. Com você tenho me sentido mais vivo de verdade. Obrigado pelo carinho, a paciência e por sua capacidade de me trazer paz em todos os momentos turbulentos.

À toda minha família, que em todos os momentos sempre acreditaram e investiram em mim.

Meus agradecimentos aos amigos, companheiros de trabalhos e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

Ao professor José Joaquim, pela orientação, apoio e confiança.

Agradeço a todos os professores por me proporcionarem o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que me deram a oportunidade de vislumbrar e alcançar um horizonte superior.

À todos que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.

RESUMO

Este trabalho visa aproveitar a repotenciação de uma central termelétrica de uma usina siderúrgica usando Planta Dual, de modo a buscar o melhor processo de dessalinização. A partir de um estudo de repotenciamento de uma central termelétrica, onde foi proposto a mudança de ciclo a vapor para ciclo combinado, será feito um modelamento com o objetivo de implementação de uma Planta Dual. Os processos de dessalinização são modelados com uso da energia térmica e elétrica disponível na caldeira regenerativa, para que se compare e avalie a eficiência dos processos de dessalinização por RO e híbrida. O processo RO irá aproveitar a energia produzida nas turbinas a vapor da caldeira regenerativa, transformando energia elétrica em água dessalinizada. Em contrapartida, nos processos de dessalinização híbrida, tem-se o uso da energia térmica do vapor, que seria da turbina de baixa pressão do sistema da caldeira regenerativa, produzindo água dessalinizada. A energia elétrica necessária para o processo de dessalinização com energia térmica será produzida pelas outras turbinas a vapor, sendo que, o restante da energia será convertido em água dessalinizada em processos de dessalinização por RO. Apesar do maior custo de implantação e uma menor produção de água dessalinizada, os processos híbridos possuem a vantagem do controle da quantidade de água dessalinizada e energia elétrica que é produzida no processo.

Palavras chave

Dessalinização. Cogeração. Planta Dual. Repotenciamento.

ABSTRACT

This work aims to take advantage of the repowering of a thermoelectric power plant of a steel company using a Dual plant in order to seek the best desalination process. Based on a study of repowering of a thermoelectric power plant, where it was proposed to change steam cycle to combined cycle, there will be a modeling for the purpose of implementing a dual plant. The desalination processes are modeled with use of thermal and electrical energy available in the regenerative boiler, in order to compare and evaluate the efficiency of the desalination process by reverse osmosis and hybrid. The Reverse Osmosis will harness the energy produced in the steam turbine regenerative boiler, transforming electricity into potable water. In contrast, in hybrid desalination processes, it has been the use of steam thermal energy would be of the low pressure turbine regenerative boiler system, producing potable water. The electrical energy required for the thermal energy process of desalination will be produced by other steam turbines, where the remaining energy will be converted into potable water in desalination processes by reverse osmosis. Despite the higher cost of deployment and lower production of potable water, the hybrid processes have the advantage of control the amount of potable water and electrical energy that is produced in the process.

Keywords

Desalination. Cogeneration. Dual Plant. Repowering

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de estresse hídrico ao redor do mundo

Figura 1.2 Usina de Ras Al-Khair

Figura 1.3 Resultados do indicador ieá para os anos de 2003 a 2007

Figura 1.4 Distribuição da água no mundo

Figura 1.5 Consumo de litros de água per capita pelo Mundo

Figura 2.1 Fluxos Básicos de Processo de Dessalinização

Figura 2.2 Sistema de Produção Integrado

Figura 2.3 Consumo específico de energia vs Distância da costa.

Figura 2.4 Classificação das tecnologias de dessalinização

Figura 2.5 Modelo da membrana de sistema de osmose reversa

Figura 2.6 Diagrama esquemático de dessalinização MED

Figura 2.7 Dessalinização MED com Termocompressão a vapor

Figura 2.8 Dessalinização MED com MVC

Figura 2.9 Dessalinização MED com AHP

Figura 2.10 Diagrama esquemático de dessalinização MSF

Figura 2.11 Dessalinização MSF passe único (OT)

Figura 2.12 Dessalinização MSF com Recirculação da Salmoura (BR)

Figura 3.1 Cogeração com Turbina a Vapor de Condensação e Extração

Figura 3.2 Cogeração com Turbina a Vapor de Contrapressão

Figura 3.3 Cogeração com Motor Alternativo de Combustão Interna aproveitando somente os Gases de Exaustão do Motor

Figura 3.4 Cogeração com Motor Alternativo de Combustão Interna aproveitando os Gases de Exaustão e o Calor da Água de Resfriamento

Figura 3.5 Cogeração com Turbina a Gás

Figura 3.6 Cogeração com Ciclo Combinado de Turbina a Gás e Turbina a Vapor de Contrapressão.

Figura 3.7 Cogeração com Ciclo Combinado de Turbina a Gás e Turbina a Vapor de Condensação e Extração

Figura 3.8 Fluxos Básicos de uma Planta Dual usando Sistema Híbrido

Figura 3.9 Sistema híbrido de dessalinização RO combinado com MSF

Figura 4.1 Ciclo Combinado – Caldeira de Recuperação 1 nível de pressão

Figura 4.2 Ciclo Combinado – Caldeira de Recuperação 2 níveis de pressão

Figura 4.3 Ciclo Combinado – Caldeira de Recuperação 3 níveis de pressão

Figura 4.4 Caldeira regenerativa com três níveis de pressão com mudanças para o processo de dessalinização híbrida

Figura 4.5 Comparação da relação de desempenho dos dessalinizadores

Figura 4.6 Comparação consumo específico de energia dos dessalinizadores

Figura 5.1 Comparação de dessalinizadores RO

Figura 5.2 Comparação de dessalinizadores MSF

Figura 5.3 Relação de desempenho dos dessalinizadores MED

Figura 5.4 Consumo Específico Elétrico dos dessalinizadores MED

Figura 5.5 Consumo Específico Térmico dos dessalinizadores MED

Figura 5.6 Comparação dos dessalinizadores MED

Figura 5.7 Comparação dos melhores dessalinizadores

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Classificação e Salinidade das Águas

Tabela 4.1 Características dos modelos utilizando-se gás natural e GAF

Tabela 4.2 Dados termodinâmicos da caldeira de recuperação com três níveis de pressão

Tabela 4.3 Comparação entre os diferentes parâmetros dos três sistemas de caldeira de recuperação simulados

Tabela 4.4 Comparação de processos de dessalinização RO de Jeddah (Mar Vermelho) e Ras Al-kair (Golfo)

Tabela 4.5 Salinidade Média de Águas Marinhas

Tabela 4.6 Dados da caldeira regenerativa com três níveis de pressão

Tabela 4.7 Distribuição energética do sistema de potência

Tabela 4.8 Comparação de unidade dessalinizadoras RO

Tabela 4.9 Comparação de unidades dessalinizadoras híbridas

Tabela 4.10 Modelos de unidades dessalinizadoras MED estudado por Santos (2005)

Tabela 5.1 Produção de água dos dessalinizadores MED

LISTA DE SIGLAS

AHP	Bomba de Calor por Absorção
B	Bomba
C	Condensador
CCC	Cogeração com Ciclo Combinado
CCCTG	Ciclo Combinado de Turbina a Gás
CMACI	Cogeração com Motor Alternativo de Combustão Interna
CR	Caldeira de Recuperação
CT	Tubos cruzados
CTG	Cogeração com Turbina a Gás
D	Desaerador
DAF	Flutuação do ar dissolvido
DC	Dissipador de Calor
DMF	Filtragem de mídia dupla
ED	Eletrodiálise
GAF	Gás de Alto Forno
GE	Gerador Elétrico
GV	Gerador de Vapor
HF	Membranas hollowfibre
IE	Intercâmbio Iônico
MACI	Motor Alternativo de Combustão Interna
MED	Destilação a Múltiplos Efeitos
MED-TVC	Destilação a Múltiplos Efeitos com terrmocompressor de vapor
MED2400	Unidade Dessalinizadora MED-TVC produzindo 2400 m ³ por dia
MED450	Unidade Dessalinizadora MED-TVC produzindo 450 m ³ por dia
MSF	Evaporação Multietapa por efeito Flash

MSF-BR	Evaporação Multietapa por efeito Flash com Recirculação de Salmoura
MSF-OT	Evaporação Multietapa por efeito Flash com passe único
MVC	Compressão Mecânica do Vapor
PCI	Poder Calorífico Inferior
PPM	Partes por milhão
PR	Relação de desempenho
RO	Osmose Reversa
SD	Destilação Solar
SED	Evaporação de efeito único
SPC	Consumo específico de energia
SW	Membranas spiralwound
SWRO	Osmose Reversa para Água do Mar
TDS	Total de sais dissolvidos na água
TG	Turbina a Gás
TV	Turbina a Vapor
TVC	Termocompressão de Vapor
TVCE	Turbina a Vapor de Condensação e Extração
TVCP	Turbina a Vapor de Contrapressão
UDT	Unidade de Dessalinização Térmica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÕES	19
1.1.2	Necessidade de Dessalinização	21
1.1.2	Dessalinização na Siderurgia	24
1.2	OBJETIVOS E ALCANCES DO TRABALHO.....	26
1.2.1	Objetivo Geral.....	26
1.2.2	Objetivo Específico	27
1.3	ESTRUTURA.....	27
2	DESSALINIZAÇÃO	29
2.1	HISTÓRIA.....	29
2.2	DEFINIÇÕES.....	30
2.3	TECNOLOGIAS.....	33
2.3.1	Intercâmbio Iônico	34
2.3.2	Eletrodiálise	35
2.3.3	Congelamento	35
2.3.4	Osmose Reversa.....	36
2.3.5	Destilação.....	39
2.3.5.1	Destilação a Múltiplos Efeitos (MED).....	39
2.3.5.2	Evaporação Multietapa por efeito Flash (MSF)	44
3	PLANTAS DUAIS: COGERAÇÃO E DESSALINIZAÇÃO	49
3.1	INTRODUÇÃO.....	49
3.2	SISTEMAS DE COGERAÇÃO.....	50
3.2.1	Cogeração com Turbina a Vapor.....	51
3.2.2	Cogeração com Motor Alternativo de Combustão Interna	53
3.2.3	Cogeração com Turbina a Gás.....	55
3.2.4	Cogeração com Ciclo Combinado	57
3.3	SISTEMAS HÍBRIDOS.....	59
3.4	CONSIDERAÇÕES GERAIS	62
4	ESTUDO DE CASO	63
4.1	DESCRIÇÃO DO REPOTENCIAMENTO	63
4.2	INTEGRAÇÃO DA GERAÇÃO COM A DESSALINIZAÇÃO.....	71

4.2.1	Dessalinização com Energia Elétrica.....	72
4.2.2	Dessalinização Híbrida	76
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
5.1	DESSALINIZAÇÃO COM OSMOSE REVERSA.....	83
5.2	DESSALINIZAÇÃO HÍBRIDA	84
5.2.1	Dessalinizadores MSF	85
5.2.2	Dessalinizadores MED	86
5.3	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	90
6	CONCLUSÃO.....	92
6.1	CONCLUSÕES FINAIS	92
6.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	94
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

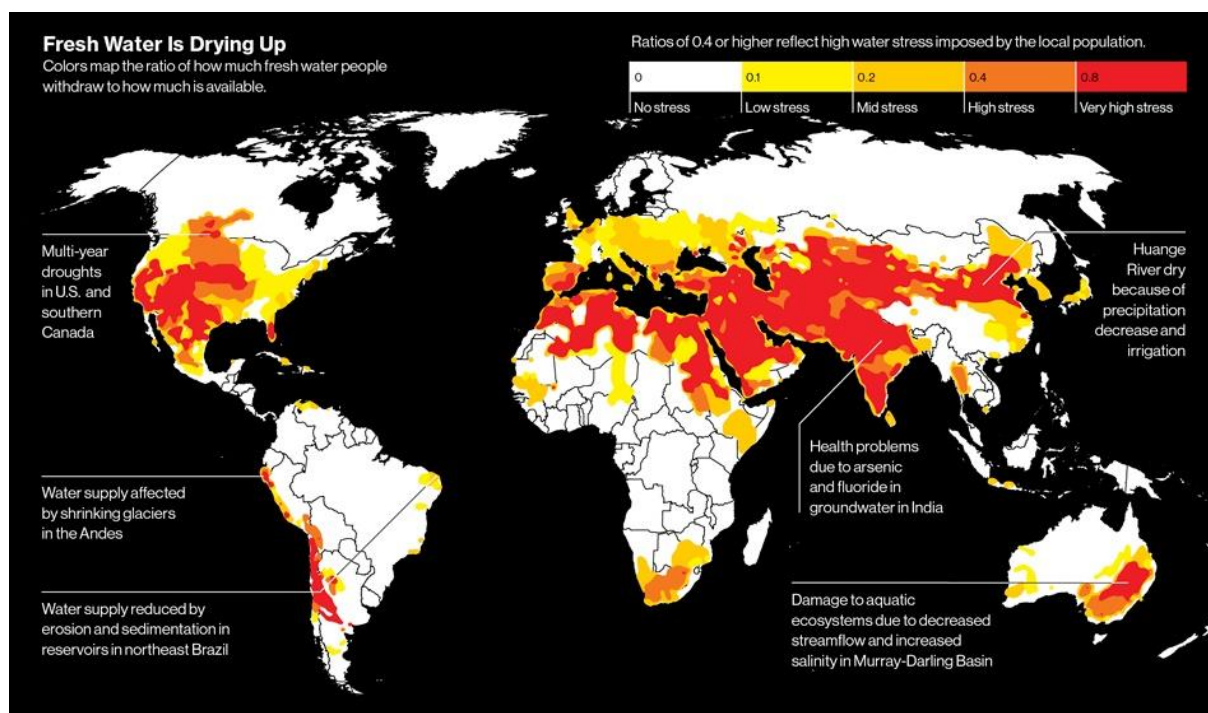
1 INTRODUÇÃO

O processo de dessalinização se faz necessário desde o século XIX, devido a escassez dos recursos hídricos. Nessa época começaram a surgir projetos de dessalinização a fim de encontrar formas alternativas de obtenção de água potável. Segundo VICTER (2015), existem atualmente cerca de 18 mil plantas de dessalinização no planeta, o Oriente Médio se destaca por representar 60% do mercado devido a disponibilidade hídrica reduzida na região.

Várias regiões sofrem com a falta de água potável devido diversos fatores: elevado consumo de recursos hídricos, acúmulo de momentos de seca, poluentes que alteram e afetam as propriedades da água, erosão e sedimentação. PENA (2016) no site 'Mundo Educação' utiliza o termo "estresse hídrico" para fazer referência à situação em que o consumo de água em uma determinada localidade é superior à capacidade de renovação, ocasionando a escassez do recurso hídrico. Assim, é necessário a importação de recursos e adoção de políticas de redução do consumo de água. Na figura 1.1 tem-se o mapa de estresse hídrico ao redor do mundo.

Analisando a figura 1.1 pode-se observar que a Índia é uma área de grande estresse hídrico. Isso ocorre devido a presença de arsênio e fluoretos nos lençóis freáticos que influenciam na qualidade da água e consequentemente na saúde da população que consome essa água. No Brasil, mais especificamente no Nordeste, o estresse hídrico é resultado da sedimentação e erosão dos reservatórios. Em suma, as regiões ao norte da África e parte da Ásia, classificadas como alto estresse hídrico, são as regiões onde há maior necessidade de obtenção de água potável.

Figura 1.1 Mapa de estresse hídrico ao redor do mundo



Fonte: <https://www.technologyreview.com/s/534996/megascale-desalination/>

De acordo com o site WATER TECHNOLOGY, a fim de reduzir os problemas hídricos em regiões como Riad, Arábia Saudita, local onde a população está crescendo rapidamente, está sendo ampliada a usina de dessalinização Ras Al-Khair que se tornará a maior do mundo. Com capacidade para produzir 1 bilhão de litros por dia, Ras Al-Khair poderá ser maior que a usina dessalinizadora localizada em Tel Aviv - Israel, que é, até então, a maior usina do planeta, com capacidade de produção de 624 milhões de litros diários de água potável. Além disso, o projeto de Ras Al-Khair possui vinculado à dessalinização uma usina de energia elétrica com capacidade para produzir até 2,4 milhões de watts de eletricidade.

Na figura 1.2 tem-se uma foto da grandiosidade do projeto Ras Al-Khair, que possui 8 dessalinizadores de multietapas flash e 17 dessalinizadores de osmose reversa. Esses processos citados serão discutidos no capítulo 2 deste trabalho.

Figura 1.2 Usina de Ras Al-Khair



Fonte: Water Technology

Na América Latina, Brasil e México são líderes em utilização de plantas de dessalinização, em especial, para pequenos usos industriais, como é o caso da indústria do petróleo, que geralmente possui unidades de dessalinização para a obtenção de água dessalinizada em suas plataformas.

A dessalinização da água do mar no Brasil, não é algo inovador, há no país 186 plantas. A Petrobrás é o maior exemplo, possuindo algumas pequenas plantas de dessalinização que são utilizadas como subsistemas em plataformas de petróleo da Bacia de Campos. Segundo VICTER (2015), empresas como a Petrobrás utilizam essas pequenas plantas de dessalinização devido ao fato de ser mais vantajoso a implantação dessas plantas para a obtenção de água dessalinizada que o custo logístico do transporte da água.

Ainda sobre a dessalinização no Brasil, a planta de dessalinização de maior destaque no país com enfoque no consumo humano encontra-se em Fernando de Noronha, com uma produção de água da ordem de 2,6 milhões litros por dia.

Por fim, para melhor entendimento deste trabalho, é preciso esclarecer a diferença entre água dessalinizada e água potável. Água dessalinizada é o resultado do processo de dessalinização, porém, essa água ainda não está própria para o

consumo humano. Para tornar-se potável, a água dessalinizada precisa passar por processos de filtração e fluoretação.

1.1 MOTIVAÇÕES

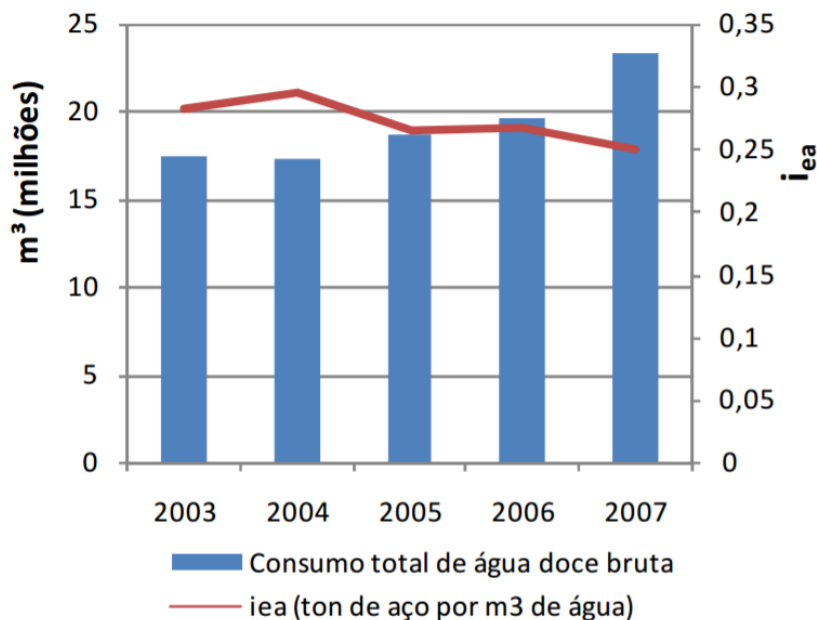
A dessalinização térmica se estabelece em locais onde grande capacidade de água dessalinizada é necessária. Contudo, nos últimos anos, os sistemas de dessalinização com energia elétrica, conseguiu conquistar uma maior fatia do mercado mundial de dessalinização, principalmente devido a progressos realizados nas tecnologias de recuperação de membranas e de energia.

Projetistas e engenheiros buscam maneiras de combinar os benefícios da dessalinização com energia elétrica somando-se aos benefícios da dessalinização com energia térmica otimizando-as de maneira a reduzir o custo da dessalinização, processo conhecido como “dessalinização híbrida”.

De acordo com o Instituto Aço Brasil, o mercado da siderurgia possui um saldo comercial anual de US\$ 2,7 bilhões, produção de 33,9 milhões de toneladas de aço bruto por ano e 31,9 milhões de toneladas de produtos siderúrgicos produzidos por ano. Associado a esses resultados tem-se 122.139 trabalhadores envolvidos neste processo. Dados que comprovam a grandeza do mercado de siderurgia no Brasil.

A figura 1.3 mostra os resultados do indicador que estima a ecoeficiência relativa ao consumo de água (iea) pela siderúrgica estudada por PEDRINI (2008) para os anos de 2003 a 2007. Tradicionalmente, o setor siderúrgico é um grande consumidor de recursos hídricos, pois é necessário água para o resfriamento da maioria dos equipamentos, o que causa grandes perdas de água por evaporação.

Figura 1.3 Resultados do indicador iea para os anos de 2003 a 2007



Fonte: Pedrini (2008)

A maioria das plantas de geração de energia elétrica na indústria de siderurgia utiliza sistemas em que o combustível passa por um processo de combustão, para que a energia térmica produzida seja utilizada para aquecer a água contida na caldeira. O vapor resultante da água aquecida é então transferido às turbinas movidas a vapor e, dessa forma, é produzida a eletricidade. Essa forma de geração de energia é antiga e tem baixa eficiência, porém bastante utilizada devido a simplicidade do projeto, custo e operação. SILVA (2004). Para suprir a baixa eficiência da geração de energia elétrica a vapor surgiu o sistema de ciclo combinado.

No ciclo combinado o combustível é incinerado em uma câmara de combustão, os gases da combustão passam por uma turbina a gás, que produz eletricidade. Os gases da exaustão das turbinas saem a uma temperatura elevada, o que permite que a energia térmica do gás seja usada em caldeiras regenerativas, onde esses gases de exaustão são usados para produção de vapor, afim de que possa ser usado em turbinas a vapor para geração de energia elétrica. SILVA (2004).

A Planta Dual é um processo de transformação da energia térmica de um combustível em mais de uma forma de energia útil: energia mecânica e térmica. Este

processo surgiu com o desafio de suprir as demandas energéticas e hídricas dos processos nas indústrias. A energia elétrica excedente ou uma parte da energia térmica produzida no processo de geração da planta dual é aproveitada diretamente nos processos de dessalinização para obtenção de água dessalinizada. Sendo assim, as indústrias do setor ganham a possibilidade de diminuir o consumo de água de fontes externas, podendo se tornar autossustentável. SANTOS (2005).

Observando a disponibilidade de recursos energéticos decorrentes dos processos da siderurgia, a oportunidade de investimentos e desenvolvimento tecnológico com o objetivo de modernizar o sistema produtivo e assim aumentar a eficiência energética do processo. Além do impacto direto produzido por essas possíveis mudanças, outra vantagem é o aumento da capacidade hídrica disponível para a sociedade, pois as grandes fontes consumidoras de recursos hídricos e elétricos podem diminuir ou até deixarem de usufruir esses recursos.

1.1.2 Necessidade de Dessalinização

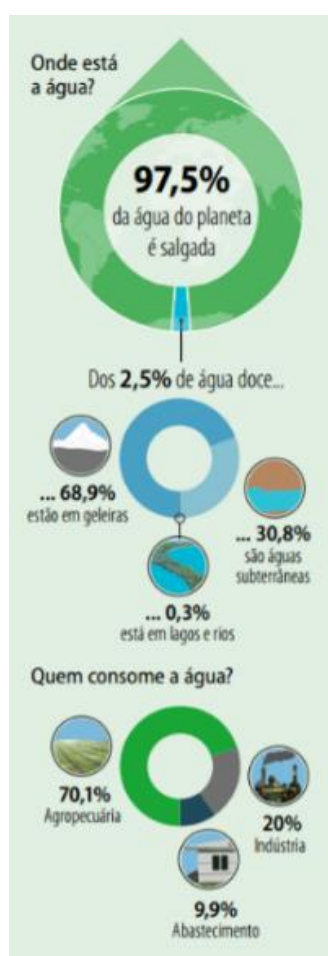
Ao longo do desenvolvimento da sociedade capitalista aumentou-se a necessidade por bens de consumo com o objetivo de satisfação pessoal, em detrimento da natureza e dos recursos naturais, principalmente a água. Por isso, vive-se uma época de esgotabilidade dos recursos naturais em resposta à cultura de consumo elevado. Estudos feitos pela UNESCO apontam que 1,2 bilhão de pessoas continuam sem acesso à água potável, e 2,4 bilhões não dispõem de serviços de purificação de água. Além disso, segundo o Conselho Mundial da Água, 6 mil crianças morrem por dia porque não têm acesso à água potável e 4 milhões de pessoas morrem por ano de doenças relacionadas com a água. SANTOS (2005).

Analísado a Figura 1.4, que pode ser vista na revista Em Discussão! (ano 5, n. 3; 2014) do Senado Federal Brasileiro, 97,50% da disponibilidade mundial da água, está disposta em oceanos, ou seja, água imprópria para o consumo humano. Essa água só pode ser usada para consumo humano após algum processo de dessalinização. Segundo a mesma fonte, dos 2,5% de água doce, 68,9% encontram-

se em regiões polares e 30,8% em regiões subterrâneas (aquíferos), o que dificulta seu aproveitamento. Assim, apenas 0,3% da água mundial disponível, que está em rios, lagos e pântanos pode ser usada para o consumo humano.

O uso destes 0,3% de água potável está dividido em agricultura, indústria e uso pessoal, porém o uso pessoal representa apenas 9,9%.

Figura 1.4 Distribuição da água no mundo

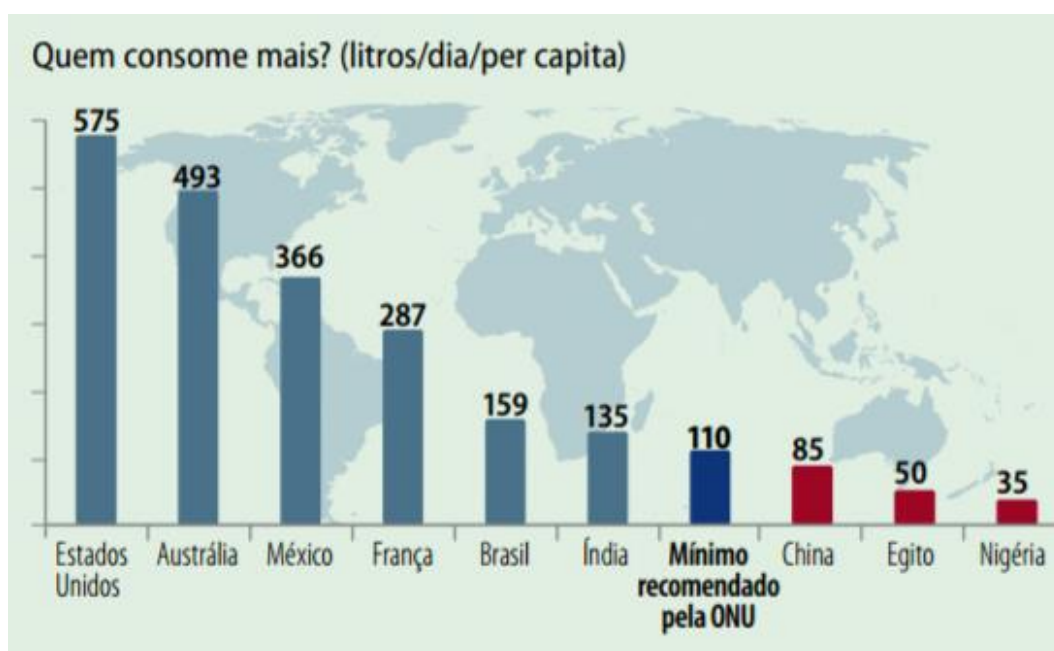


Fonte: Em Discussão! (2014)

Na figura 1.5 nota-se que os Estados Unidos (EUA), nação conhecida por seu consumismo elevado também é a nação com o maior índice do mundo de consumo de litros de água per capita por dia, consumindo o equivalente a 575 litros/dia por pessoa. Isso corrobora a colocação de que a esgotabilidade dos recursos naturais

vivida atualmente é resposta à cultura de consumo elevado. O Brasil encontra-se em quinto lugar nesse ranking, com o consumo de 159 litros/dia por pessoa, apesar de ter um consumo per capita consideravelmente inferior aos EUA, está acima do mínimo recomendado pela ONU: 110 litros/dia por pessoa.

Figura 1.5 Consumo de litros de água per capita pelo Mundo



Fonte: Em Discussão! (2014)

Segundo a publicação de BELTON (2015) no BBC News, mais de dois quintos (2/5) da população do continente africano, que tem 800 milhões de pessoas, vivem em regiões de “estresse hídrico”, o que significa viver com o fornecimento de menos de 110 metros cúbicos de água por pessoa por dia. A ONU prevê que, em 10 anos, quase 2 bilhões de pessoas viverão em regiões com escassez de água, vivendo com menos de mil metros cúbicos de água. Nessas regiões pequenas unidades de dessalinização são suficientes, de forma que possa abastecer de 100 a 200 pessoas por unidade. A dessalinização com energia solar é uma solução em potencial para este caso.

A revista Em Discussão! (ano 5, n. 3; 2014) do Senado Federal Brasileiro, discute sobre Israel, o líder mundial em reutilização de água com investimento em

dessalinização de aproximadamente US\$ 3,5 bilhões por ano, com 39 unidades em funcionamento. Atualmente em Israel, mais da metade da água potável consumida vem do mar (600 bilhões de litros por ano) e o país tem como meta chegar a 100%.

O supervisor da construção do projeto Ras al-Khair, Floris van Straaten, que trabalha na empresa de engenharia suíça Pöyry, disse em entrevista à BBC News que é preciso garantir que a salmoura, água com salinidade elevada que sai do processo, seja deslocada para um local suficientemente longe do mar para que não haja recirculação dessa água, pois caso isso ocorra, ela voltará ainda mais salgada. Apesar da necessidade de obtenção de água potável, é necessário um estudo do impacto ambiental desse processo.

1.1.2 Dessalinização na Siderurgia

O processo produtivo das usinas siderúrgicas gera resíduos energéticos, como o gás de aciaria, de alto forno e de coqueria que são produzidos no decorrer do processo. Esses gases não podem ser lançados na atmosfera sem passar por algum tratamento químico ou processo de combustão, logo se pode aproveitar o poder calorífico desses gases, sendo então convertidos em energia elétrica e potência de eixo através de plantas de potência a vapor convencionais, que geralmente possuem rendimentos relativamente baixos.

Recentemente, pesquisas e inovações tecnológicas neste setor, têm trazido soluções para um melhor aproveitamento dos gases siderúrgicos e também dos rejeitos térmicos de médias e baixas temperaturas.

Através de uma análise termoeconômica, pode-se ver que a partir da repotenciação por meio de ciclo combinado em substituição a uma das unidades da termelétrica a vapor de uma usina siderúrgica, permite produzir até 70 % a mais de potência com o mesmo consumo de gases combustíveis. Com esse aumento de eficiência, pode-se aproveitar a energia disponível em processos auxiliares ou até mesmo a venda do excedente de energia elétrica. SILVA (2004).

Muitos estudos a respeito da tecnologia de ciclos Rankine orgânicos (ORC), ciclos estes que recuperam calor e produzem eletricidade a partir de calor residual, foi concluído nas últimas décadas, porém somente nos últimos anos que as indústrias começaram a se interessar na sua aplicação prática. Esse interesse se deve a diversos fatores como: os desenvolvimentos das tecnologias ORC, aumento do preço da energia, legislação ambiental restrita e políticas de eficiência energética, tal como consta na European “20-20-20” Climate and Energy, que define, entre outras coisas, metas de consumo primário de energia e redução de gases de efeito estufa. CAMPANA, et al. (2013).

As tecnologias de dessalinização conseguem obter água doce ou potável (com salinidade inferior a 100 ppm), a partir da água do mar (cerca de 36000 ppm no oceano atlântico), ou a partir de águas salobras (salinidade entre 500 e 5000 ppm), porém o maior problema dos processos de dessalinização é sua grande demanda de energética. UCHE, et al. (2002).

De um lado água e energia são indispensáveis para o setor siderúrgico. Por outro lado, na maioria das usinas de dessalinização a produção de água dessalinizada é realizada em conjunto com a geração de energia elétrica. Dessa forma tem-se no processo de dessalinização uma saída para o problema de recursos hídricos.

A avaliação das tecnologias para a produção combinada de eletricidade e água dessalinizada mostrou que a dessalinização usando processos térmicos nas chamadas plantas duais, que combinam a cogeração com a dessalinização, pode ser realizada e acoplada a qualquer uma das tecnologias usadas nas centrais termelétrica. Além disso, em seu estudo é comprovado que a melhor forma de produção combinada de eletricidade e água dessalinizada é a cogeração com dessalinização híbrida (elétrica e térmica), pois neste processo tem-se o controle da quantidade de energia e água que serão produzidos. SANTOS (2005).

As plantas duais híbridas além de serem mais eficientes, atendem facilmente a variação da demanda de eletricidade e água dessalinizada, uma vez que nos períodos de baixa demanda elétrica pode-se produzir mais água dessalinizada através do processo de dessalinização com eletricidade, para assim guardar em reservatórios, evitando a operação a carga parcial do sistema de geração de potência, que

termicamente é inviável por reduzir drasticamente a eficiência do sistema de geração de energia.

Além da cogeração em plantas duais, a dessalinização pode ser viabilizada usando resíduos térmicos de outros processos industriais, através de processos de dessalinização com energia térmica ou gerar potência elétrica através dos Ciclos Rankine Orgânico – ORCs, para assim usar essa eletricidade em processos de dessalinização que usem as tecnologias elétricas. CAMPANA, et al. (2013).

1.2 OBJETIVOS E ALCANCES DO TRABALHO

O setor siderúrgico é um grande consumidor de recursos hídricos. Porém, vive-se uma época de esgotabilidade de recursos naturais, dessa forma, é preciso encontrar meios que possa suprir as demandas energéticas e hídricas dos processos industriais sem comprometer o abastecimento da população.

A dessalinização surge como uma saída de baixo impacto ambiental e que oferece a possibilidade da indústria se tornar autossustentável. Ao longo deste trabalho modelagens são desenvolvidas a fim de tornar possível para a indústria siderúrgica a possibilidade de resolução dos problemas energéticos e hídricos por meio da dessalinização.

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar os diversos processos de dessalinização desenvolvidos ao redor do mundo e estudar os principais processos existentes, usando processos químicos (Intercâmbio iônico), com membranas (Eletrodialise e Osmose Reversa) ou térmicos (Congelamento e Destilação).

Porém, para compreender como esses processos de dessalinização são aplicados no setor siderúrgico, no decorrer deste trabalho procura-se esclarecer e discutir sobre Planta Dual, ou seja, um processo onde a energia elétrica excedente ou

uma parcela da energia térmica produzida no processo de geração é aproveitada diretamente nos processos de dessalinização para obtenção de água dessalinizada.

1.2.2 Objetivo Específico

Em 2004, Marcelo Modesto Silva propôs em seu trabalho a repotenciação de uma central termelétrica a vapor de uma usina siderúrgica. O objetivo principal deste trabalho é, a partir dos resultados obtidos por Silva, aproveitar a energia térmica e elétrica disponível no sistema reponteciado para a implantação de um sistema de planta dual.

1.3 ESTRUTURA

Além do capítulo de Introdução, tem-se 7 capítulos onde é desenvolvido o conteúdo.

CAPÍTULO 2: abordagem da *Dessalinização*, apresenta de forma detalhada a história, definições e os aspectos tecnológicos, com ênfase nos conceitos e definições.

CAPÍTULO 3: apresentação das *Plantas Duais: Cogeração E Dessalinização*, descreve as tecnologias dos sistemas de cogeração e sistemas híbridos aplicadas às plantas duais e as suas respectivas características físicas e energéticas.

CAPÍTULO 4: *Estudo de Caso*, onde o repotenciamento de SILVA (2004) é adaptado para uma Planta Dual, afim de que seja produzido água dessalinizada através de processos com energia elétrica ou híbrida, esse último utiliza-se da combinação de processos de dessalinização que usam energia elétrica e térmica.

CAPÍTULO 5: *Resultados e Discussões*, pode-se discutir os resultados obtidos neste trabalho, avaliando as principais tecnologias de produção de água dessalinizada, visando encontrar a opção que apresenta o melhor desempenho.

CAPÍTULO 6: *Conclusão*, contém o desenvolvimento do presente estudo com uma análise aprofundada e apuração dos resultados obtidos.

CAPÍTULO 7: *Referências Bibliográficas* das mais diversas fontes usadas neste trabalho.

2 DESSALINIZAÇÃO

Com o objetivo de evitar a falta de água potável, tem-se o processo de dessalinização da água, um conjunto de métodos para retirar a maior parte dos sais minerais de águas salgadas ou salobras a fim de torná-las doces ou potáveis.

2.1 HISTÓRIA

A dessalinização teve seus princípios definidos na Grécia antiga, onde pesquisadores buscavam métodos para aproveitar a água contida nos oceanos, descobriram formas e métodos para fazer a separação do sal e da água. SANTOS (2005).

No século XIX, por volta do ano de 1840, como fruto de uma série de tentativas para melhorar o processo de evaporação do caldo da cana de açúcar, surgiu o primeiro destilador a múltiplos efeitos (MED), porém o primeiro evaporador que visava aproveitar a energia do vapor residual de saída de caldeiras dos barcos foi inventado apenas em 1884. No final do século, indústrias que queriam maior eficiência nos processos de evaporação, inventaram uma bomba que evaporava parcialmente um líquido, assim foi criado o primeiro evaporador por compressão mecânica do vapor (MVC). SANTOS (2005).

No início do século XX, ocorreu a invenção dos ejetores e como consequência a termocompressão de vapor (TVC), com isso houve um aumento da eficiência das tecnologias de evaporação, assim como a combinação da dessalinização com as plantas de potência. A crescente demanda de água dessalinizada, principalmente no Oriente Médio, aumentou a necessidade de unidades de dessalinização com maiores capacidades de produção, o que levou pesquisadores na Escócia e nos Estados Unidos a desenvolverem os evaporadores multietapa por efeito flash (MSF). SANTOS (2005).

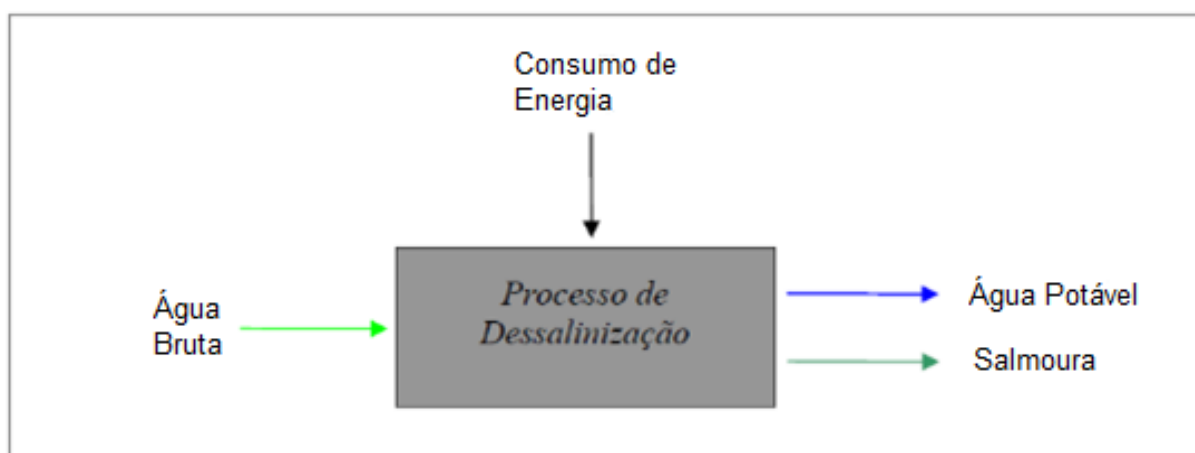
Os Estados Unidos foram os precursores em experiências com membranas, por volta de 1953, porém o processo Osmose Reversa (RO) com aplicação de dessalinização da água do mar só começou após 1980. UCHE, et al. (2002).

2.2 DEFINIÇÕES

A dessalinização é um tratamento físico-químico usado a partir da água salgada ou água salobra e tem por finalidade retirar o excesso de sais minerais, micro-organismos e outras partículas sólidas presentes na água, a fim de obter água potável. SANTOS (2005).

A água salgada ou salobra aqui é chamada de água bruta. Esta água bruta passa pelo processo de dessalinização, que elimina ou diminui a salinidade tornando-a própria para o consumo. A água dessalinizada é conhecida como água potável quando atende os requisitos para o consumo humano. No processo de dessalinização, o sal não é obtido como subproduto, sendo assim, extraído no fluxo de salmoura (rejeito). A Figura 2.1 mostra os principais fluxos do processo.

Figura 2.1 Fluxos Básicos de Processo de Dessalinização



Fonte: Santos (2005).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

Pode-se observar que a água bruta que passa pelo processo de dessalinização, uma parte é extraída em forma de água potável e a outra na forma de salmoura, que é devolvida à natureza. Esta salmoura é uma água com maior concentração de sal que a água bruta, considerada um resíduo ou rejeição do processo. A maior questão em relação à salmoura é o descarte ou a possibilidade de

aproveitamento. Medidas devem ser tomadas de forma a minimizar o impacto ambiental da salmoura, visto que, a alta concentração de sais que podem levar a mudanças drásticas no ecossistema. CHANG (2015).

Na figura 2.2 pode-se observar um sistema que utiliza os efluentes da dessalinização de águas subterrâneas salobras ou salinas em uma combinação de ações integradas de forma sustentável. Este sistema mostra uma opção para reutilização dos resíduos da dessalinização, utilizando a salmoura na piscicultura, agricultura e pecuária.

Figura 2.2 Sistema de Produção Integrado



Fonte: <http://www.capitalteresina.com.br/media/uploads/2014/08/27/11.jpg>

A água bruta é classificada como salobra, salina ou marinha, dependendo do valor da salinidade, a qual é dada pelo total de sais dissolvidos na água (TDS) em partes por milhão (ppm). No processo de dessalinização a salinidade da água bruta, o processo mais adequado é escolhido de acordo com a pureza da água dessalinizada. SANTOS (2005).

Tabela 2.1 Classificação e Salinidade das Águas

Água	Salinidade (ppm)
Ultrapura	0,03
Pura (caldeira)	0,3
Deionizada	3
Doce (potável)	< 1.000
Salobra	1.000 - 10.000
Salina	10.000 - 30.000
Marinha	30.000 - 50.000
Salmoura	> 50.000

Fonte: Uche et al. (2002).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

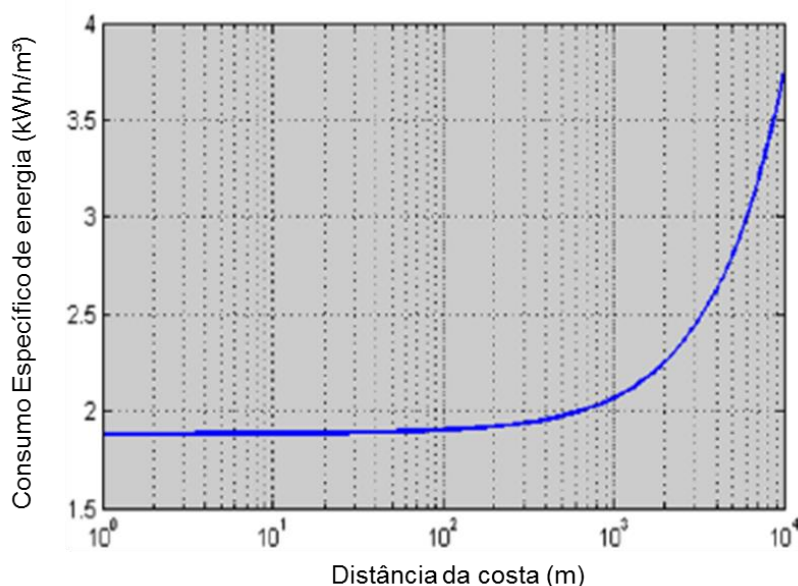
A água com finalidade de ser usada para o consumo humano e que pode ser ingerida sem risco à saúde, tem como limite máximo 1.000 ppm. Para fins industriais, a quantidade de sais dissolvidos na água irá depender do processo, variando de água salobra até água ultrapura, como é o caso do fluido de trabalho ou de resfriamento de plantas de potência, que operam com água com salinidade próxima de 0,3 ppm. SANTOS (2005).

A legislação brasileira é mais exigente quando se refere ao limite máximo de salinidade para a água potável. Segundo o Art. 2º da Resolução no 357 do CONAMA de 17 de março de 2005, a água deve ser classificada em três categorias segundo a sua salinidade: doce (águas com salinidade igual ou inferior a 0,5 ‰), salobra (águas com salinidade superior a 0,5 ‰ e inferior a 30 ‰) e salina (águas com salinidade igual ou superior a 30 ‰).

Outro fator importante em relação ao processo de dessalinização é o alto consumo energético. O processo pode ser totalmente na forma de eletricidade ou predominantemente na forma de calor, neste caso, inclui-se o consumo elétrico secundário para o bombeamento e para os equipamentos auxiliares.

Objetivando reduzir os custos energéticos nos processos de dessalinização, é importante que seja feita uma análise acerca da distância da costa ao local que ocorre o processo de fato. Para comprovar essa afirmação, a figura 2.3 demonstra uma relação do consumo específico de energia com a distância da costa, dessa forma escolher o local adequado para dessalinização tem impacto direto na redução dos custos energéticos. DASHTPOUR (2012).

Figura 2.3 Consumo específico de energia vs Distância da costa.



Fonte Dashtpour (2012).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

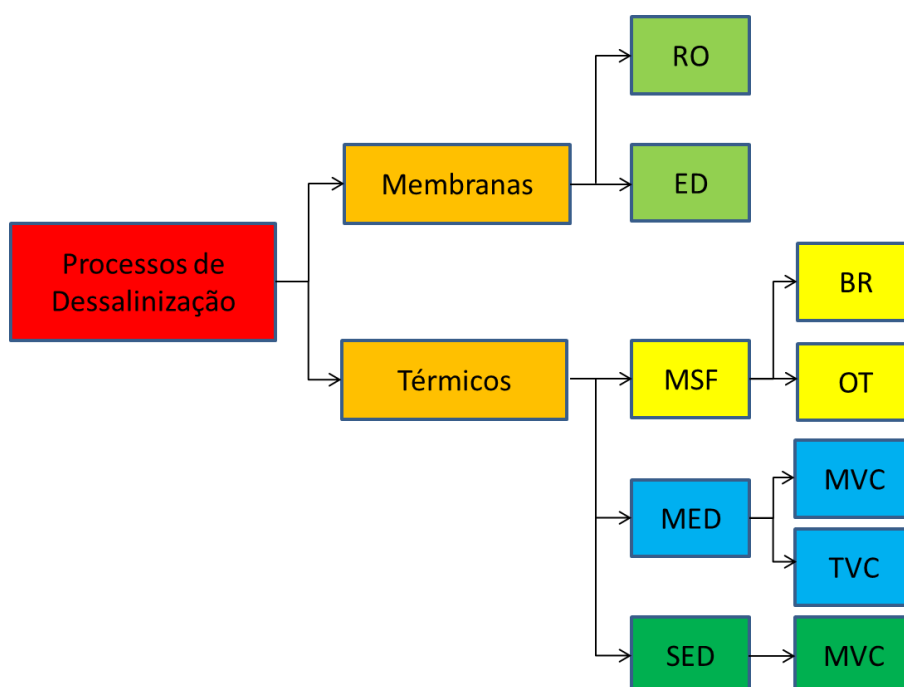
2.3 TECNOLOGIAS

Existem vários princípios para remover o sal da água, porém apenas alguns destes processos utilizam técnicas que os tornam economicamente viáveis a ponto de serem usados em grande escala. A água potável pode ser obtida a partir da água salgada, usando processos químicos (Intercâmbio iônico), com membranas (Eletrodialise e RO) ou térmicos (Congelamento e Destilação). Porém apenas os processos de RO e destilação são realmente expressivos no mercado internacional

de dessalinização em grande escala, tanto em termos de capacidades como unidades instaladas no mundo. SANTOS (2005).

Na figura 2.4 está esquematizado os processos de dessalinização com membranas, que se dividem em Osmose Reversa (RO) e Eletrodiálise (ED), e os processos térmicos, que se dividem em Multietapa Por Efeito Flash (MSF), Destilação a Múltiplos Efeitos(MED) e Evaporação de efeito único (SED).

Figura 2.4 Classificação das tecnologias de dessalinização



Fonte: Al-Fulaij (2011).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

2.3.1 Intercâmbio Iônico

O Intercâmbio Iônico é um processo químico, usado na desmineralização e deionização de águas salobras e residuais, bem como no tratamento de águas para uso industrial que exigem salinidades baixíssimas.

Este processo usa resinas de intercâmbio, que são substâncias insolúveis com radicais ácidos ou básicos na sua estrutura molecular e têm a propriedade de trocar íons com os sais dissolvidos, quando se entram em contato. Existem dois tipos de resinas: as aniônicas (que substituem ânions da água por íons OH^- - permutação básica) e as catiônicas (que substituem cátions por íons H^+ - permutação ácida). As resinas que podem ser do tipo gel ou do tipo macroporos, normalmente necessitam de regeneração com agentes químicos para substituir os íons originais e os fixados nas mesmas. SANTOS (2005).

2.3.2 Eletrodiálise

É um processo que permite a desmineralização de águas salobras fazendo com que íons de sinais diferentes se movam para regiões diferentes graças a um campo elétrico criado com uma diferença de potencial aplicada sobre os eletrodos. A dessalinização ou desmineralização propriamente dita é assegurada por uma alternância de membranas catiônicas (permeáveis aos cátions) e de membranas aniônicas (permeáveis aos ânions). Essas membranas seletivas separam os compartimentos de formação da água dessalinizada dos compartimentos que recebem o sal extraído para formar a salmoura. SANTOS (2005).

É importante destacar que, ao contrário da dessalinização RO, no processo de Eletrodiálise a água dessalinizada escoa pelas membranas e não através delas, dessa forma existe dois fluxos: um de água dessalinizada e outro de salmoura.

2.3.3 Congelamento

Este processo consiste em retirar o calor da água salgada, fazendo com que a água pura congele deixando o sal aderido nas superfícies do gelo. Depois de lavar este gelo, obtém-se água pura em forma de gelo que depois de fundido é água

potável, própria para o consumo. Embora este processo pareça simples, com menor consumo energético, menor efeito corrosivo e incrustante, ele tem problemas de adaptação para sua implantação em escala industrial. SANTOS (2005).

2.3.4 Osmose Reversa

Este processo consiste em aplicar sobre uma solução de água salgada uma pressão superior à sua pressão osmótica contra uma membrana semipermeável, fazendo com que só a água pura passe pela membrana deixando retidos nela os íons de sal. Na RO tem-se a necessidade de um pré-tratamento da água salgada que é usada no processo, sendo necessária a filtração e desinfecção, de modo a retirar os elementos em suspensão e os organismos que nela estão presentes, minimizando assim o entupimento das membranas. Após o pré-tratamento da água salgada, a água segue em direção a uma membrana semipermeável, possuindo um elevado grau de permeabilidade à água, mas que apresenta uma barreira impenetrável à sais. Para finalizar o tratamento, a água passa por um sistema de pós-tratamento que consiste na esterilização, estabilização e enriquecimento mineral água. GOH (2016).

Uma vez que a unidade de RO opera à temperatura ambiente, a corrosão e escamação problemas são diminuídos em comparação com os processos de destilação. No entanto, o pré-tratamento eficaz da água de alimentação é necessária para minimizar a incrustação, dimensionamento e degradação da membrana. GOH (2016).

Na figura 2.5 pode-se ver um esquemático da membrana de osmose reversa e ainda ver como que se dispõe o fluxo de água neste tipo de membrana. Observa-se que a água bruta entre pressurizada pela parte mais externa, como as membranas retém os sais, apenas a água dessalinizada flui para o centro, assim a salmoura segue pela parte mais externa das membranas saindo no final como rejeito.

Figura 2.5 Modelo da membrana de sistema de osmose reversa



Fonte: <http://www.waterworks.com.br>

A RO é um processo puramente elétrico. A maior parte da energia elétrica consumida é na bomba de alta pressão, porém existem outras bombas e equipamentos auxiliares que também consomem energia elétrica.

As plantas de dessalinização que usam o processo de RO estão amplamente difundidas devido ao seu design modular, dessa forma, onde tem necessidade de plantas com maiores capacidades, basta fazer a montagem usando de vários módulos, que geralmente são acomodados em prateleiras. No mundo existe plantas com capacidade máxima de 128 000 m³/dia, como também, pequenas unidades de até 0,1 m³/dia e nessas plantas de menor porte pode-se ter o uso de energia fotovoltaica, especialmente em lugares remotos devido a benefícios de custo iniciais. GOH (2016).

A eficiência energética de uma unidade de RO depende praticamente de como é feita a recuperação de energia da salmoura rejeitada. De acordo com a publicação elaborada com base nos Manuais de Administração de Energia da Secretaria de Saneamento e Energia do Governo do Estado de São Paulo, em grandes instalações,

a energia é recuperada através de uma turbina do tipo Pelton, que fornecem cerca de 20% a 40% da energia consumida no processo.

O processo de RO depende diretamente da escolha da membrana que será usada no processo de dessalinização, assim, é importante saber quais os tipos existentes no mercado. Saber qual membrana usar é uma decisão fortemente influenciada pelo custo, qualidade da água de alimentação, e capacidade de produção de água de cada membrana.

Documentos técnicos da Agência Internacional de Energia Atômica de 2015, mostra que atualmente os polímeros utilizados para a fabricação de membranas de RO são baseados em acetatos de celulose ou polímeros de poliamida, assim as membranas usadas na dessalinização de água do mar são geralmente fabricadas a partir de uma mistura de diacetato de celulose com triacetato de celulose ou um compósito de película fina normalmente feitos de poliamida, polisulfona, ou polímeros de poliureia.

Escolhido o tipo de material, resta saber como vai ser o modelo das membranas, sendo os mais utilizados comercialmente: membranas spiralwound (SW) e membranas hollowfibre (HF). Um módulo de membrana típica SW industrial é de cerca de 100-150 cm de comprimento e 20-30 cm de diâmetro. Uma membrana de HF é feita a partir de ambas as misturas de acetato de celulose e polímeros não-celulósicos, tais como poliamida. Milhões de fibras são dobrados para produzir feixes cerca de 120 cm de comprimento e 10-20 cm de diâmetro.

Engenheiros da Lockheed Martin anunciaram um novo filtro que faz uso de um novo tipo de material de filtragem, conhecido como Perforene, sendo bem mais econômico que a dessalinização tradicional e podendo reduzir em 99% o custo da dessalinização. Este novo material é composto de grafeno e tem orifícios de praticamente um nanômetro de tamanho. Estes orifícios permitem a passagem da água do mar, porém são pequenos o suficiente para reter os íons de sal. De acordo com a equipe de engenheiros, folhas de filtro de grafeno têm praticamente um átomo de espessura e necessitam de menor quantidade de energia para que a água os atravesse. Além disso, aponta-se que o material é 500 vezes mais fino e mil vezes

mais forte que o melhor filtro disponível, o que faz com que a energia exigida para o processo também seja 100 vezes menor.

2.3.5 Destilação

A destilação é um processo onde adicionando calor à solução de água salgada é possível fazer com que a água pura se evapore deixando o sal. Depois de condensar esse vapor de água obtido na evaporação pode-se obter água potável para o consumo humano. A destilação existe na natureza no próprio ciclo do hidrogênio, porém sua realização de forma artificial começou a partir da destilação solar. A destilação não exige pré-tratamento da água bruta, pois as substâncias contidas na água não se evaporam, assim o condensado contém apenas água pura.

2.3.5.1 Destilação a Múltiplos Efeitos (MED)

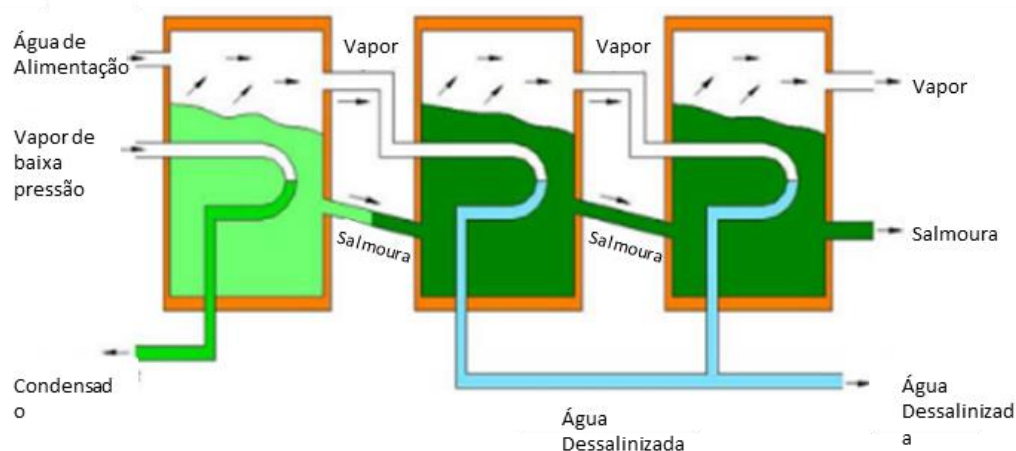
O processo de destilação de múltiplo efeito pode ser encontrado em vários tipos de indústrias, como o de açúcar, papel celulose, laticínios, têxteis, ácidos e de dessalinização. Plantas MED pequenos com capacidades inferiores a 500 m³/dia foram introduzidas para a indústria de dessalinização na década de 1960, porém em 2005, observava unidades MED com capacidade de 36.000 m³/dia. SANTOS (2005).

A maioria dos processos MED possuem temperatura de funcionamento menor que 75°C e isso ocorre porque a água do mar de alimentação é pulverizada sobre a superfície exterior dos tubos, assim a operação com baixa temperatura limita a taxa de formação de incrustações na superfície do lado de fora dos tubos do evaporador, bem como permite a utilização de materiais mais baratos para permutadores de calor. Esse processo tem a vantagem de água do mar a ebulição em várias fases, sem fornecimento calor adicional após a primeira câmara. SANTOS (2005).

Em uma planta MED, a água do mar entra na primeira câmara e tem um acréscimo de temperatura até o ponto de ebulição, após ter sido pré-aquecido nos tubos. Após isso, a água do mar é pulverizada ou distribuída uniformemente sobre a superfície dos tubos do evaporador em uma película fina para promover rápida de ebulição e evaporação.

A água do mar de alimentação é aquecida por meio de fonte de calor, o qual é condensado no lado oposto dos tubos. O condensado da caldeira de vapor é reciclado para a caldeira para ser reutilizado. Apenas uma parte da água do mar pulverizada sobre os tubos do primeiro efeito é evaporado. A água do mar remanescente é recolhida e alimentada para o segundo. O vapor gerado na primeira câmara é alimentado para a segunda câmara como meio adicional de aquecimento e gera uma quantidade aproximadamente igual de vapor a partir da ebulição da água do mar que circula fora da superfície do tubo, enquanto esse vapor da etapa anterior se condensa, tornando-se água de produto. Os vapores do último efeito são condensados no condensador final, ao mesmo tempo que faz pré-aquecimento a água do mar de alimentação. Para ficar mais claro como funciona o processo de dessalinização MED tem-se um esquemático do processo na figura 2.6 que mostra o fluxo da água no processo.

Figura 2.6 Diagrama esquemático de dessalinização MED



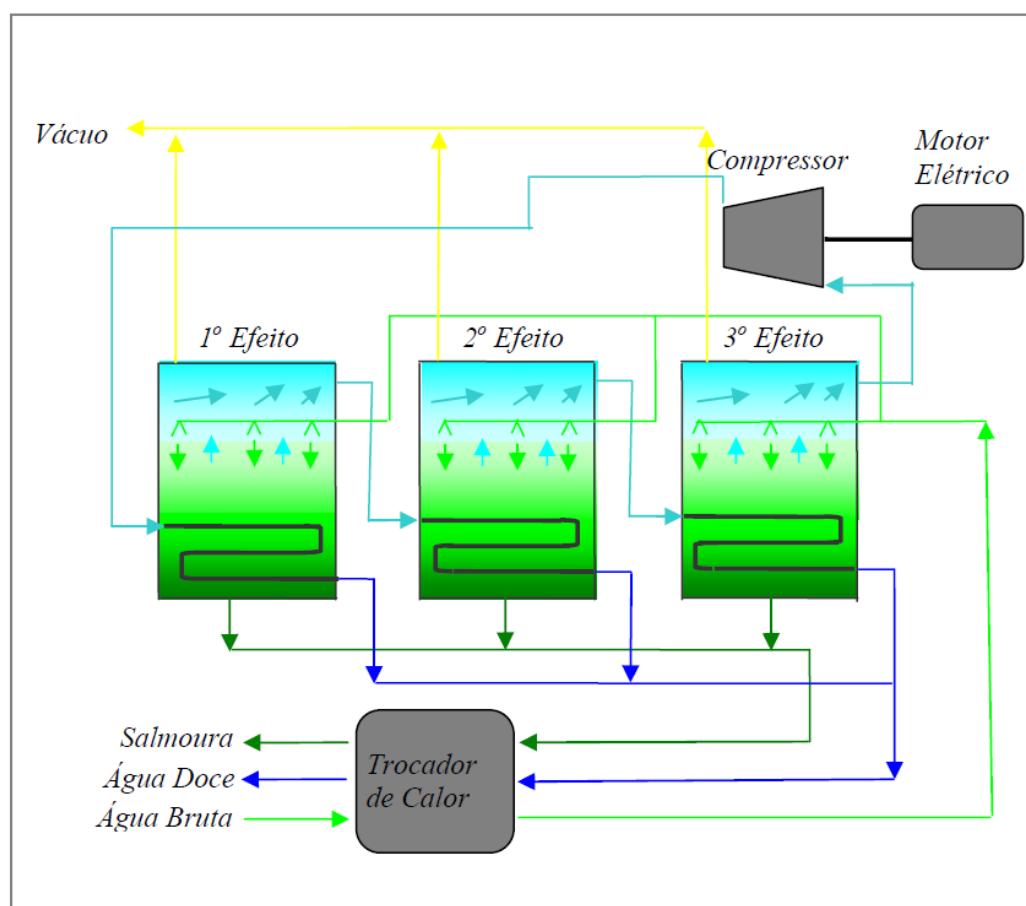
Fonte: IAEA (2015).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

passa antes pelo do termocompressor, aspirando assim o vapor do último efeito. Assim tem-se um vapor com temperatura e pressão menor que o vapor da fonte externa de vapor e maior que o vapor gerado no último efeito. Esta mistura é comprimida, aumentando a sua temperatura em função do aumento da seção do Termocompressor na direção do escoamento. SANTOS (2005).

A tecnologia de compressão mecânica do vapor (Mechanical Vapor Compression) é a combinação das tecnologias MED e MVC, sendo que o processo pode ser comparado a um processo de dessalinização elétrico em termos de energia consumida, já que o compressor é acionado por energia elétrica.

Figura 2.8 Dessalinização MED com MVC

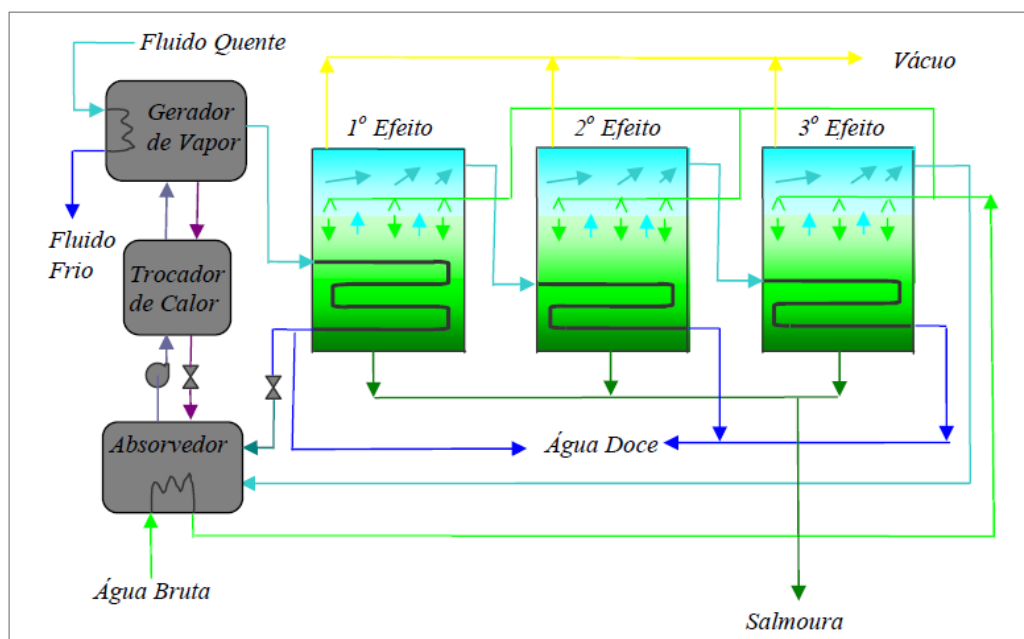


Fonte: Santos (2005).

Na figura 2.8 pode-se observar os detalhes do processo MED-MVC, nele o vapor produzido no último efeito é recirculado e se condensa no primeiro efeito. A recirculação é feita pelo compressor que comprime este vapor, aumentando a sua temperatura, já que no último efeito tem-se um vapor com baixa pressão e temperatura. Como o vapor gerado no último efeito é condensado no primeiro efeito, a unidade MED-MVC não necessita de condensador para o pré-aquecimento da água bruta, sendo que necessita apenas de um trocador de calor igual ao usado em unidades MVC. SANTOS (2005).

A tecnologia de bomba de calor por absorção (Absorption Heat Pump) é uma tecnologia de absorção, que usa uma bomba para realizar o trabalho de compressão, assim como em sistemas de refrigeração.

Figura 2.9 Dessalinização MED com AHP



Fonte: Santos (2005).

A Figura 2.9 representa esquematicamente o funcionamento do processo MED-AHP, o sistema de absorção usa um absorvente (brometo de lítio) que absorve o refrigerante (vapor de água) no absorvedor, liberando calor. Essa mistura líquida é bombeada para um gerador, onde recebe calor de uma fonte externa de vapor, para

que assim tenha a evaporação do refrigerante contido na mistura líquida pressurizada. A energia consumida nas unidades MED-AHP é em grande parte energia térmica, sendo pequena a fração de eletricidade necessária para o processo. SANTOS (2005).

2.3.5.2 Evaporação Multietapa por efeito Flash (MSF)

O sistema de evaporação com único efeito para a dessalinização da água do mar não tem uso prático em uma escala industrial, isto devido ao sistema ter um pequeno desempenho térmico (PR), menor que 1, isto é, a massa de água produzido é menor que a massa de vapor de aquecimento usados para operar o sistema. IAEA (2015).

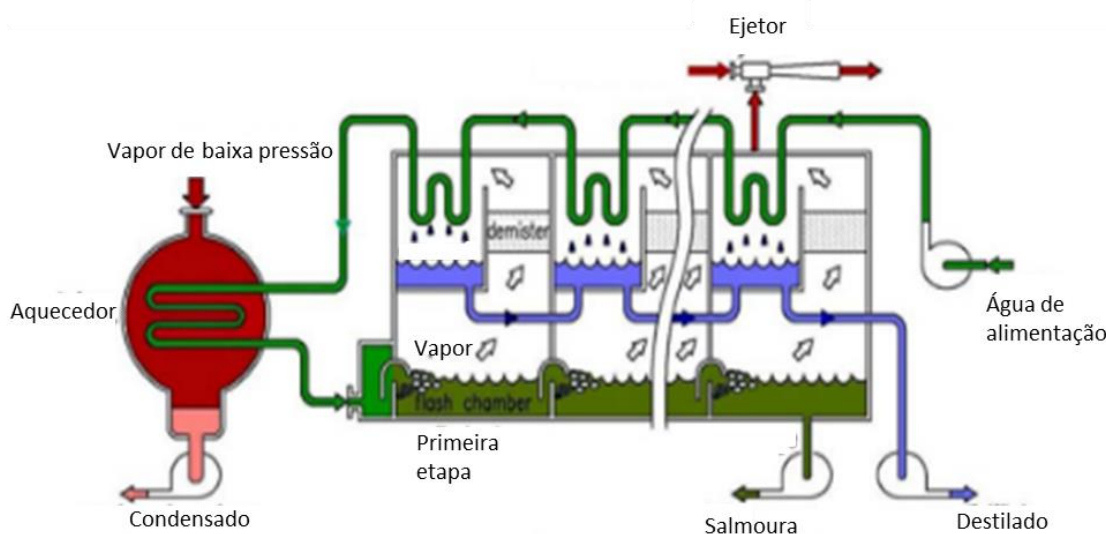
Dentro um processo MSF, a água do mar é aquecida pela passagem através de um aquecedor de água salgada, essa água aquecida flui para uma fase, em que a pressão ambiente é reduzida, que faz com que a água comece a ferver, essa introdução da água quente na câmara faz com que ele ferva rapidamente, transformando em vapor quase imediatamente.

De modo geral, apenas uma pequena percentagem de água presente é convertida em vapor, dependendo a pressão a qual é mantida na fase. Essa água do mar remanescente passa para a fase seguinte, que está a uma pressão atmosférica menor que a anterior, fazendo com ocorra novamente uma evaporação parcial da água. Este processo deve ser repetido de modo que a água de alimentação passe de uma fase para outra e seja fervida repetidamente sem calor adicional.

Normalmente, uma planta MSF contém 4 a 40 etapas, com 20 a 30 constantemente a ser operado. O vapor gerado por intermitência é convertido em água fresca após a condensação, fazendo contato com os tubos frescos que são executados através do estágio. Os tubos são arrefecidos por água do mar de entrada que entra no aquecedor de água salgada. Este, por sua vez, aquece a água de alimentação, de modo que a quantidade de energia térmica necessária no aquecedor de água salgada para aumentar a temperatura da água do mar seja reduzida. SOUZA (2002).

O processo de dessalinização MSF pode ser projetado sem recirculação de água salgada ou sistemas de fluxo de recirculação de água salgada, porém o do mesmo modo que o sistema sem recirculação é a mais simples no desenho e operação, isso faz com que ele não seja tão eficiente como o sistema de recirculação. A corrente de alimentação deve ser totalmente tratada com produtos químicos para controle de corrosão. Para minimizar os custos de tratamento, o tratamento de polifosfato é normalmente utilizado, limitando desse modo a temperatura de funcionamento máxima de cerca de 88 °C. Com a dosagem de ácido mais caro, o que é económico para plantas de recirculação, a temperatura máxima pode ser de cerca de 121 °C. BANDI (2016).

Figura 2.10 Diagrama esquemático de dessalinização MSF



Fonte: IAEA (2015).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

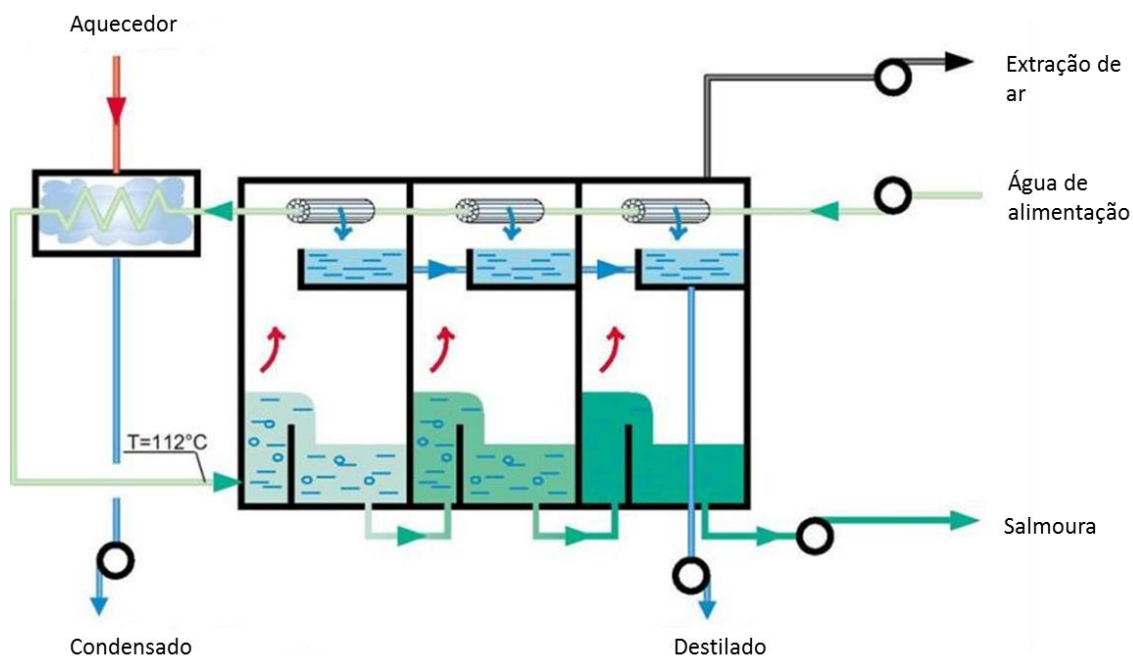
Na figura 2.10 tem-se um esquemático de um sistema de dessalinização MSF, que mostra o funcionamento e o fluxo da água no processo.

Acerca de materiais para dessalinizadores MSF, geralmente é o material usado para a construção para dos reservatórios nessas estruturas é o aço e para os tubos de que são submetidos a ambientes corrosivos é usado materiais que incluem titânio,

ligas de cobre-níquel, liga de alumínio-níquel cobre, latão e alumínio. A secção transversal do invólucro pode ser circular, retangular ou irregular. Deve lembrar que as superfícies planas devem ser reforçadas com reforços de aço externos, assim as estruturas se tornam capaz de resistir à pressão interna ou externa. O projeto real depende das condições específicas, tais como a temperatura e composição da água de alimentação, a pressão do vapor disponível e o custo de vapor e eletricidade.

As unidades dessalinizadoras de MSF podem ser classificadas de três formas: misturador simples (M), passe único e sem recirculação de salmoura (OT) e com recirculação de salmoura (BR). Entre estes o MSF-OT é o que possui uma simplicidade maior no desenho, enquanto que o mais eficiente como é o sistema de MSF-BR BANDI (2016). As figuras 2.11 e 2.12 mostram os diagramas esquemáticos de dessalinizadoras MSF-OT e MSF-BR respectivamente, com suas peculiaridades de projetos. Observa-se que no MSF-BR a salmoura é recirculada para que possa aumentar a produção de água dessalinizada ou mesmo economizar a energia térmica exigida no processo.

Figura 2.11 Dessalinização MSF passe único (OT)



Fonte: <http://www.sidem-desalination.com/Process/MSF/>

Nota: Dados adaptados pelo autor.

- No MSF-BR a temperatura da salmoura rejeitada é menor, devido à mistura nos estágios e alta temperatura da salmoura rejeitada no processo MSF-OT.

A utilização do processo de dessalinização MSF-OT pode ser útil especialmente em regiões equatoriais, onde a temperatura da água do mar permanece quase constante ao longo do ano. O processo MSF-OT tem as seguintes vantagens em relação ao sistema de MSF-BR, tais como:

- Redução do número de unidades de bombeamento. O MSF-OT tem bombas para água do mar de alimentação, produto destilado, e salmoura rejeitar, enquanto o MSF-BR além dessas, possui bombas adicionais para reciclar água salgada e água salgada de refrigeração.
- A salinidade da salmoura recirculada é maior que a da água do mar de alimentação (63000 ppm em comparação com 42.000 ppm). Portanto, a tendência para a formação de incrustantes seria maior no sistema MSF-BR que em MSF-OT, isso exigiria um aumento na taxa de dosagem anti-incrustantes em MSF-BR. Além disso, uma maior frequência de limpeza ácida dos tubos do condensador está prevista para o processo MSF-BR.

3 PLANTAS DUAIS: COGERAÇÃO E DESSALINIZAÇÃO

Cogeração de energia é o processo de geração de energia elétrica combinado com o aproveitamento da energia térmica desperdiçada no primeiro estágio de geração. O calor desperdiçado, seja pela exaustão dos gases de escape, ou pelo líquido de arrefecimento do radiador, pode ser aproveitado para geração de vapor para processos industriais, refrigeração de ambientes através de chillers, dessalinização ou qualquer outro processo que necessita de energia térmica.

3.1 INTRODUÇÃO

A Planta Dual, como um sistema de cogeração, é um processo de transformação da energia térmica de um combustível em mais de uma forma de energia útil. As formas de energia útil mais frequentes são a energia mecânica (para a geração de eletricidade) e a térmica (para uma unidade de dessalinização). Esse nome é atribuído exclusivamente à projetos que visam a produção combinada de eletricidade e água dessalinizada, sendo que tanto a energia quanto a água são produtos do processo. SANTOS (2005).

A cogeração aplicada à dessalinização tem por finalidade aproveitar o calor residual da geração termelétrica para a produção de água dessalinizada através de processos de dessalinização térmica. Este método nos permite evitar o grande rejeito de energia das centrais termelétricas devido a alta temperatura dos gases de escape como também facilita a obtenção de água, que só poderia ser obtida por meio de queima de combustível numa caldeira convencional para suprir vapor de baixa pressão, de forma a funcionar uma unidade MSF ou MED. A cogeração oferece um consumo de energia eficiente e a capacidade de reduzir emissões de dióxido de carbono, sendo que esses benefícios ajudam consideravelmente os usuários a cumprir com pactos globais e iniciativas governamentais, como por exemplo o Protocolo de Kyoto. AGASHICHEV (2005).

Atualmente bem difundida, existe também a possibilidade de aproveitar uma parte da energia produzida no processo, como insumo energético para a produção de água dessalinizada através de um processo de dessalinização elétrica. Existe ainda muita dificuldade para solucionar o problema de armazenamento de energia, sendo assim, o que é gerado de excedente geralmente é repassado para rede através do Smart Grid, porém nem sempre ocorre dessa maneira, tendo assim que diminuir a produção de energia por não ter como consumir no processo ou consumidor para comprar. Assim, usando o sistema híbrido, tem-se a oportunidade de produzir água usando processos térmicos, além disso, a parte excedente de eletricidade da própria planta de cogeração pode ser aproveitada para produzir mais água dessalinizada através dos processos elétricos de dessalinização (RO, MVC ou ED), dessa forma pode-se ter o gerenciamento da variação da demanda elétrica usando opcionalmente a eletricidade da própria planta para produção adicional de água dessalinizada.

A cogeração que teve início no final do século XIX, tendo como percussores a Europa de modo geral como também os Estados Unidos, além disso teve um grande crescimento nos países do Oriente Médio devido à grande escassez de recursos hídricos e a necessidade de geração de energia através das termelétricas. SANTOS (2005).

3.2 SISTEMAS DE COGERAÇÃO

A partir da fonte de calor disponível, a cogeração pode ser classificada em dois grandes grupos: a cogeração de bottoming e a cogeração de topping.

Na cogeração de bottoming, o processo utiliza a energia a temperaturas mais elevadas, e a energia cogerada é o resultado da recuperação do calor residual do processo. Já no processo cogeração de topping, a energia utilizada (acionamento) é extraída no nível mais alto da temperatura da combustão, e a energia recuperada (cogerada) no nível mais baixo SANTOS (2005).

A cogeração pode ser realizada empregando qualquer um dos ciclos térmico das termelétricas. Em função dos acionadores dos geradores elétricos, a planta dual

pode ser classificada em quatro tipos de sistema de cogeração: com turbinas a vapor, com motores alternativos de combustão interna, com turbinas a gás e com ciclos combinados. Para escolher um dos sistemas, deve levar em conta a viabilidade técnico-econômica, as necessidades estratégicas e outras variáveis como disponibilidade de água, espaço, combustível, condições ambientais etc.

3.2.1 Cogeração com Turbina a Vapor

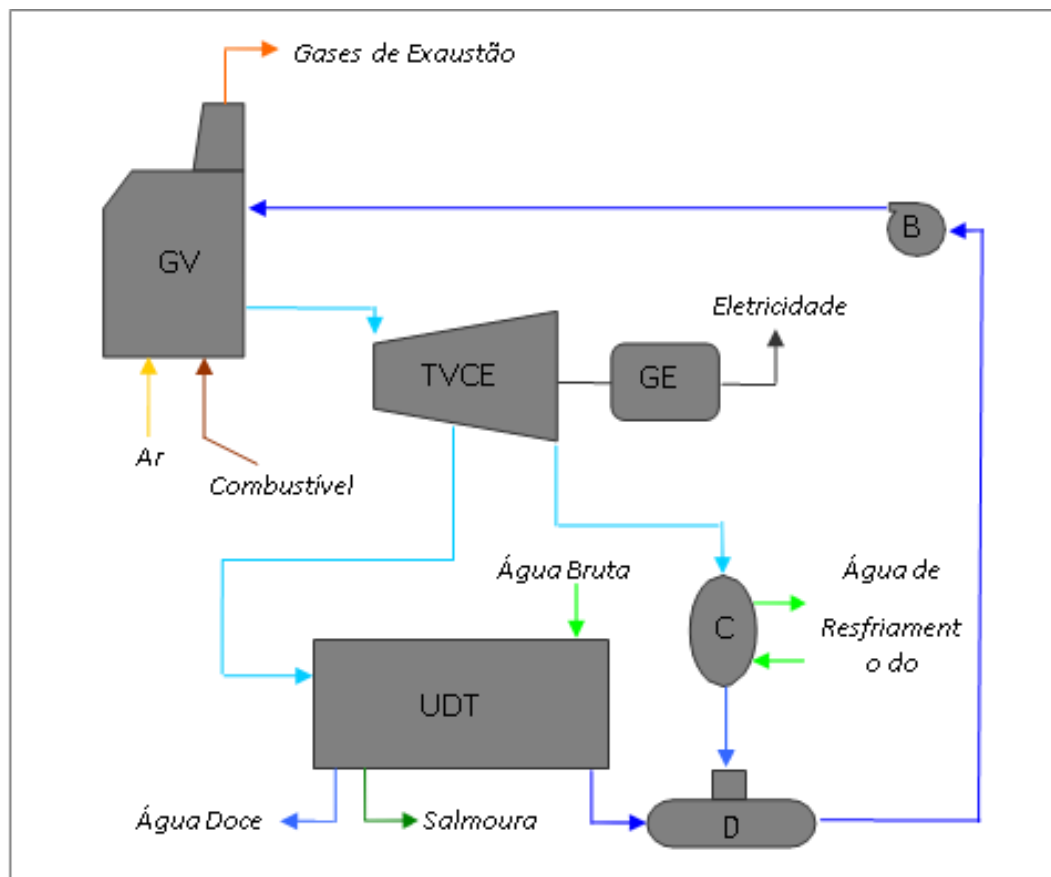
O ciclo a vapor que é conhecido como o ciclo de potência mais antigo que existe. Usado na cogeração, a energia térmica resultante da combustão é transferida, através da caldeira, para a água que vaporiza e superaquece. O vapor superaquecido é expandido em uma turbina que aciona uma carga mecânica ou gerador elétrico. O vapor é extraído na saída da turbina, nas condições de temperatura e pressão requeridas para o processo que utiliza este calor útil. Geralmente, o fluido é devolvido à caldeira no estado de condensado para reinicializar o ciclo de transferência de energia. Esse ciclo de cogeração permite a utilização de combustíveis mais baratos, como resíduos industriais, carvão, lenha, bagaço de cana, que em várias situações, são os únicos combustíveis disponíveis. Em ciclos de cogeração com turbina a vapor tem-se o uso de turbina a vapor de condensação e extração (TVCE) e/ou turbina a vapor de contrapressão (TVCP). SANTOS (2005).

No ciclo de cogeração com turbina a vapor de condensação e extração, figura 3.1, uma fração do vapor de alta pressão vai se expandir totalmente, a outra parte vai ser extraída de acordo com a pressão do processo de dessalinização térmica. A parte que sai da turbina parcialmente condensada vai para o condensador (C) onde se condensa totalmente, para assim seguir para o desaerador (D). O vapor entregue para a dessalinização também volta condensado para o mesmo desaerador de onde ambos são bombeados de volta para o gerador de vapor. SANTOS (2005).

A cogeração com turbina a vapor de contrapressão, figura 3.2, não possui condensador, isso devido a todo o vapor de alta pressão que entrar na turbina se expandir até a pressão do processo e logo depois o mesmo é entregue totalmente à

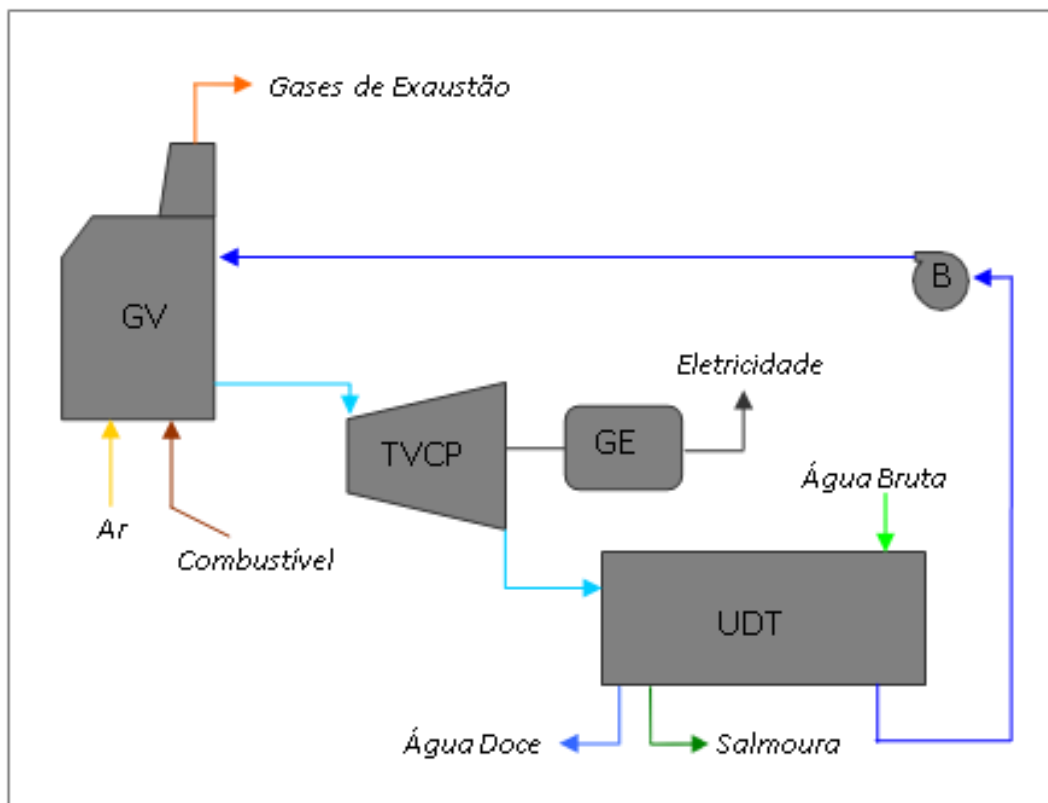
unidade de dessalinização térmica, de onde sai condensado para ser bombeado de volta ao gerador de vapor. SANTOS (2005).

Figura 3.1 Cogeração com Turbina a Vapor de Condensação e Extração



Fonte: Santos (2005).

Figura 3.2 Cogeração com Turbina a Vapor de Contrapressão



Fonte: Santos (2005).

3.2.2 Cogeração com Motor Alternativo de Combustão Interna

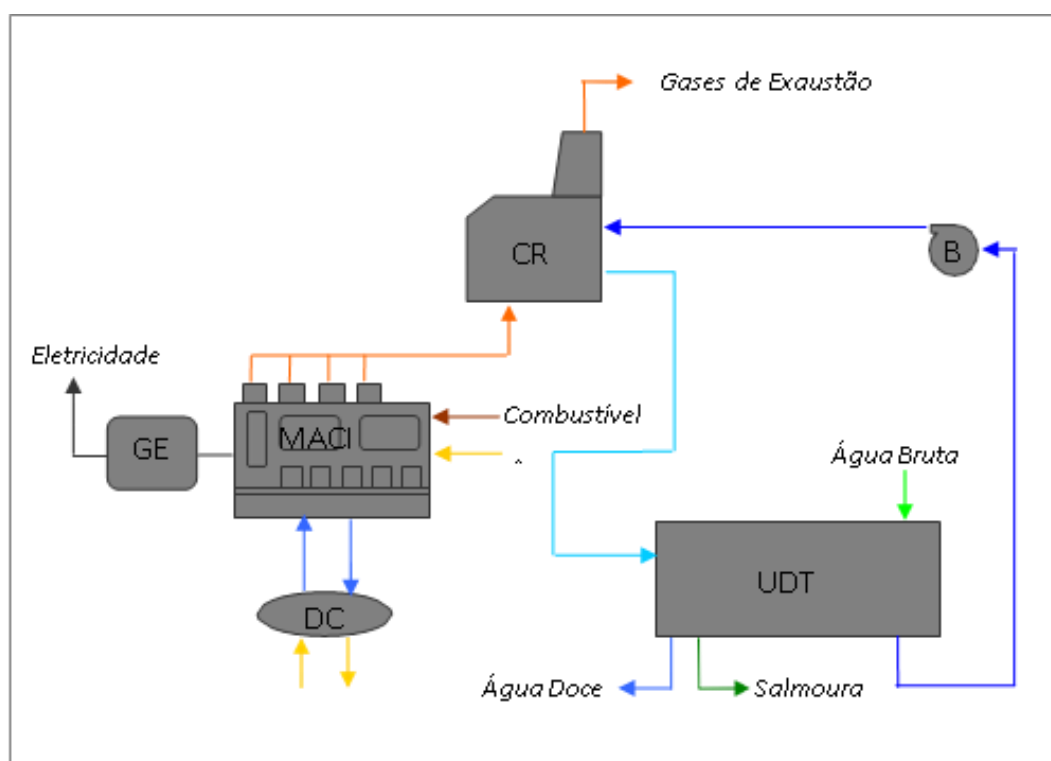
O motor alternativo pode ser definido como uma máquina térmica (motora) que gera potência de eixo a partir do calor liberado na combustão que acontece no seu interior (nos cilindros). Assim como toda a máquina térmica, ele rejeita calor ao ambiente majoritariamente na forma de gases de escape e uma fração na água de resfriamento dos componentes do motor.

O ciclo de cogeração utiliza motores alternativos de combustão interna para produção de trabalho (energia elétrica ou acionamento mecânico) e recuperação da energia térmica residual dos gases de exaustão. Nesse ciclo o calor dos sistemas de lubrificação de resfriamento das camisas dos pistões pode também ser usado como forma de recuperação de energia residual, porém por não ser um valor expressivo,

tem seu uso restrito em instalações que necessitam de pequenas quantidades de calor a temperaturas moderadas e maiores quantidades de energia elétrica ou força motriz. São comuns plantas de cogeração utilizando esses ciclos nas potências de poucas dezenas de kW até potências da ordem de 20 MW ou pouco mais. SANTOS (2005).

Em plantas duais usando cogeração com motor alternativo de combustão interna (CMACI), os gases de escape podem ser aproveitados na geração de vapor para o processo de dessalinização através de uma caldeira de recuperação (CR) SANTOS (2005). Como pode ser analisado na figura 3.3, a caldeira de recuperação é um trocador de calor que aproveita o calor sensível dos gases de escape para gerar vapor a partir da água bombeada pela bomba de alimentação da mesma, na pressão do processo.

Figura 3.3 Cogeração com Motor Alternativo de Combustão Interna aproveitando somente os Gases de Exaustão do Motor



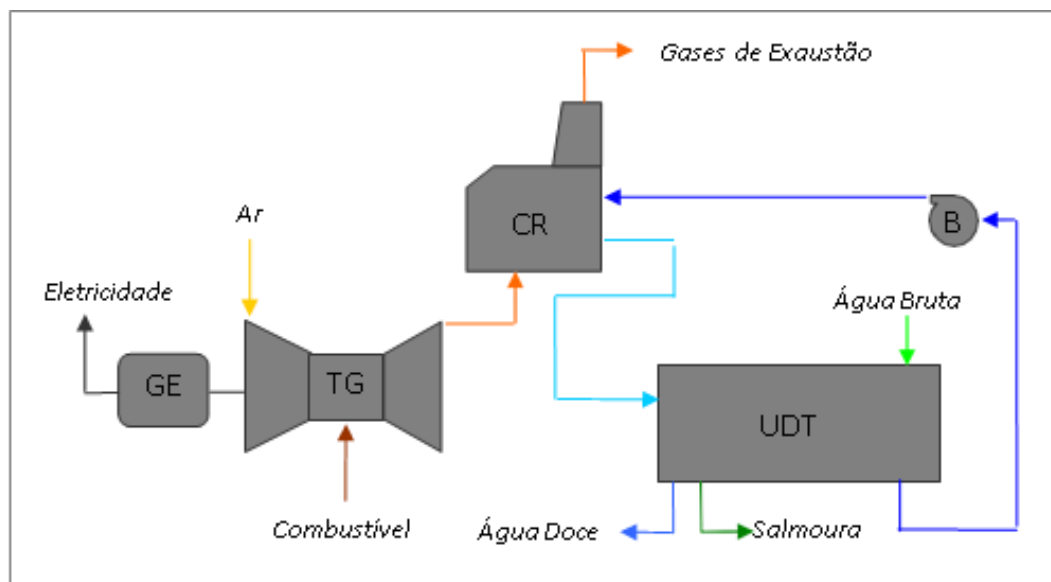
Fonte: Santos (2005).

Esses gases de exaustão apresentam uma temperatura elevada, da ordem de 380 °C a 600 °C e possuem um alto conteúdo energético, sendo da ordem de 50 a 70% da energia contida no combustível. A cogeração aparece no aproveitamento de parte dessa energia térmica. O aproveitamento vai depender das características da carga térmica, podendo ser maior ou menor. Os processos que utilizam temperaturas mais baixas podem aproveitar mais energia residual dos gases de exaustão, como por exemplo a utilização dos gases quentes para secagem, geração de vapor por meio de uma caldeira de recuperação e o aquecimento de fluido térmico. SANTOS (2005).

Nas plantas duais que usam cogeração com turbina a gás (CTG), analogamente ao que acontece com o motor de combustão interna, a caldeira de recuperação aproveita o calor sensível dos gases de exaustão da turbina para gerar vapor para o processo de dessalinização. SANTOS (2005).

Existem plantas de cogeração com turbinas a gás em que se usa a queima suplementar na caldeira de recuperação aumentando assim a vazão de vapor para o processo.

Figura 3.5 Cogeração com Turbina a Gás



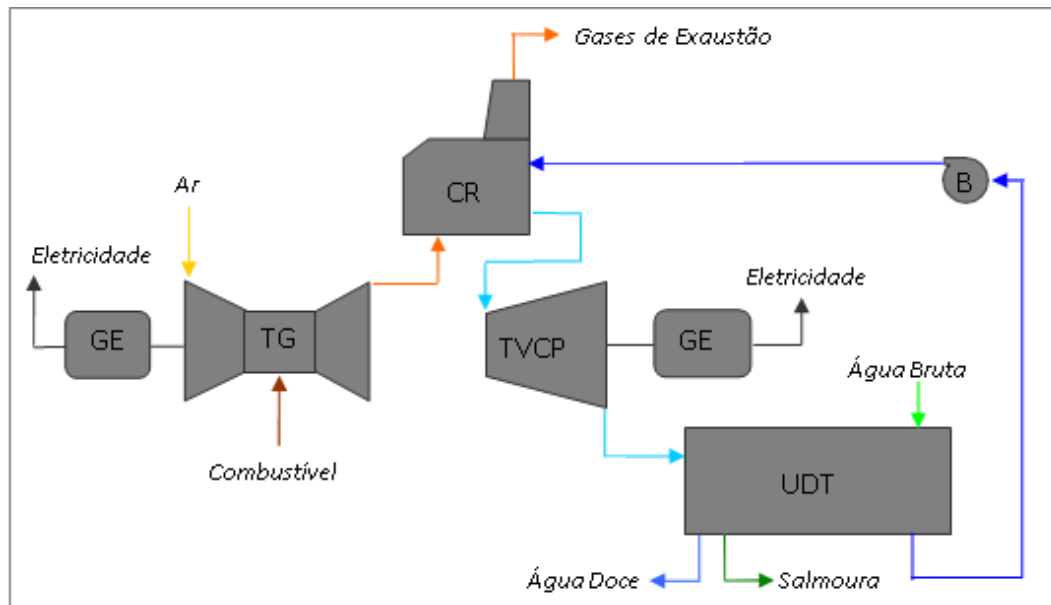
Fonte: Santos (2005).

3.2.4 Cogeração com Ciclo Combinado

Esta forma de cogeração é utilizada nas situações em que se deseja produzir energia elétrica e energia térmica úteis, em quantidades variáveis, de acordo com as cargas consumidoras ou para atendimento de mercados específicos.

É constituída basicamente de um ciclo combinado com flexibilização da geração elétrica e de energia térmica (normalmente vapor) através da extração de vapor na turbina a vapor, condensação parcial, queima suplementar de combustível na caldeira de recuperação. Existem plantas tão flexíveis que podem operar desde a produção máxima de energia elétrica sem extração de vapor para o processo industrial até a produção máxima de vapor para processo sem produção de energia elétrica. Outra forma de cogeração desse tipo é aquela em que os acionamentos são de equipamentos mecânicos (bombas, compressores etc.) em vez de geradores elétricos. Em determinadas situações, a queima adicional de combustíveis pode reduzir os custos globais de operação por utilizar combustíveis mais baratos. A eficiência pode ser muito elevada, dependendo do balanço de massa e energia que se obtém em determinados projetos. SANTOS (2005). A figura 3.6 mostra um sistema de cogeração com ciclo combinado de turbina a gás e turbina a vapor de contrapressão.

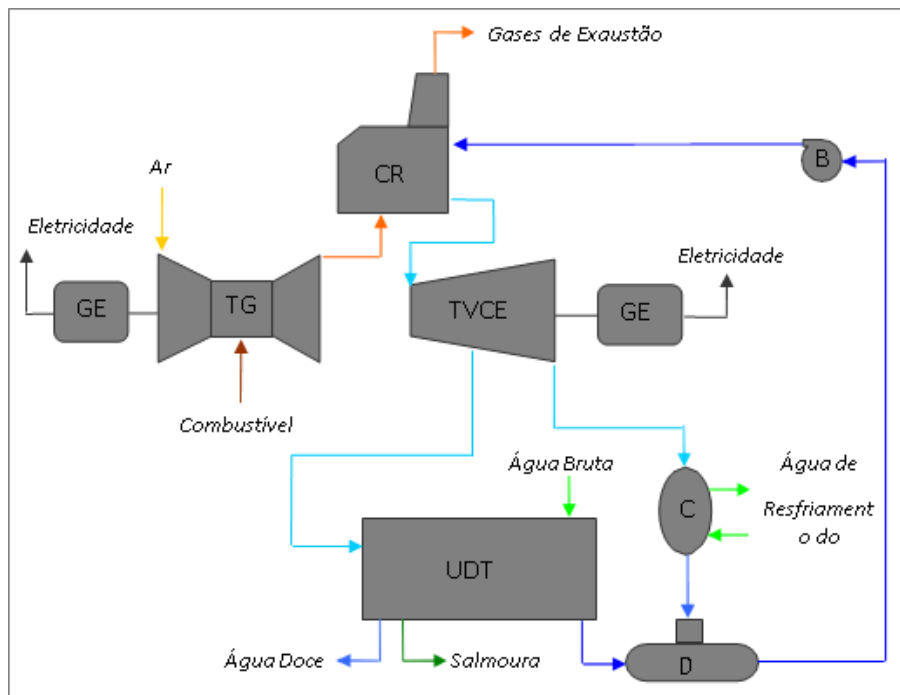
Figura 3.6 Cogeração com Ciclo Combinado de Turbina a Gás e Turbina a Vapor de Contrapressão.



Fonte: Santos (2005).

As plantas duais que usam a cogeração com ciclo combinado de turbina a gás (CCCTG), podem ser combinadas com turbina a vapor de contrapressão (Figura 3.6) ou de condensação e extração (Figura 3.7). A diferença de funcionamento destas duas tecnologias é unicamente no circuito de condensado e vapor analogamente ao que acontece na cogeração com ciclo a vapor.

Figura 3.7 Cogeração com Ciclo Combinado de Turbina a Gás e Turbina a Vapor de Condensação e Extração



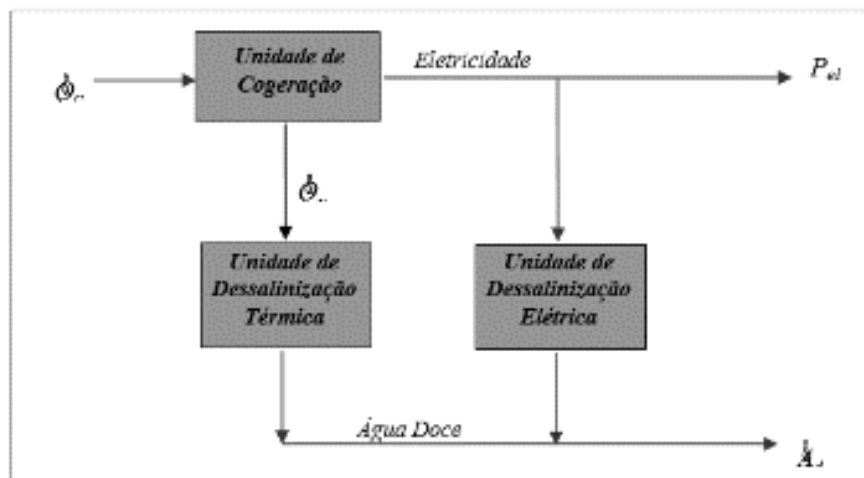
Fonte: Santos (2005).

3.3 SISTEMAS HÍBRIDOS

Em sistemas híbridos ao contrário do que acontece na cogeração, onde a produção de água dessalinizada acontece unicamente em unidades de dessalinização térmica, tem-se unidades térmicas como também elétricas na dessalinização, assim parte da eletricidade gerada na unidade de cogeração é usada para produzir mais água dessalinizada em unidades de dessalinização elétrica.

Numa planta dual de sistema híbrido a unidade de cogeração pode usar em princípio qualquer sistema ou tecnologia de cogeração, enquanto no processo de dessalinização térmica pode-se escolher entre MSF ou uma das tecnologias MED, a dessalinização elétrica tem-se RO, MVC ou ED. Na figura 3.8 pode-se ver um exemplo de como funciona o sistema híbrido.

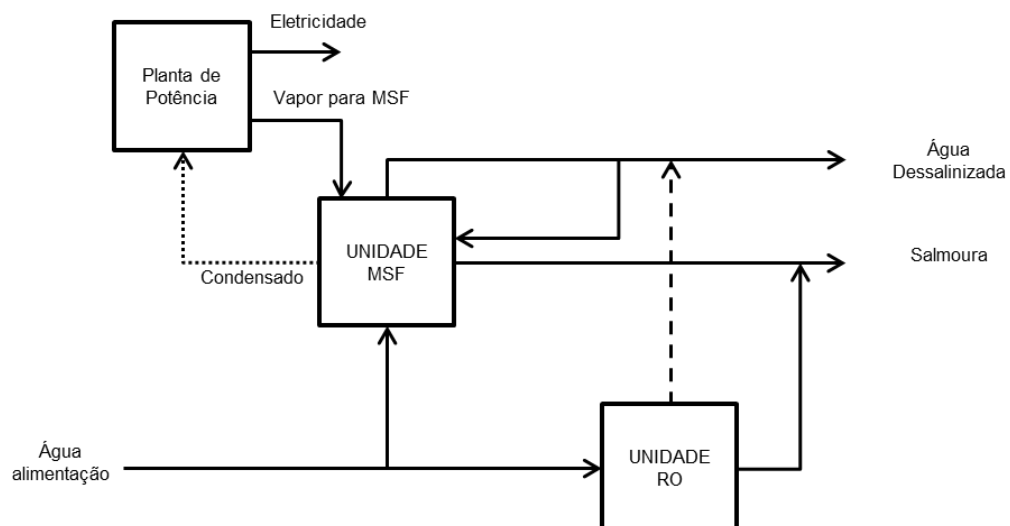
Figura 3.8 Fluxos Básicos de uma Planta Dual usando Sistema Híbrido



Fonte: Santos (2005).

Na figura 3.9 mostra um exemplo onde a dessalinização MSF é combinada com a RO. Além disso o produto das duas são misturados, para que se tenha uma melhor água dessalinizada no final do processo.

Figura 3.9 Sistema híbrido de dessalinização RO combinado com MSF



Fonte: IAEA (2015).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

No estudo realizado por SANTOS (2005), tem-se que o sistema híbrido pode produzir eletricidade e água dessalinizada a custos energéticos não tão altos, tendo as seguintes vantagens energéticas:

Uma planta dual que usa a cogeração, operando em sua plena carga característica, por si só, já apresenta a vantagem de gerar eletricidade a um custo energético menor que uma central termelétrica convencional e produzir água dessalinizada mais barata do que se fosse produzida separadamente usando o mesmo processo de dessalinização térmica. Num sistema híbrido a eletricidade mais barata gerada na unidade de cogeração pode ser aproveitada para produzir água dessalinizada na unidade de dessalinização elétrica a custos energéticos ainda menores que a produzida na própria planta dual usando simplesmente a cogeração, o que resulta num menor custo energético médio da água dessalinizada. Em caso de aumento da demanda de água dessalinizada o sistema híbrido pode ser a solução.

Uma planta dual que usa a cogeração, operando em carga parcial por causa da redução da demanda de eletricidade, implica numa consequente redução na produção de água dessalinizada. Neste caso uma solução que vem sendo praticada é a queima suplementar ou entrada em operação de caldeiras auxiliares. Contudo é sabido que a operação de centrais deste tipo à carga parcial, o uso de queima suplementar ou caldeiras auxiliares caracterizam uma grande ineficiência energética. O sistema híbrido apresenta a vantagem de não precisar de nenhuma destas soluções para adequar a planta dual a variação de carga, já que a eletricidade excedente pode ser usada na dessalinização adicional (SANTOS, 2005, p. 63-64).

É importante salientar que, se a planta de dessalinização híbrida não possui intenção de venda do excedente de eletricidade, não se pode chamar de Planta Dual, mas de uma Estação de Dessalinização Híbrida.

Devido à grande redução no consumo elétrico específico do processo de dessalinização RO, muitas empresas estão usando este processo para dessalinização a partir da eletricidade gerada em termelétricas. Neste caso não se tem uma Planta Dual e sim duas plantas: uma termelétrica e uma estação de dessalinização.

3.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Hoje, a cogeração é responsável por uma parcela significativa da energia elétrica produzida em diversos países. A elevada eficiência no aproveitamento de combustíveis aliada à proximidade do mercado da energia térmica torna alguns desses empreendimentos muito competitivos. Na área industrial, as vantagens da cogeração são mais conhecidas. A decisão de se implantar cogeração em uma instalação industrial nova ou já existente depende de uma análise muito criteriosa para se determinar qual o balanço, o processo, o mercado e o dimensionamento mais convenientes e mais econômicos.

A combinação de geração de energia com dessalinização com o uso do calor residual como fonte de energia para a dessalinização, diminui uma quantidade considerável de combustível quando comparado a processos que necessitam de caldeira para fornecer calor para a planta de dessalinização. De fato, a combinação do processo evita o desperdício e a queima de combustível para produzir vapor de baixa disponibilidade. A combinação da dessalinização com geração de energia oferece economia em tamanhos de turbina e do condensador e melhora a eficiência do processo. Vale lembrar que a eletricidade deve ser produzida de acordo com sua demanda instantânea enquanto que a água pode ser guardada em reservatórios.

4 ESTUDO DE CASO

Partindo dos resultados obtidos no repotenciamento realizado por SILVA (2004), no decorrer desse capítulo é feito uma análise termodinâmica onde visa-se a instalação de uma Planta Dual. Duas alternativas de processo de dessalinização são discutidas, de forma a comparar as tecnologias.

4.1 DESCRIÇÃO DO REPOTENCIAMENTO

SILVA (2004) realizou um estudo com enfoque no repotenciamento para o sistema de geração de potência da Companhia Siderúrgica Tubarão, atualmente ArcelorMittal Tubarão, este projeto tinha como objetivo a mudança do sistema de geração de potência, com a finalidade de alteração para um sistema de ciclo combinado. O ciclo combinado proposto pode ser dividido em duas partes: a primeira composta por um ciclo com duas turbinas a gás e a segunda composta por um ciclo com três turbinas a vapor, sendo que o vapor usado nas turbinas a vapor é produzido a partir de duas caldeiras de recuperação, que aproveitam os gases de exaustão das turbinas a gás, transformando água líquida em vapor.

O repotenciamento proposto visa três metas:

1. Melhoria no aproveitamento dos combustíveis disponíveis,
2. Aumento da oferta de energia elétrica,
3. Possibilidade de venda do excedente de energia.

Para o ciclo de turbina a gás, foi adotado o uso de uma turbina do fabricante ALSTOM modelo GT11N2, cujo uso em sistemas que operam com gás de alto forno foi comprovado durante os anos de 50 e 60. Essa turbina possui uma câmara de combustão em forma de silo, isso ajuda no processo, pois o Gás de Alto Forno (GAF) quando queimado possui um baixo poder calorífico de modo que a vazão de gás é maior quando comparado ao gás natural. SILVA (2004).

De acordo com SILVA (2004), as principais mudanças na operação das turbinas a gás que utilizam o GAF como combustível são:

- Aumento da vazão de combustível devido ao baixo PCI do GAF,
- Diminuição da pressão do ar no compressor de modo que a vazão dos gases de escape seja constante,
- Diminuição da razão de pressão devido ao menor fluxo de ar
- Diminuição da potência líquida e eficiência devido ao uso do GAF

Na tabela 4.1 tem-se a comparação entre uma turbina a gás usando o gás natural e GAF. Observa-se que vazão de combustível dos gases é bem diferente, sendo a vazão do GAF é aproximadamente 17 vezes maior que a de Gás Natural e isso ocorre principalmente devido ao baixo PCI do GAF. Além disso, a potência líquida produzida na turbina com uso de GAF é 26,5% menor que com Gás Natural.

Tabela 4.1 Características dos modelos utilizando-se gás natural e GAF

Tipo de Combustível	Gás natural (PCI = 47451 kJ/kg)	GAF (PCI = 2539 kJ/kg)
Vazão de ar (kg/s)	368,00	260,00
Vazão de combustível (kg/s)	6,95	115,00
Vazão de gás (kg/s)	374,95	375,00
Razão de pressão	15,50	5,84
Temperatura de entrada na turbina (°C)	1050,00	905,00
Temperatura de saída na turbina (°C)	530,00	540,00
Potência líquida (MW)	115,00	84,50
Eficiência (%)	33,88	28,93

Fonte: Silva (2004).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

Na parte do ciclo a vapor, o sistema de recuperação de energia é alimentado pelos gases de escape das turbinas a gás para aproveitar o calor para transformar a água em vapor. Além disso, o sistema possui queimadores auxiliares que podem utilizar o gás da coqueria para efetuar uma queima suplementar, com a finalidade aumentar a energia térmica disponível para o sistema. Este vapor gerado na caldeira de recuperação pode ser usado para geração de energia através de turbinas a vapor ou utilizado em processos que necessitam de vapor, como por exemplo os processos de dessalinização. SILVA (2004).

SILVA (2004) fez simulações utilizando o software GATE CYCLE® (2003) e considerando que o fornecimento de gases seja constante, assim tem-se que o ciclo

de turbinas a gás produz uma quantidade fixa de gases de escape. Assim, os gases que saem do ciclo de turbinas a gás são aproveitados na caldeira de recuperação para a produção de vapor, que posteriormente será transformado através das turbinas a vapor. As caldeiras de recuperação usadas no ciclo a vapor são classificadas de acordo com os níveis de pressão, podendo ser de um, dois ou três níveis de pressão.

A simulação realizada por SILVA (2004), forneceu dados para que pudesse ser feita a comparação da quantidade vapor gerado e da potência produzida pelos três sistemas de caldeira de recuperação propostos para o repotenciamento.

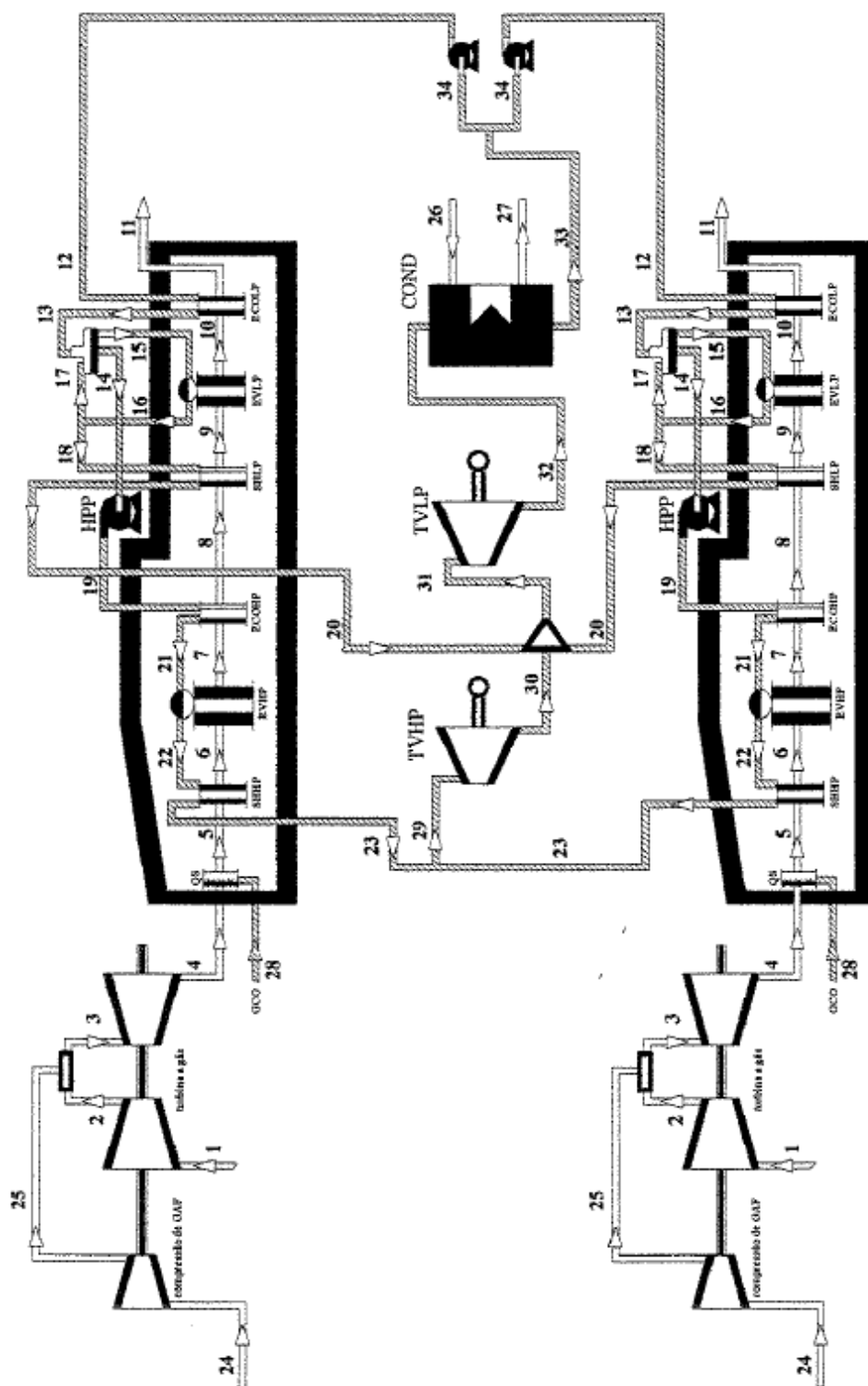
A seguir tem-se as figuras 4.1, 4.2, 4.3 que mostram as alterações na configuração da parte do sistema de geração de potência que contém a caldeira de recuperação.

Na figura 4.1 mostra o ciclo combinado com caldeira de recuperação com um nível de pressão, neste sistema os gases passam por um conjunto de trocadores de calor que produzem vapor a alta pressão e temperatura. O sistema opera com o desaerador integrado, ou seja, o vapor de alta temperatura a ser empregado no desaerador é gerado pelos gases de exaustão da turbina a gás. Isso possibilita um aumento na potência gerada, pois se evita o uso de extrações na turbina a vapor. SILVA (2004).

Na figura 4.2 mostra o ciclo combinado com caldeira de recuperação com dois níveis de pressão, este sistema com dois níveis de pressão gera vapor em níveis de alta (110 bar) e baixa (1,7 bar) pressão. Após o vapor ter passado pelo desaerador, ocorre a divisão do vapor em dois níveis. O vapor gerado no evaporador de baixa pressão é dividido em duas partes, uma delas suprindo o desaerador e um superaquecedor de baixa pressão. O restante passa pela bomba de alimentação gerando o vapor no conjunto economizador-evaporador-superaquecedor de alta pressão, expandindo-se na turbina de alta pressão. O vapor que sai da turbina de alta se junta ao vapor gerado no superaquecedor de baixa e são expandidos até a condensação na turbina de baixa pressão. SILVA (2004).

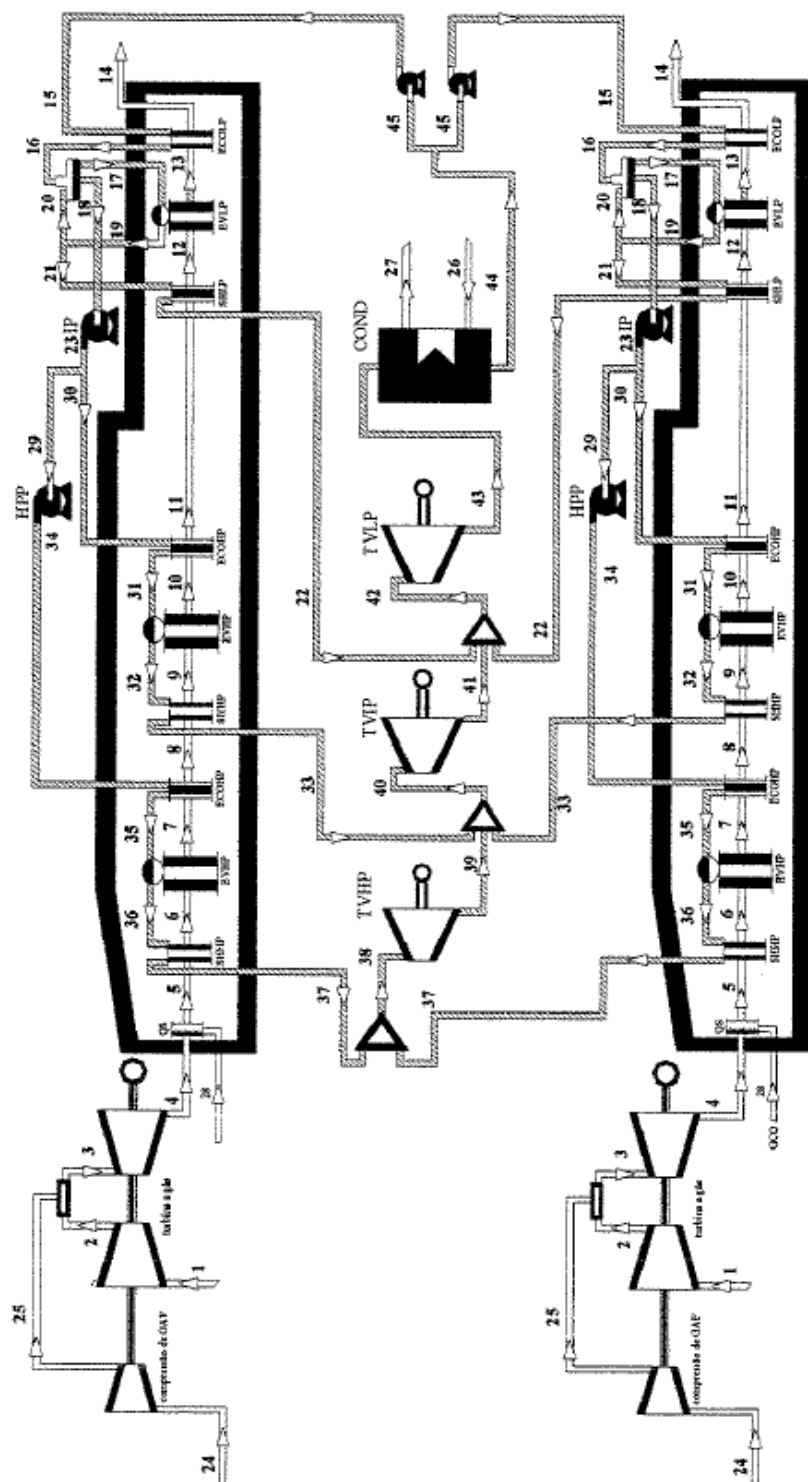
Na figura 4.3 mostra o ciclo combinado com caldeira de recuperação com três níveis de pressão, neste sistema o vapor é gerado em três níveis de pressão e expandido em três turbinas (alta, média e baixa pressão). SILVA (2004).

Figura 4.2 Ciclo Combinado – Caldeira de Recuperação 2 níveis de pressão



Fonte: Silva (2004).

Figura 4.3 Ciclo Combinado – Caldeira de Recuperação 3 níveis de pressão



Fonte: Silva (2004).

Tabela 4.2 Dados termodinâmicos da caldeira de recuperação com três níveis de pressão

Fluxo	Vazão (Kg/s)	T (°C)	P (bar)	h (KJ/Kg)
5	376,15	646,2	1,06	688,0
6	376,15	539,5	1,05	563,0
7	376,15	338,9	1,05	337,1
8	376,15	209,0	1,04	197,6
9	376,15	208,1	1,04	197,4
10	376,15	200,3	1,03	188,3
11	376,15	199,1	1,03	187,1
12	376,15	197,0	1,02	184,9
13	376,15	125,6	1,02	110,6
14	376,15	100,0	1,01	84,3
15	69,02	33,1	1,82	138,6
16	69,02	66,8	1,72	279,6
17	12,44	115,6	1,72	484,7
18	62,44	115,6	1,72	484,7
19	12,44	115,6	1,72	2.700,0
20	6,48	115,6	1,72	2.700,0
21	5,96	115,6	1,72	2.700,0
22	5,96	181,4	1,68	2.834,0
23	62,44	115,8	14,00	486,7
26	11.942,00	22,0	1,20	92,4
27	11.942,00	27,0	1,20	113,3
28	1,15	40,0	1,20	47,9
29	60,83	115,8	14,00	486,7
30	1,61	226,3	14,00	486,7
31	1,61	182,9	12,62	776,1
32	1,61	190,3	12,31	2.786,0
33	60,83	206,8	130,00	2.831,0
34	60,83	117,4	123,80	502,0
35	60,83	302,4	123,80	1.353,0
36	60,83	228,9	123,60	2.669,0
37	60,83	530,0	123,60	3.424,0
38	121,70	530,0	123,60	3.424,0
39	121,70	225,9	12,31	2.877,0
40	124,90	225,4	1,72	2.876,0
41	124,90	115,6	1,72	2.555,0
42	136,80	114,8	1,72	2.580,0
43	136,80	33,0	0,05	2.147,0
44	136,80	33,0	0,05	137,7
45	136,80	33,0	0,05	137,7

Fonte: Silva (2004).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

A tabela 4.2 mostra os valores de vazão, temperatura, pressão e entalpia para todos os pontos do ciclo a vapor da figura 4.3. Os fluxos 43 e 15 devem ser destacados, pois entre esses pontos que é estudado o modelo de dessalinização com energia térmica.

As simulações das três configurações da caldeira regenerativa realizadas por SILVA (2004) visam determinar a quantidade potência produzida em diferentes níveis de pressão, assim tendo uma comparação que ajude a quantificar qual alternativa energética que melhor atende à demanda exigida.

Tabela 4.3 Comparação entre os diferentes parâmetros dos três sistemas de caldeira de recuperação simulados

Configuração	1P	2P	3P
Área Superficial (m ²)	120508	166986	178860
Consumo de água no condensador (kg/s)	11412	12451	11942
Eficiência da 1ª Lei(%)	44,46	47,19	49,86
Potência consumida pelas bombas (MW)	2,14	2,33	2,22
Potência Líquida do Ciclo (MW)	308,74	323,32	332,60
Potência Total - Ciclo Vapor (MW)	141,84	156,77	165,96
Potência Turbina a Vapor (alta) (MW)	141,84	90,76	66,60
Potência Turbina a Vapor (intermediária) (MW)	-	-	40,10
Potência Turbina a Vapor (baixa) (MW)	-	66,02	59,26
Produção de Vapor (kg/s)	60,14	68,44	69,02

Fonte: Silva (2004).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

A tabela 4.3 mostra a comparação que dos diferentes resultados para cada um dos três níveis da caldeira recuperativa. Considerando a caldeira regenerativa com um nível de pressão como base, pode-se ver que a potência do ciclo a vapor aumenta 10,5 e 17% e a produção de vapor 13,8 e 14,8% usando-se o sistema de dois e três níveis de pressão respectivamente. Assim buscando um sistema otimizado a opção que apresenta os melhores resultados é o que possui mais níveis de pressão, porém

os sistemas com mais níveis de pressão, possuem uma área superficial e uma complexidade maior comparado aos sistemas com menores níveis de pressão, que aumentam o custo de implantação do projeto. Além disso, devido a maior capacidade de geração de vapor tem-se combinado a isso a necessidade de aumentar a quantidade de água usada no resfriamento. SILVA (2004).

4.2 INTEGRAÇÃO DA GERAÇÃO COM A DESSALINIZAÇÃO

Neste trabalho propõe-se a implantação de uma Planta Dual a partir o ciclo combinado do repotenciamento do sistema de potência de uma siderúrgica realizado por SILVA (2004). O ciclo da turbina a gás proposto originalmente é mantido, porém no sistema de caldeiras recuperativas existe a oportunidade de usar a energia elétrica excedente produzida pelas turbinas a vapor para produção de água dessalinizada com processos de dessalinização com energia elétrica ou até mesmo o usar uma parcela do vapor gerado na caldeira para obtenção de água dessalinizada através de processos de dessalinização com energia térmica. Além disso, para que seja realizado este estudo, deve-se escolher quantos níveis de recuperação terá o sistema de caldeira recuperativa.

Para o sistema de planta dual proposto neste trabalho, foi usado o sistema de caldeira recuperativa com três níveis de pressão, devido ao sistema ser mais eficiente, como também ter uma maior quantidade de vapor produzido.

Nas caldeiras recuperativa, a energia excedente produzida a partir do repotenciamento, foi usada de duas formas:

- Um sistema onde todo o vapor gerado na caldeira recuperativa é transformado em energia elétrica através das turbinas a vapor. Retirando a parcela de energia elétrica necessária para o processo da siderurgia, tem-se o uso da energia elétrica restante direcionada para um processo de dessalinização com energia elétrica.
- No sistema híbrido, a turbina de baixa pressão e o condensador é retirado para dar espaço há um processo de dessalinização com energia

térmica. Retirando a parcela da energia elétrica necessária para o processo da siderurgia, tem-se o uso da energia elétrica excedente produzida pelas turbinas a vapor de alta e média pressão em um processo de dessalinização com energia elétrica.

Para esses dois casos são feito uma análise térmica, para que a partir dos resultados obtidos possa ser avaliado e comparado os modelos propostos, com o objetivo de concluir qual processo é mais vantajoso e produtivo, considerando a disponibilidade das tecnologias e a quantidade necessária de geração de água dessalinizada.

4.2.1 Dessalinização com Energia Elétrica

No processo de dessalinização usando apenas eletricidade para a obtenção de água, tem-se a RO e Eletrodiálise. A tecnologia de dessalinização por RO está muito bem difundida no mundo, sendo o processo de dessalinização mais comum de se observar no comércio e com o maior volume de pesquisas, sendo assim um processo mais simples e mais avançado tecnologicamente. Existem pesquisas em Eletrodiálise, porém se comparado com a RO o número é menor e o custo elevado. Logo, tendo como base as vantagens do uso da RO comparado com a Eletrodiálise, é usado o processo de dessalinização com energia elétrica nesse estudo. KHAWAJI (2007).

Como base de comparação, neste estudo é considerado que todo o vapor produzido na caldeira recuperativa é usado para a produção de energia elétrica em turbinas a vapor. Essa eletricidade é somada com a produzida nas turbinas a gás e então retira-se a quantidade de energia elétrica necessária no processo da siderurgia, o excedente é usado no processo de dessalinização por RO.

As unidades de dessalinização de Jeddah e Ras Al-Khair são localizadas na Arábia Saudita, tendo como diferença as propriedades da água bruta e a água dessalinizada que sai do processo. Pode-se ver na tabela 4.4 que a água dessalinizada na Ras Al-Khair tem uma menor concentração de sais na água, porém a água bruta (Golfo) usada no processo possui uma salinidade maior que Jeddah, que

usa como água bruta a água do Mar Vermelho. Assim, fica claro que o processo produtivo de Ras Al-Khair purifica melhor a água bruta, sendo mais complexo e aprimorado. IHM (2016).

Um detalhe importante que deve ser visto na tabela 4.4 é que as membranas possuem necessidade de serem trocadas 4 vezes ao ano. Isso é um fator que influencia bastante no processo, devido ao custo de troca das membranas, como também a necessidade de parar o sistema de filtragem para as trocas, o que acarretará na redução ou suspender a produção de água dessalinizada.

Tabela 4.4 Comparação de processos de dessalinização RO de Jeddah (Mar Vermelho) e Ras Al-kair (Golfo)

Dados do Projeto	SWRO (Mar Vermelho)	SWRO (Golfo)
Configuração	G-DMF+ 2 ciclos parciais no RO	DAF+G-DMF+ 2 ciclos completos no RO
Salinidade da água do mar	43.300 ppm	47.000 ppm
Salinidade da água dessalinizada	85 ppm	26,5 ppm
Recuperação Global	38,95%	31.5%
Relação de substituição da membrana	10% / ano (1ª e 2ª estágio)	
Substituição do filtro do cartucho	4 vezes / ano	

Fonte: Ihm, et al. (2016).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

O consumo específico de energia no processo de dessalinização de Jeddah é de 5,2 kWh/m³, incluindo a eletricidade usada no processo de remineralização, enquanto que o processo de Ras Al-Khair é de 6,06 kWh/m³. Está claro no consumo o processo de dessalinização de Ras Al-Khair, consome mais energia, porém isso pode ser explicado devido as condições alta salinidade como também a alta turbidez da água bruta utilizada no processo. Além disso, esse consumo mais elevado está justificado em um sistema mais complexo de dessalinização, onde que mesmo com uma água bruta sendo mais salina é produzido uma água mais pura que Jeddah. IHM (2016).

As propriedades da água bruta usada para dessalinização no Brasil são diferentes do estudado por IHM (2016), devido à uma menor concentração de sal na água. Isso pode visto na tabela 4.5 que mostra os valores de salinidade de mares e

oceanos, comprovando que a salinidade da água do Atlântico é menor que a salinidade da água usada nos processos da Arábia Saudita.

Tabela 4.5 Salinidade Média de Águas Marinhas

Mar ou Oceano	Salinidade (ppm)
Mar Báltico	28.000
Mar do Norte	34.000
Mar Vermelho	44.000
Mar Morto	50.000 - 80.000
Mar Mediterrâneo	36.000
Golfo Pérsico	43.000 - 50.000
Oceano Pacífico	33.600
Oceano Atlântico	36.000
Média Mundial	34.800

Fonte: Uche, et al. (2002).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

Provavelmente, em consequência à menor concentração de sais na água do litoral brasileiro, o consumo específico de energia pode ser um pouco menor que o consumo específico de energia nos processos de dessalinização da Arábia Saudita. Porém, este estudo busca fazer uma avaliação e comparação das tecnologias de dessalinização, para isso ser feito é usado os valores SPC (consumo específico de energia) relativo ao processo de dessalinização RO de Jeddah, que possui características mais próxima ao litoral brasileiro IHM (2016).

O repotenciamento de SILVA (2004) mostra um sistema com duas caldeiras regenerativa com três níveis de pressão e este vapor produzido nas caldeiras é transformado nas turbinas a vapor para produção de 165,9 MW. Esses dados podem ser conferidos na tabela 4.6 que mostra a quantidade de energia em cada estágio.

Tabela 4.6 Dados da caldeira regenerativa com três níveis de pressão

	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3
Vazão vapor (Kg/s)	121,70	124,90	136,80
Entalpia h (KJ/Kg)	547,00	321,00	433,00
Trabalho em Turbinas a vapor (MW)	66,57	40,09	59,23

Fonte: Silva (2004).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

Uma parte da produção de energia elétrica produzida pelas turbinas a vapor é destinada ao processo industrial da siderurgia, como pode ser visto na tabela 4.7. Faz-se necessário o consumo parcial de eletricidade produzida pelas turbinas a vapor, porque o processo de geração de energia elétrica a partir de turbinas a gás produz apenas 169,04 MW, enquanto o processo siderúrgico necessita de 175 MW. Assim, após retirar a quantidade de eletricidade necessária para o processo siderúrgico, tem-se que o restante da energia elétrica é usado para o processo de dessalinização RO.

Tabela 4.7 Distribuição energética do sistema de potência

Tipos Potência	(KW)
Requerida no Processo Siderúrgico	175.000,00
Produzida nas 2 Turbina a gás	169.040,00
Total Produzida no Ciclo Combinado	334.937,20
Disponível para Dessalinização	159.937,20

Fonte: Autor

Tabela 4.8 Comparação de unidade dessalinizadoras RO

	SWRO Golfo	SWRO Mar Vermelho
SPC [kWh/m ³]	6,06	5,20
Eletricidade Disponível (MW)	159,94	159,94
Volume de Água Dessalinizada (m ³ /h)	26.392,28	30.757,15
Volume de Água Dessalinizada (m ³ /dia)	633.414,65	738.171,69

Fonte: Autor

Na tabela 4.8 mostra a comparação dos dois processos de dessalinização RO modelados neste trabalho. Tomando como base as unidades do artigo de IHM (2016), tem-se que por possuir um consumo específico de energia menor, o modelo semelhante ao de Jeddah (Golfo) tem capacidade produtiva de 738.171,69 m³/dia de água dessalinizada consumindo 159,94 MW. O modelo semelhante ao de Ras Al-Khair (Mar Vermelho) produz 633.414,65 m³/dia. Logo, como o modelo de Jeddah possui características mais semelhantes ao litoral Brasileiro, como por exemplo uma menor concentração de sais na água, pode-se considerar que a produção de processos de dessalinização no Brasil é próxima ao modelo que está em operação em Jeddah, podendo até ter uma produção maior de água dessalinizada.

4.2.2 Dessalinização Híbrida

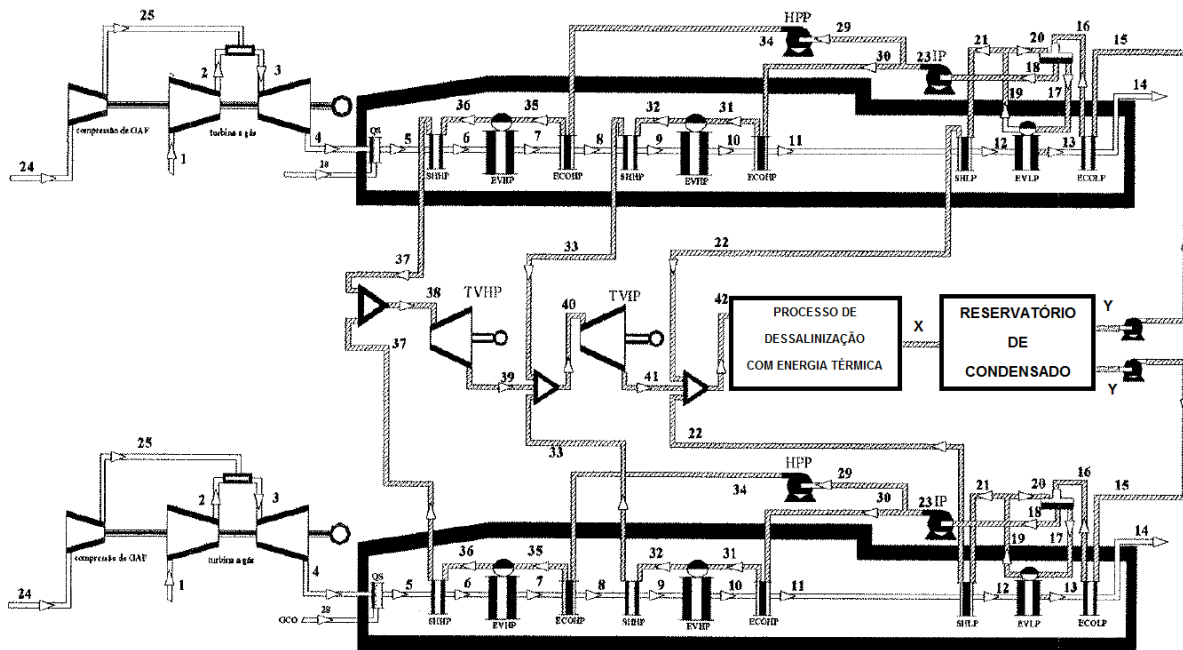
O processo híbrido é composto pela junção de dois processos de dessalinização, sendo uma parte com energia elétrica e a outra energia térmica. Aplicando esse conceito no projeto em questão, o sistema fica configurado da seguinte forma:

- O sistema de geração de energia através de turbinas a gás permanece da mesma forma, sem sofrer qualquer tipo de alteração. A parte da caldeira regenerativa e as turbinas a vapor, passa por algumas mudanças de projeto.
- O vapor que circula na turbina de baixa pressão possui características semelhantes ao que é usado em processos de dessalinização por energia térmica, assim retira-se a turbina a vapor de baixa pressão e o condensador, no lugar nos dois coloca-se o processo de dessalinização como pode ser visto na figura 4.4.
- A eletricidade excedente produzida pelas turbinas de alta e média pressão é usada no processo de dessalinização RO. Como visto na seção anterior, o processo de dessalinização de Jeddah produz um volume maior de água dessalinizada, sendo assim o mesmo tipo de processo é usado para a dessalinização híbrida.

Vale lembrar que uma das grandes vantagens da dessalinização híbrida está na possibilidade de controle da quantidade de água e energia que é produzido no processo. Logo, em momentos onde precise de uma maior demanda de eletricidade, pode-se simplesmente desligar o processo de dessalinização RO e aproveitar a energia elétrica das turbinas a vapor em outro processo. Da mesma forma pode-se fazer o mesmo quando for necessária uma maior demanda de água.

Na figura 4.4, usando como base o modelo de SILVA (2004), tem-se o repotenciamento de um sistema de geração de potência, com a mudança para ciclo combinado. A parte do ciclo combinado onde é composta por caldeiras regenerativas e turbinas a vapor, tira-se a turbina de baixa pressão e no lugar entra o processo de dessalinização com energia térmica e o reservatório de condensado que sai do processo de dessalinização. Como as propriedades do fluido em Y são diferentes quando comparada ao projeto original, ocorre uma mudança no consumo elétrico das bombas que estão logo após o reservatório, essa mudança foi levada em consideração, mesmo que devido as condições de projeto, não modificassem muito em relação ao consumo de energia elétrica.

Figura 4.4 Caldeira regenerativa com três níveis de pressão com mudanças para o processo de dessalinização híbrida



Fonte: Silva (2004).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

No mercado pode-se encontrar uma gama de dessalinizadoras MSF e MED, porém o custo financeiro de implantação, manutenção e operação cresce da mesma forma, com que se tem o aumento da área de transferência de calor e quantidade nos estágios no MSF e a quantidade efeitos no MED. IHM (2016).

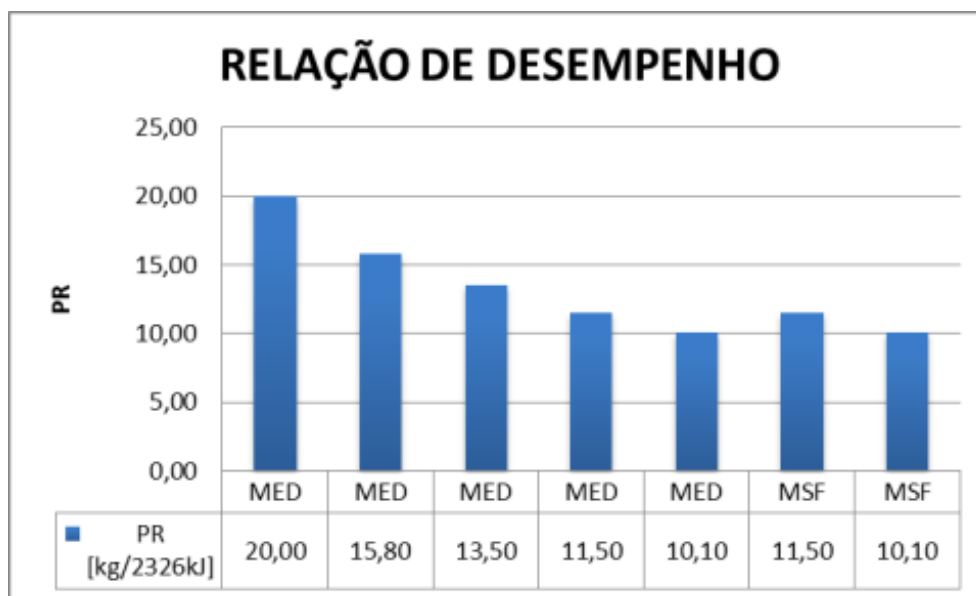
Para os processos de dessalinização com energia térmica, pode-se usar como ferramenta de comparação dois parâmetros: PR (relação de desempenho) e SPC (consumo específico de energia). A dessalinização com energia térmica, como a dessalinização com energia elétrica, possui vários tipos e modelos de unidades dessalinizadoras. Neste estudo foi feito o modelamento e comparação usando dois tipos: dessalinização MED-TVC e MSF (BR-CT). O modelo MSF (BR-CT) foi o escolhido entre os modelos de MSF, devido ao seu maior PR quando comparado a outros modelos, isso ocorre devido à modelos de MSF que possui BR (recirculação da salmoura) e CT (tubos transversais) apresentam um melhor aproveitamento da energia térmica. Da mesma forma, o dessalinizadores MED que apresentam o melhor

desempenho é o MED-TVC, graças ao processo de Termocompressão do Vapor que garante um maior aproveitamento de energia.

IHM (2016) compara e fornece dados de seis processos de dessalinização com energia térmica, sendo quatro modelos de dessalinização MED-TVC e dois modelos de dessalinização MSF (BR-CT). Cada um desses processos, possui parâmetros diferentes, o que garante que o PR e SPC desses modelos seja bastante diversificado.

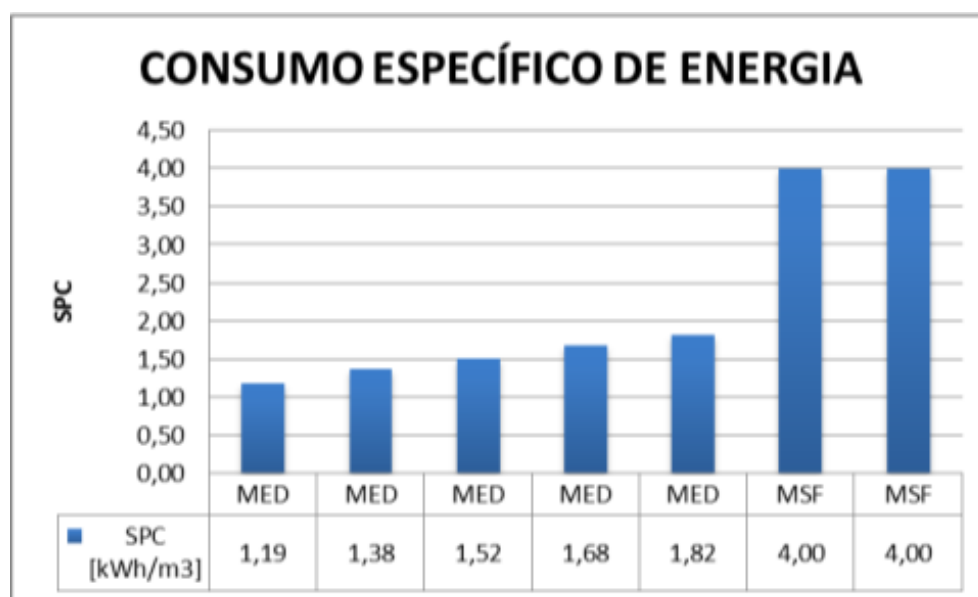
Nas figuras 4.5 e 4.6 pode-se observar que o consumo específico de eletricidade dos processos de dessalinização MSF (BR-CT) é mais elevado que o consumo específico do MED-TVC. Além disso, o MED-TVC apresenta modelos com PR maior o que não é possível em modelos MSF, pois, segundo IHM (2016), unidades MSF em termos práticos tem como limite o $PR = 11$.

Figura 4.5 Comparação da relação de desempenho dos dessalinizadores



Fonte: Autor

Figura 4.6 Comparação consumo específico de energia dos dessalinizadores



Fonte: Autor

Com a retirada da turbina a vapor de baixa pressão e o condensador, coloca-se unidades de dessalinização com energia térmica. O modelamento é feito usando os parâmetros obtidos no artigo de IHM (2016), o que deu origem a vários modelos de dessalinização híbridas. Os parâmetros para o processo de dessalinização RO foram usados do modelo de Jeddah devido às explicações que justificam a escolha do mesmo.

Na tabela 4.9 pode-se ver o comparativo das seis modelagens. Observa-se que a produção diária de água dessalinizada em processos com energia térmica é maior geralmente em modelos MED-TVC, isso ocorre devido à melhor relação de desempenho e um menor consumo específico de energia quando comparado aos modelos MSF (BR-CT). Além disso, o volume total de água dessalinizada em processos de dessalinização híbrida é menor que o volume total produzido quando se tem apenas o processo de dessalinização RO.

Tabela 4.9 Comparação de unidades dessalinizadoras híbridas

Parâmetros	MED-TVC					MSF (BR-CT)	
PR [kg/2326kJ]	20,00	15,80	13,50	11,50	10,10	11,50	10,10
Volume de Água Dessalinizada (m ³ /dia)	236.444,16	186.790,89	159.599,81	135.955,39	119.404,30	125.456,07	110.183,16
Consumo de Energia Térmica (KW)	318.269,17	318.269,17	318.269,17	318.269,17	318.269,17	293.690,45	293.690,45
Consumo de Energia Elétrica (KW)	11.723,69	10.740,48	10.107,99	9.516,88	9.054,83	20.909,35	18.363,86
Consumo Específico Térmico (KWh/m ³)	32,31	40,89	47,86	56,18	63,97	56,18	63,97
Consumo Específico Elétrico (KWh/m ³)	1,19	1,38	1,52	1,68	1,82	4,00	4,00
Excedente de Eletricidade (KW)	87.026,97	88.010,19	88.642,68	89.233,79	89.695,84	77.841,32	80.386,80
Volume de Água Dessalinizada RO (m ³ /h)	16.735,96	16.925,04	17.046,67	17.160,34	17.249,20	14.969,48	15.459,00
Volume Total de Água Dessalinizada (m ³ /dia)	638.107,12	592.991,76	568.719,85	547.803,64	533.385,09	484.723,70	481.199,18

Fonte: Autor

SANTOS (2005) em sua dissertação faz o estudo de duas unidades dessalinizadoras MED-TVC, onde que um modelo produz 2.400 m³ / dia e o outro 400 m³ / dia. Quando comparados com os dessalinizadores estudados por IHM (2016), pode-se dizer que o consumo específico térmico e de eletricidade diminuíram, o que comprova a evolução dos modelos de dessalinização ao longo do tempo.

Na figura 4.7 mostra os parâmetros dos modelos de unidades dessalinizadoras MED que foram estudados por SANTOS (2005). Nessa tabela pode ser visto que os parâmetros do dessalinizadora MED2400 são similares aos parâmetros onde é inserido o processo de dessalinização com energia térmica na planta de geração de potência de SILVA (2004).

Tabela 4.10 Modelos de unidades dessalinizadoras MED estudado por Santos (2005)

Parâmetros	MED2400	MED400
Temperatura do vapor na entrada (°C)	136	175,4
Pressão do vapor na entrada (bar)	2	9
Vazão de vapor (Kg/s)	3,19	0,47
Temperatura do condensado na saída (°C)	60,2	61
Pressão do condensado na saída (bar)	p_{atm}	p_{atm}
Vazão de condensado (Kg/s)	3,19	0,47
Volume de Água Dessalinizada (m ³ /dia)	2.400	400
Consumo Específico Térmico (KWh/m ³)	79,41	63,35
Consumo Específico Elétrico (KWh/m ³)	2	2

Fonte: Santos (2005).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

No próximo capítulo é feito uma análise comparativa, para que assim seja comparado os processos de dessalinização RO e híbrida. Com isso, tem-se um entendimento maior dos motivos e razões que explicarão a diferença de desempenho dos modelos propostos neste trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados deste trabalho é composta da apresentação e comentários dos valores encontrados na comparação das tecnologias de dessalinização de RO e Híbrida. Além disso é feito uma comparação dos diversos modelos usados no capítulo 4, para que assim seja feito as conclusões finais.

5.1 DESSALINIZAÇÃO COM OSMOSE REVERSA

Os dois modelos de dessalinizadores RO, tanto o usado em Jeddah, quanto o usado em Ras Al-Khair, apresentam uma produção considerável de água dessalinizada. Devido à grandes pesquisas acerca do processo de RO, pode-se hoje ter uma produção maior, por um consumo de eletricidade menor. Plantas de RO consomem em média 6–8 kWh/m³, porém com a instalação de sistemas de recuperação de energia, o consumo cai para 4–5 kWh/m³. KHAWAJI (2007).

A instalação de sistemas de recuperação de energia se torna uma alternativa para o aumento de desempenho de dessalinizadores RO, uma simples turbina Pelton é capaz de aproveitar a energia da água que pressurizada no processo, transformando em energia elétrica para dessalinização.

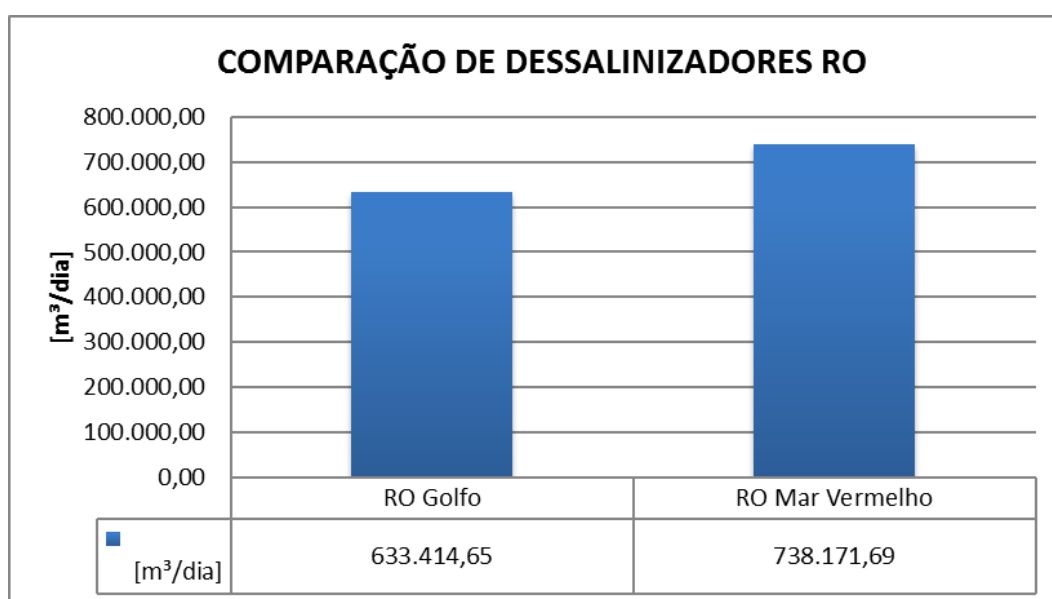
Alguns fatores devem ser levados em conta também quando é escolhido o processo RO, pois vale lembrar que a água bruta passa por vários tratamentos químicos antes e depois de passar pelas membranas o que aumenta o custo do processo. Além disso, tem-se a necessidade de troca das membranas. Os processos citados por IHM (2016), mostra a necessidade de 4 trocas de membranas ao ano, essa troca influencia em dois fatores:

- Enquanto ocorre as trocas das membranas, o sistema tem a necessidade de ficar parado. Isso influencia diretamente na produção de água, se o sistema não for superdimensionado pode-se ter problemas no abastecimento.

- O custo da troca de membranas deve ser bem planejado pois, a longo prazo, este custo pode tornar a tecnologia mais cara quando comparada a processos de dessalinização térmica.

Na tabela 5.1 é feito o comparativo dos modelos propostos. De fato, o modelo que possui um menor consumo específico de energia se mostrar mais eficiente e produz um volume maior de água dessalinizada.

Figura 5.1 Comparação de dessalinizadores RO



Fonte: Autor

De acordo com os artigos de KHAWAJI (2007) e IHM (2016), o valor de 5,2 kWh/m³ é um valor razoável para ser usado em comparações de dessalinizadores RO.

5.2 DESSALINIZAÇÃO HÍBRIDA

A dessalinização híbrida deve ser analisada em duas frentes: dessalinização MED-TVC + RO e dessalinização MSF (BR-CT) + RO. Ao longo do capítulo tem-se a comparação dos resultados, de forma que no final é obtido como resultado o sistema que possui um melhor rendimento e produção.

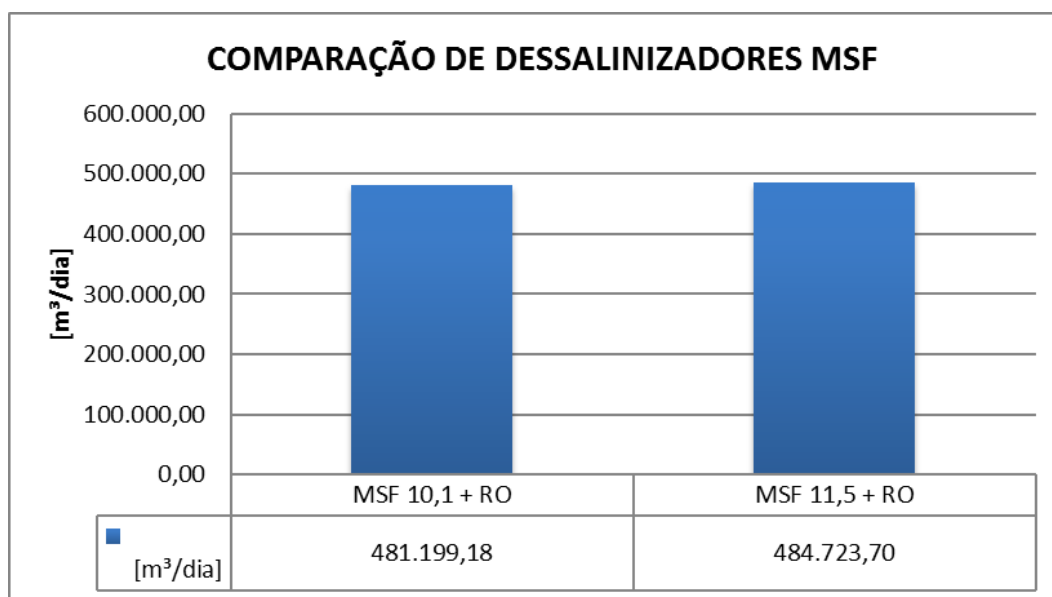
5.2.1 Dessalinizadores MSF

Mesmo possuindo uma relação de desempenho menor que modelos MED e consumindo mais energia elétrica, a dessalinização MSF tem sido preferida devido sua alta disponibilidade.

Disponibilidade é definida pelas horas anuais de serviço, que consiste nas horas de produção mais horas de desligamento da unidade de reserva, dividido pelo número de horas por ano, 8760. A disponibilidade de unidades MSF em todo mundo é bastante elevada. Por exemplo, em 2000 as unidades de MSF de Doha, atingiram 86% de disponibilidade, mesmo que tenham sido construídas há mais de 18 anos. Além disso é um processo com muito bem conhecido e desenvolvido, contando com uma seleção comprovada de materiais e sem partes móveis, exceto as bombas auxiliares do sistema. DARWISH (2002).

A figura 5.2 mostra a análise feita para dessalinizadores MSF. Como nos dessalinizadores RO, aqui também possui sistemas com diferente desempenho. Logicamente, embarcando novas tecnologias, seja por meio de material ou mesmo detalhes de projeto, tem-se uma melhora significativa de desempenho. Se for comparar apenas a parte de dessalinização térmica, pode-se observar que o sistema MSF (BR-CT) com $PR = 10,1$ tem capacidade de produção de $110.183,16 \text{ m}^3/\text{dia}$, enquanto o sistema MSF (BR-CT) com $PR = 11,5$ tem capacidade de produção de $125.456,07 \text{ m}^3/\text{dia}$, mostrando assim um melhor desempenho. Porém devido ao consumo específico de energia elétrica, os sistemas híbridos MSF produzem um volume praticamente igual no final do processo. Sendo assim, ao adotar um sistema híbrido onde a capacidade mínima de água seja atingida pelos dois sistemas de dessalinização RO, pode-se dizer que o sistema MSF (BR-CT) com $PR = 10,1$ se mostra tão eficiente quando o com $PR = 11,5$.

Figura 5.2 Comparação de dessalinizadores MSF



Fonte: Autor

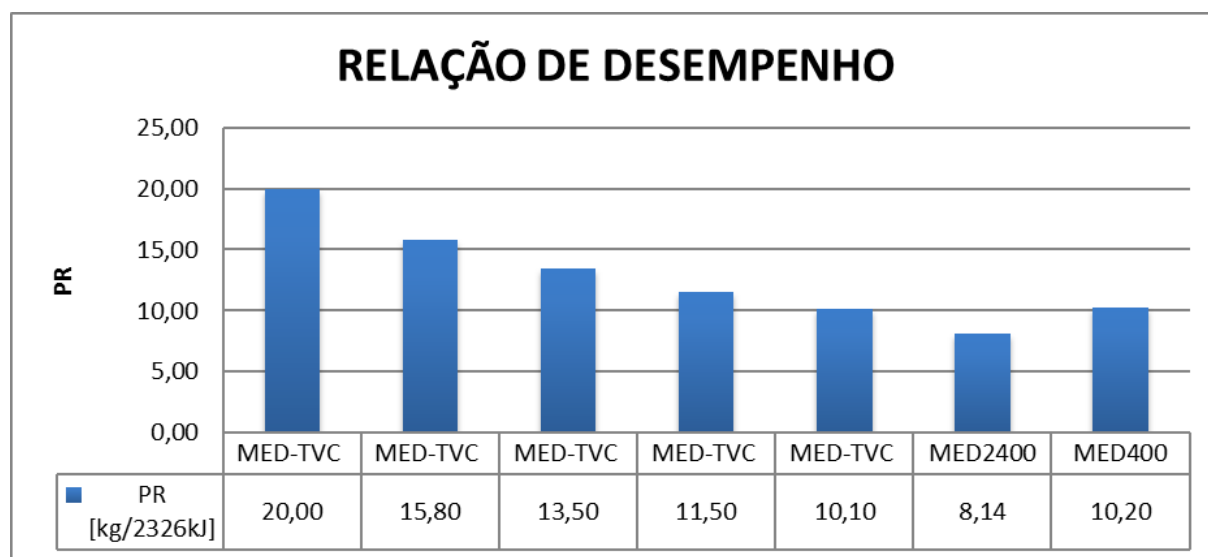
Os modelos usados no estudo possuem uma relação de desempenho e um consumo específico de energia relativamente melhor que em sistemas citados em artigos como o de DARWISH (2002). Quando se compara o consumo específico de energia citado no trabalho de IHM (2016), é evidente a evolução tecnológica que ocorreu nos sistemas de dessalinização ao longo do tempo.

5.2.2 Dessalinizadores MED

A evolução deste tipo de unidade dessalinizadora pode ser acompanhada com o passar do tempo. Comparando os dessalinizadores de SANTOS (2005) com os de IHM (2016), é evidente o aumento da relação de desempenho dos modelos mais recentes, dessa forma há um aumento na quantidade de água dessalinizada no processo, devido a um melhor aproveitamento da energia térmica. Esse avanço tecnológico veio de investimentos nos projetos, processos e tecnologias envolvidas neste processo, fazendo com que o MED-TVC se destaque entre os outros.

Na figura 5.3 pode-se ver a evolução da relação de desempenho dos dessalinizadores MED, sendo que o MED2400 e MED400 foram estudados por SANTOS (2005) e o outros por IHM (2016).

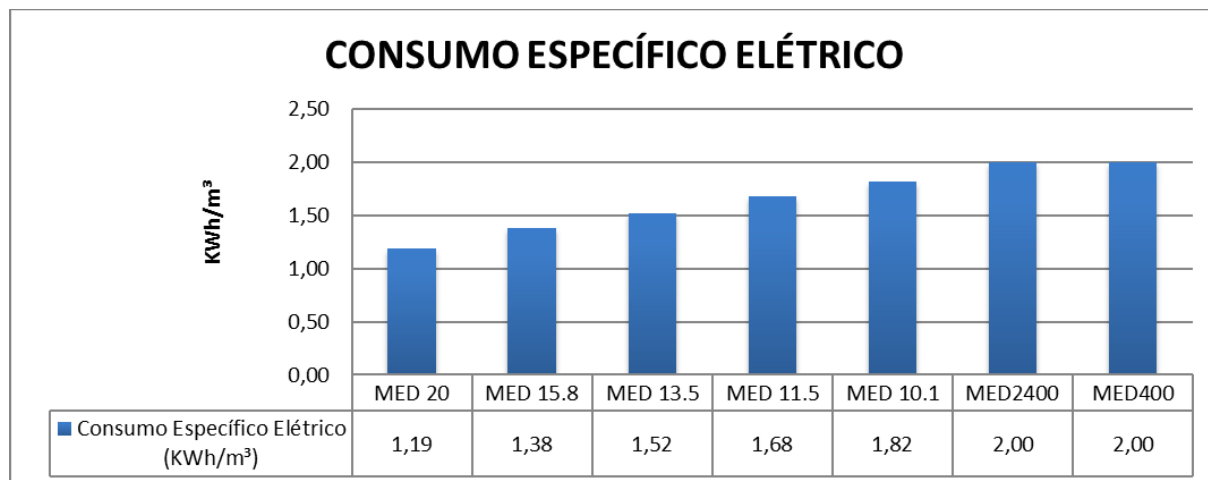
Figura 5.3 Relação de desempenho dos dessalinizadores MED



Fonte: Autor

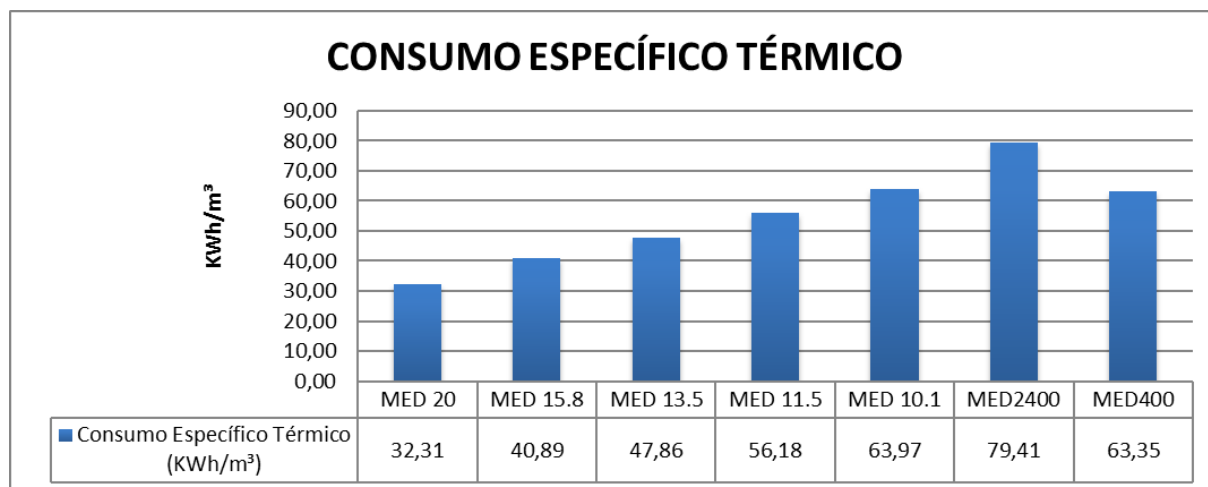
O consumo específico elétrico e térmico fornece dois parâmetros interessantes de ser observados e analisados. Na figura 5.4 pode-se ver a diferença do consumo específico elétrico, o modelo que possui o maior PR produz a mesma quantidade de água que os modelos antigos, com apenas 59,5% da energia que era gasta no processo, sendo assim, tem uma maior produção de água dessalinizada com um menor consumo de eletricidade.

Figura 5.4 Consumo Específico Elétrico dos dessalinizadores MED



Fonte: Autor

Figura 5.5 Consumo Específico Térmico dos dessalinizadores MED

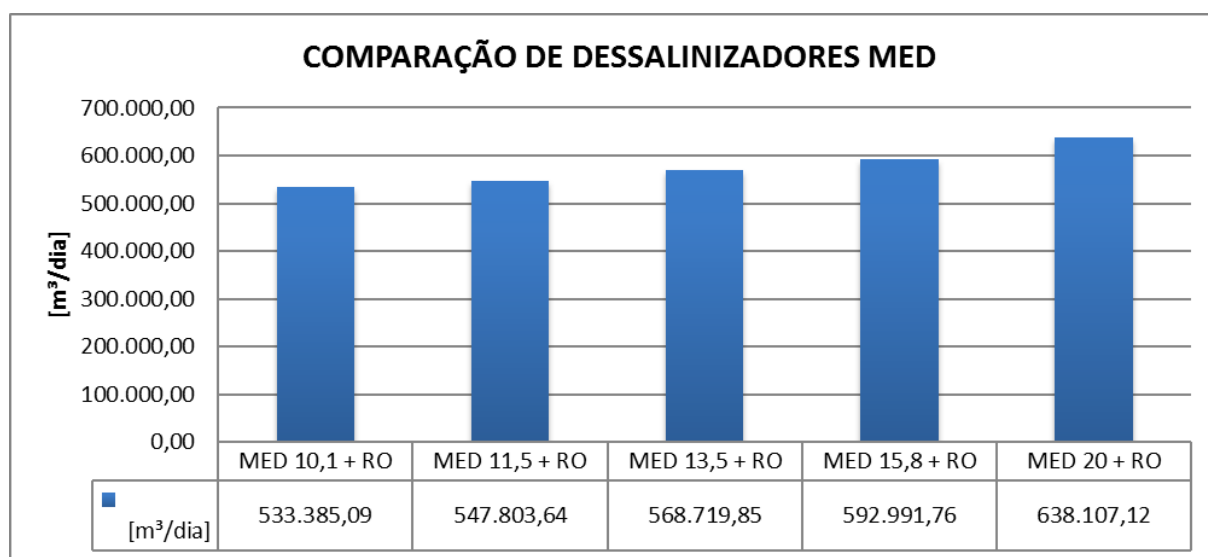


Fonte: Autor

Quando comparado os modelos tomando como parâmetro o consumo específico de energia, tem-se um aumento considerável no desempenho térmico. A dessalinizadora MED2400 consome 79,41 KWh/m³, enquanto a MED com PR = 20 consome 32,31 KWh/m³, tendo assim uma redução de 59,31% do consumo de energia térmica. Essa redução demonstra uma grande evolução no projeto dos MED-TVC, isso resulta em processos que consome menos combustível ou consuma a mesma

quantidade de combustível, porém produzindo uma quantidade relativamente maior de água.

Figura 5.6 Comparação dos dessalinizadores MED



Fonte: Autor

A figura 5.6 mostra a análise feita para dessalinizadores MED-TVC. Como nos dessalinizadores RO e MSF, essa comparação também possui sistemas com diferente desempenho mostrando os diversos modelos existentes no mercado.

Tabela 5.1 Produção de água dos dessalinizadores MED

	MED-TVC				
PR [kg/2326kJ]	20,00	15,80	13,50	11,50	10,10
Volume de Água Dessalinizada (m³/dia)	236.444,16	186.790,89	159.599,81	135.955,39	119.404,30

Fonte: Autor

Ao fazer a substituição da turbina a gás de baixa pressão por um sistema de dessalinização MED-TVC, tem-se o volume de água dessalinizada exibido na tabela 5.1. Observa-se que os sistemas possuem uma variação considerável no volume de

água dessalinizada produzido quando se observa apenas o volume da dessalinização com energia térmica, sendo que quando comparado o de maior com o de menor desempenho, existe um acréscimo de 98% do volume de água dessalinizada.

Devido ao grande volume de água produzida em unidade RO com a energia excedente das turbinas de alta e média pressão, quando se refaz a comparação dos sistemas híbridos, a diferença percentual do maior com o de menor desempenho diminui para apenas 19,63%.

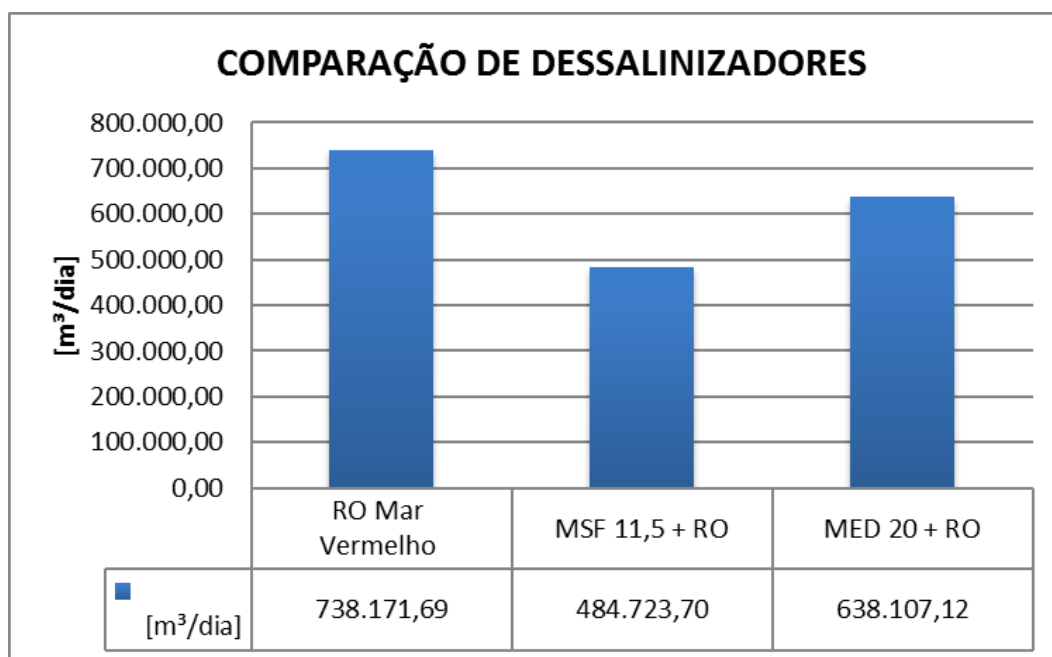
Os sistemas de dessalinização MED-TVC, quando comparado ao processo MSF apresentaram um melhor desempenho, produzindo, conseqüentemente, um maior volume de água, demonstrando ser um sistema mais eficiente. As publicações mais recentes acerca de processos híbridos, demonstram a tendência dos sistemas MED-TVC combinado com RO serem mais comumente utilizados que MSF combinado com RO. DARWISH (2002).

5.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste trabalho destacam-se três modelos, sendo que em cada um tipo de processo foi escolhido um modelo que produz mais água dessalinizada quando comparados aos outros modelos.

A tabela 6.1 mostra a comparação dos os melhores modelos de dessalinização RO, MED-TVC, MSF (BR-CT), de forma a esclarecer, as diferenças na quantidade de água dessalinizada em cada processo.

Figura 5.7 Comparação dos melhores dessalinizadores



Fonte: Autor

Analisando os dados da figura 6.1 pode-se concluir que o processo que produz mais água dessalinizada é o de dessalinização RO, produzindo 15,68% a mais que o melhor processo híbrido, que nesse caso é o MED-TVC. O processo MSF (BR-CT) que produz mais água dessalinizada produz apenas 65,66% quando comparado ao RO.

Assim, levando em conta unicamente o volume de água dessalinizada, fica clara a preferência pelo processo RO devido à sua maior produção, porém algumas características do projeto, faz com que o processo híbrido seja mais vantajoso na maioria dos casos onde tem-se disponível energia térmica ao invés de unicamente energia elétrica.

6 CONCLUSÃO

Este capítulo contém o desenvolvimento do presente estudo com uma análise aprofundada e apuração dos resultados obtidos. Além disso, uma proposição para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES FINAIS

Partindo da repotenciação de uma central termelétrica a vapor de uma usina siderúrgica, este trabalho apresentou a proposta de implementação de uma planta dual, com enfoque em dessalinização. Os processos de dessalinização modelados neste trabalho foram RO, MED-TVC e MSF (BR-CT), visto que esses três sistemas possuem maior eficiência e desenvolvimento tecnológico quando comparados aos outros. Além disso, esses processos foram estudados por IHM em 2016, o que faz com que este trabalho seja baseado em informações e tecnologias recentes.

Para a avaliação dos modelos de dessalinização, foi proposto duas abordagens diferentes de implantação no processo da Planta Dual:

- Um sistema onde todo o vapor gerado na caldeira recuperativa é transformado em energia elétrica através das turbinas a vapor. Retirando a parcela de energia elétrica necessária para o processo da siderurgia, tem-se o uso da energia elétrica restante direcionada para um processo de dessalinização com energia elétrica.
- No sistema híbrido, a turbina de baixa pressão e o condensador é retirado para dar espaço há um processo de dessalinização com energia térmica. Retirando a parcela da energia elétrica necessária para o processo da siderurgia, tem-se o uso da energia elétrica excedente produzida pelas turbinas a vapor de alta e média pressão em um processo de dessalinização com energia elétrica.

Concluiu-se o decorrer deste trabalho que os processos de dessalinização com energia térmica, apresentam uma maior confiabilidade. Prova disso é o fato de muitos sistemas MED e MSF estarem em operação a bastante tempo e ainda hoje o rendimento dessas plantas não diminuíram de forma perceptível.

Em relação à osmose reversa, nos últimos anos, os progressos realizados nas tecnologias de recuperação de membranas e energia ajudaram a impulsionar sua utilização e conquistar uma maior fatia do mercado mundial de dessalinização de água do mar. Porém, uma desvantagem deste sistema está na necessidade de uma parada geral da produção para que seja efetuada as trocas das membranas, afetando assim o abastecimento de água, pois os sistemas de dessalinização geralmente não possuem grandes reservatórios de água, dessa forma, processos onde há necessidade de fluxo contínuo de água dessalinizada, essa parada na produção torna-se um empecilho. Além disso, as trocas de membranas, também aumentam o desembolso financeiro, visto que mesmo que tenha ocorrido a redução do preço das membranas, devido a evolução dos materiais e reciclagem, o custo ainda é representativo. Em contrapartida, o custo de implementação do sistema RO é menor que os processos de dessalinização com energia térmica.

Já em relação a dessalinização híbrida, concluiu-se que seu principal objetivo é somar o melhor da tecnologia de dessalinização com energia térmica com o melhor processo que usa apenas energia elétrica. Sendo assim este processo pode melhorar e facilitar vários aspectos da dessalinização, como por exemplo:

- Capacidade de melhorar a qualidade da água dessalinizada, através de misturas da água que sai dos processos de dessalinização com energia elétrica e térmica. Com isso, reduz as exigências restritas na remoção do boro, através desta mistura.
- A mistura da água que sai dos processos na dessalinização híbrida, permite também operar a unidade RO com TDS relativamente elevada, conseqüentemente, permite baixar a taxa de substituição das membranas. A mistura da água do produto RO com a água destilada de alta pureza dos processos de dessalinização com energia térmica, permite que se atenda aos padrões de qualidade da água do produto, mantendo assim uma longa vida útil das membranas.
- De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica – IAEA em 2015, para todas as membranas, a produção de água varia em função da temperatura, assim existe um aumento de 1,5-3% na produção de água por

grau Celsius para quase todas as membranas. Esse aumento de temperatura ocorre devido a água usada no processo RO ser o rejeito do processo MED ou MSF, tendo então uma maior temperatura, com isso uma redução do número necessário de módulos de membrana RO. Com o aumento da vida útil da membrana RO, pode estender-se por 3 a 5 anos, logo o custo anual de substituição da membrana pode ser reduzido em quase 40%.

Além disso, como pode ser visto no estudo de termoeconômica de SANTOS (2005), a combinação da MED-TVC com a RO em plantas duais híbridas é a melhor forma de produzir eletricidade e água dessalinizada combinada, a custos mais competitivos e além de permitir adaptar e flexibilizar a planta dual à variação da carga elétrica, já que a água pode ser guardada facilmente em grandes reservatórios ao contrário da eletricidade.

Por fim, a reutilização do excedente elétrico para dessalinização, combinado com possibilidade de geração de água dessalinizada a partir de fontes de energia térmica, conclui-se que, apesar da menor produção de água dessalinizada, comparado com o processo de dessalinização RO, o sistema híbrido é a melhor opção para implantação de Planta Dual em uma usina siderúrgica.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Seguem algumas sugestões:

- É necessário ser feito uma análise termoeconômica dos processos de dessalinização, para que se tenha ideia de qual processo se mostra mais vantajoso. Com esta análise, tem-se um comparativo de quanto é necessário para que sejam instalados os sistemas, além de saber o quanto é gasto com manutenção e operação.

- Novas tecnologias de dessalinização estão sempre surgindo, assim sempre quando for feito trabalho ou estudo, deve ser feita uma pesquisa verificada as fontes mais recentes.
- A cada ano que se passa o processo de dessalinização RO evolui mais, antigamente apenas pequenas plantas operavam unicamente com RO, porém hoje existem plantas como a de Soreq em Israel, que produz 624.000m³ por dia apenas com dessalinização RO. Logo, cada vez mais o processo RO deve ser analisado com mais cautela.
- O processo de nano filtração apesar de ser novo, já começa a ser utilizado em alguns processos de dessalinização com energia térmica com função de ser um pré-tratamento, que tem como objetivo diminuir a quantidade de incrustantes. A redução dos incrustantes possibilita o aumento da temperatura do processo e com isso aumento da produção de água dessalinizada MABROUK, et al. (2015).
- Os fatores ambientais devem ser levados em conta, já que algumas pesquisas já apontam o aumento da salinidade do mar em locais onde ocorre o rejeito da salmoura. Um fator que piora a velocidade de dispersão dos rejeitos no mar são as correntes marinhas. Mas alguns artigos, como CHANG (2015), já propõem possíveis soluções para este estudo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGASHICHEV, S. P.; EL-NASHAR, A. M.. **Systemic approach for techno-economic evaluation of triple hybrid (RO, MSF and power generation) scheme including accounting of CO2 emission.** *Energy*, 30. ed., p. 1283–1303, 2005.
2. AL-FULAIJ, H. F.. **Dynamic Modeling of Multi Stage Flash (MSF): Desalination Plant.** 2011. 313 f. Tese (Ph.D.) – University College London, Londres, 2011.
3. ASSOCIAÇÃO DAS EMPRESAS DE SANEAMENTO BÁSICO ESTADUAIS. **COMPESA implanta o maior sistema de dessalinização do Brasil.** *Sanear*, ano V, n. 16, p. 6 – 8, dez. 2011.
4. BANDI, C. S.; UPPALURI, R.; KUMAR, A.. **Global optimization of MSF seawater desalination processes.** *Desalination*, 394. ed., p. 30-43, 2016.
5. BELTON, P.. **O grande salto tecnológico que pode acabar com a sede no mundo.** Texto disponibilizado em 18 de Outubro, 2015. In: BBC Brasil. Disponível em:
<http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/10/151018_tecnologia_dessalinizacao_água_rm> Acesso em Agosto 2016.
6. BODALAL, A. S.; ABDUL_MOUNEM, S. A.; SALAMA, H. S.. **Dynamic Modeling and Simulation of MSF Desalination Plants.** *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. Benghazi-Libya, v. 4, n. 3, p. 395-402, 2010.

7. CAMPANA, F.; BIANCHI, M.; BRANCHINI, L.; PASCALE, A.; PERETTO, A.; BARESI, M.; FERMI, A.; ROSSETTI, N.; VESCOVO, R.; **ORC Waste Heat Recovery in European Energy Intensive Industries: Energy and GHG Savings**, *Energy Conversion and Management*. Ed. Elsevier, dez. 2013

8. CHANG, J.-S.. **Understanding the role of ecological indicator use in assessing the effects of desalination plants..** *Desalination*, 365. ed., p. 416-433, 2015.

9. DARWISH, M. A.; **Cogeneration Power – Desalination Plants.** *Desalination*, 69. ed., p. 27- 46, 1988.

10. DARWISH, M. A.; AL ASFOUR, F.; AL-NAJEM, N..**Energy consumption in equivalent work by different desalting methods:** case study for Kuwait. *Desalination*, 152. ed., p. 83-92, 2002.

11. DASHTPOUR, R.; AL-ZUBAIDY, S. N.. **Energy Efficient Reverse Osmosis Desalination Process.** *International Journal of Environmental Science and Development*, Astana-Australia, v. 3, n. 4, p. 339-345, 2012.

12. EL-NASHAR, A. M.. **Optimal design of a cogeneration plant for power and desalination taking equipment reliability into consideration.** *Desalination*, 229. ed. p. 21-32, 2008.

13. GORDON, J. M.; CHUA, H. T.. **Thermodynamic perspective for the specific energy consumption of seawater desalination.** *Desalination*, 386. ed., p. 13-18, 2016.

14. GOH, P.S.; MATSUURA T.; ISMAIL, A.F.; HILAL N.. **Recent trends in membranes and membrane processes for desalination.** *Desalination*, 391. ed., p. 43-60, 2016.

15. IHM, S.; AL-NAJDI, O. Y.; HAMED, O. A.; JUN, G.; CHUNG, H. **Energy cost comparison between MSF, MED and SWRO: Case studies for dual purpose plants.** *Desalination*, 397. ed., p. 116-125, 2016.

16. Instituto Aço Brasil. 2013. Disponível em:
<<http://www.acobrasil.org.br/site2015/dados.asp>>. Acesso em: Outubro 2016.

17. KHAWAJI, A. D.; KUTUBKHANAH, I. K.; WIE, J. M.. **A 13.3 MGD seawater RO desalination plant for Yanbu Industrial City.** *Desalination*, 203. ed., p. 176-188, 2007.

18. **Lockheed Martin discovers new cost-effective method to desalinate saltwater.** In: Water-Tecnology.net. Disponível em: <<http://www.water-technology.net/news/newslockheed-martin-cost-effective-desalination-method>>. Acesso em: Agosto, 2016.

19. MABROUK A. N.; FATH, H.; DARWISH M.; ABDULRAHIM H.. Techno-Economics Of Hybrid NF/FO With Thermal Desalination plants. In: ____ **Dessalination Updates**. Outubro 2016. Cap. 8, p. 215-255. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5772/60207>>. Acesso em: Março 2016.

20. **Manual Elektro de Eficiência Energética:** Segmento Industrial - Geração de Vapor e Calor. Abril de 2011. Disponível em:
<http://www.elektro.com.br/Media/Default/DocGalleries/Eficientiza%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica/GERACAO_DE_VAPOR_E_CALOR.pdf>
. Acesso em Abril de 2016.

21. New Technologies for Seawater Desalination Using Nuclear Energy. **International Atomic Energy Agency - IAEA**. N. 1753. 2015. Disponível

em: <<http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/10732/New-Technologies-for-Seawater-Desalination-Using-Nuclear-Energy>>. Acesso em: Abril 2016.

22. PEDRINI, D. C.; RAFAELI, L.; PIZZOLATO, M.; CATEN, C. S. T.. Análise Da Ecoeficiência De Uma Indústria Siderúrgica Brasileira. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STO_077_542_11597.pdf>. Acesso em: Dezembro 2016.
23. PENA, R. F. A.. **Estresse Hídrico**. In: Mundo Educação. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/estresse-hidrico.htm>>. Acesso em: Agosto, 2016.
24. **Ras Al Khair Desalination Plant, Saudi Arabia**. In: Water-Tecnology.net. Disponível em: <<http://www.water-technology.net/projects/-ras-al-khair-desalination-plant/>>. Acesso em: Agosto, 2016.
25. SANTOS, J. J. C. S.. **Avaliação Exergoeconômica das Tecnologias para a Produção Combinada de Eletricidade e Água Dessalinizada**, 2005. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2005.
26. SENADO FEDERAL. **Saída pelo mar: aumenta o uso de água dessalinizada**. *Em Discussão*, ano 5, n. 3, p. 45-48, dez. 2014.
27. SILVA, M. M.. **Repotenciamento em Sistemas de Geração de Potência na Indústria Siderúrgica utilizando Análise Termoeconômica**. 2004. 248 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2004.
28. SOUZA, L. F. **Análise térmica de um dessalinizador de múltiplo efeito para obtenção de água potável**. 2002. 56 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - PB, 2002.

29. UCHE MARCUELLO, F. J.; VALERO, A.; SERRA, L.. **La Desalación y Reutilización como Recursos Alternativos**. Zaragoza. Ed. Gobierno de Aragón, 2002.
30. UCHE MARCUELLO, F. J.. **Thermoeconomic Analysis and Simulation of a Combined Power and Desalination Plant**. 2000. 476 f. Tese (Ph. D.) - Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2000.
31. VICTER, W. **A dessalinização no Brasil e no Mundo**. Texto disponibilizado em Março, 2015. In: Debates Culturais: Liberdade de ideia de opiniões. Disponível em: <<http://www.debatesculturais.com.br/a-dessalinizacao-no-brasil-e-no-mundo/>>. Acesso em: Agosto 2016.