

PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DO MAR ACOPLADO A UM PROCESSO DE COGERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO BIOMASSA DE EUCALIPTO

SEA WATER DESALINATION PROCESS COUPLED TO AN ENERGY COGERATION PROCESS USING EUCALYPTUS BIOMASS

51

Marcela Fernanda Barbosa Fracasso¹, Francisco de Assis Bertini Moraes²

- 1- Formanda em Engenharia Química pela Faculdade Municipal Prof. Franco Montoro, FMPFM/Mogi Guaçu/SP.
- 2- Docente da FMPFM/Mogi Guaçu/SP, Engenheiro Química pela UNICAMP, Mestre em Engenharia de Produção pela USP/UNIARA.

Contato: franciscobertini25@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho estuda a viabilidade de instalação de uma planta de dessalinização de água do mar por evaporação a múltiplo-efeito com cogeração de energia, a partir da biomassa de eucalipto. O objetivo é suprir água potável para a cidade de Fortaleza-CE a baixo custo a fim de amenizar os impactos da crise hídrica que Fortaleza/ CE vem enfrentando nos últimos anos. Para a execução deste projeto, utilizamos a metodologia da engenharia do projeto de processos químicos. Os resultados obtidos foram satisfatórios, ficando evidente que adicionar o processo de cogeração de energia ao processo de dessalinização, traz benefícios econômicos, pois assegura o retorno de investimento com o decorrer dos anos, além de utilizar biomassa como combustível sustentável ambientalmente. Confirma-se, no estudo, que o processo de dessalinização sem cogeração de energia, não propicia retorno financeiro do investimento.

Palavras-chaves: Dessalinização de água do mar, cogeração de energia

ABSTRACT

The present work studies the feasibility of installing a seawater desalination plant by evaporation of a multiple effect with energy effect, from the eucalyptus biomass. The goal is to supply drinking water to the city of Fortaleza-CE or low cost to mitigate the impacts of the water crisis that Fortaleza / CE has been facing in recent years. To perform this project, use a chemical process design engineering methodology. The results obtained were satisfactory and it is evident the energy cogeneration process to the desalination process brings economic benefits, guarantee of return or investment over the years,

besides using biomass as environmentally sustainable fuel. It is confirmed without study that the desalination process without energy cogeneration does not offer a financial return on the investment.

Keywords: Seawater desalination, energy cogeneration

INTRODUÇÃO

No Brasil, atualmente, a crise hídrica é uma realidade, e o que antes afetava apenas algumas regiões do país, como Nordeste, por exemplo, hoje afeta de forma severa todo o país. As chuvas não têm sido suficientes para recuperar os níveis de água dos reservatórios, tornando-se cada vez mais difícil fornecer água potável para toda população (FRAGOSO, 2015).

Para que o problema da escassez de água possa ser amenizado, vários países vêm investindo nos processos de dessalinização. Um processo físico químico, com duas grandes tecnologias aplicadas: os processos de destilação térmica e os processos que utilizam filtração com membranas. Ambas as tecnologias têm como objetivo reduzir a quantidade de substâncias dissolvidas na água bruta para torná-la utilizável na sociedade.

Um estado brasileiro que sofre com a seca, é o Ceará, cuja capital Fortaleza é considerada a 5ª capital mais populosa do Brasil, possuindo 2.627.482 habitantes (IBGE, 2017). Neste local, há uma evidente crise hídrica, devido à diminuição das chuvas, a pouca água acumulada nos reservatórios e o crescimento populacional na região. Em julho de 2017, 115 municípios do Ceará decretaram situação de emergência, por causa da seca, entre eles, Fortaleza. (PORTAL G1, 2017).

O governo da cidade de Fortaleza lançou um edital de solicitação, para que as empresas interessadas desenvolvam um projeto de dessalinização de água do mar, pretende-se então, que 15% da água consumida pela população de Fortaleza (sem incluir instituições), sejam oriundas do mar, ou seja, $0,110 \text{ m}^3$ por dia hab. $\times 15\% \times 2.627.482$ hab. (habitantes), que resulta em cerca de $43.500 \text{ m}^3/\text{dia}$ (metro cúbico por dia) de água fornecida por dessalinização (PORTAL G1, 2017).

O objetivo do presente trabalho é o estudo de viabilidade de instalação de uma planta de dessalinização de $15.000 \text{ m}^3/\text{dia}$ de água por evaporação em múltiplo efeito, com cogeração de energia, a partir de biomassa de florestas de eucalipto, plantadas em terras públicas próximas à planta de dessalinização.

DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA E COGERAÇÃO DE ENERGIA

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), a portabilidade da água, em função da concentração de sólidos totais, é considerada boa quando está entre 300 e 600 mg/L. (miligrama por litro). E segundo o conselho nacional de pesquisa do Reino Unido, a água é considerada potável quando possui menos de 1.000 mg/L em concentração de sólidos dissolvidos (SILVEIRA *et al*, 2015).

Como já comentado, dentre os processos mais estudados para abastecimento de água potável está à dessalinização da água do mar, face sua abundância e grande disponibilidade. A principal busca está na redução de custos para o processo de separação de cerca de 3,5% em massa dos sais dissolvidos, a qual demanda muita energia, seja na forma térmica ou elétrica (AZZOLINI, 2007).

Após ser dessalinizada a água fica mais pura do que os padrões especificados, portanto pode ser misturada com outras águas que possuam mais sólidos totais dissolvidos e assim destinados ao consumo humano.

Processos de Dessalinização de Água

Atualmente existem basicamente dois tipos de processos de dessalinização: processos de destilação térmica e processos que utilizam membranas.

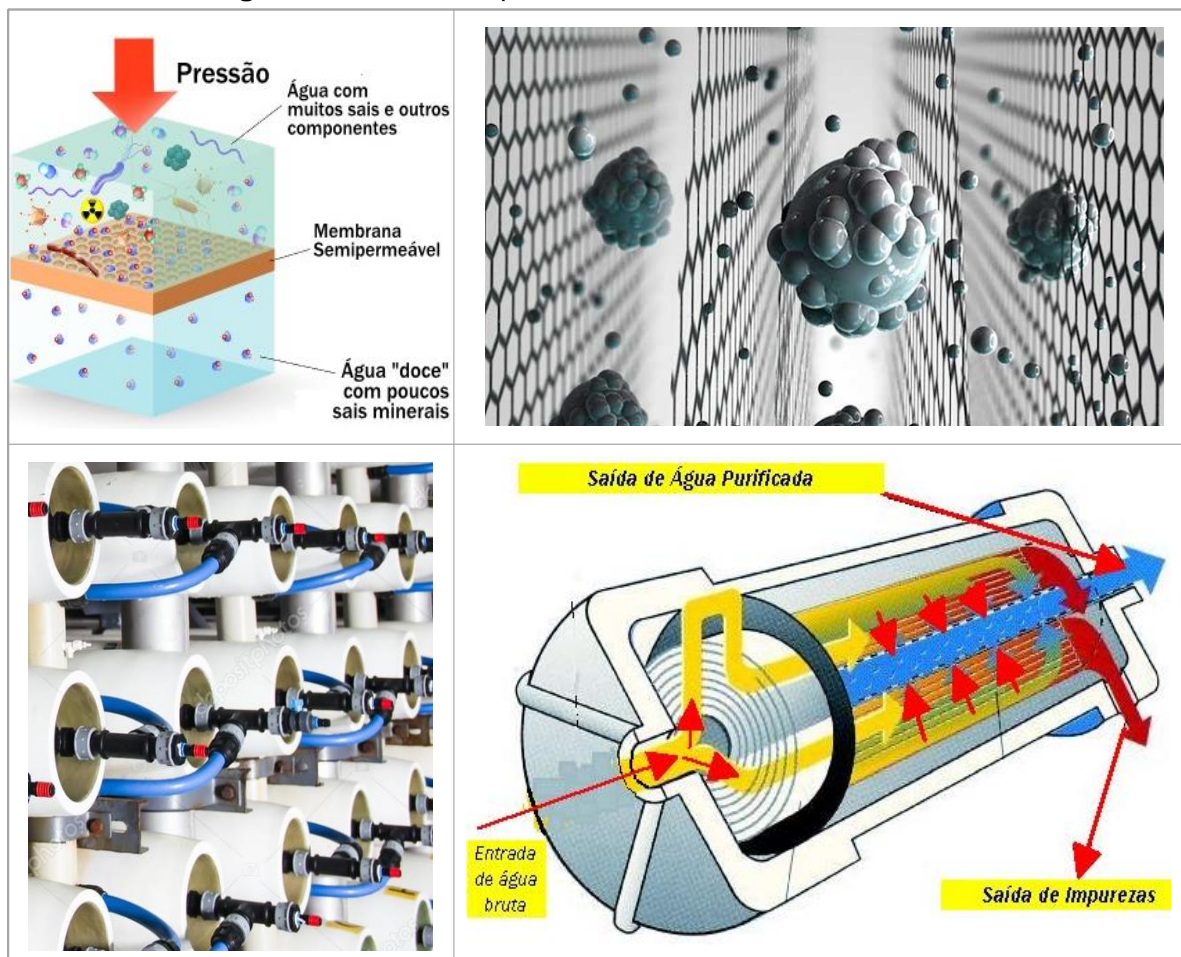
Processos de dessalinização de água por membranas

Existem dois tipos de processo de dessalinização por membrana: a por osmose reversa e por nano-filtração. Ambos utilizam a pressão da água para forçar a água a passar por uma membrana, como uma espécie de filtro, formando dois fluxos: um de água pura e outro de concentrado (salmoura). Essas membranas utilizadas são feitas de poliamidas ou de produtos de celulose.

A força motriz utilizada no processo é denominada pressão osmótica, que está depende da concentração de sais nas duas soluções. A carga de pressão tem que ser igual à pressão osmótica no ponto em que não há pressão líquida de água na membrana. Se esta pressão for superior a pressão osmótica da solução concentrada, a água pura atravessa a membrana a partir da solução concentrada. USBR (2003).

A Figura 1 ilustra o processo de osmose reversa para obtenção de água potável por dessalinização da água do mar.

Figura 1. Tratamento por Membrana -Pressão Osmótica.

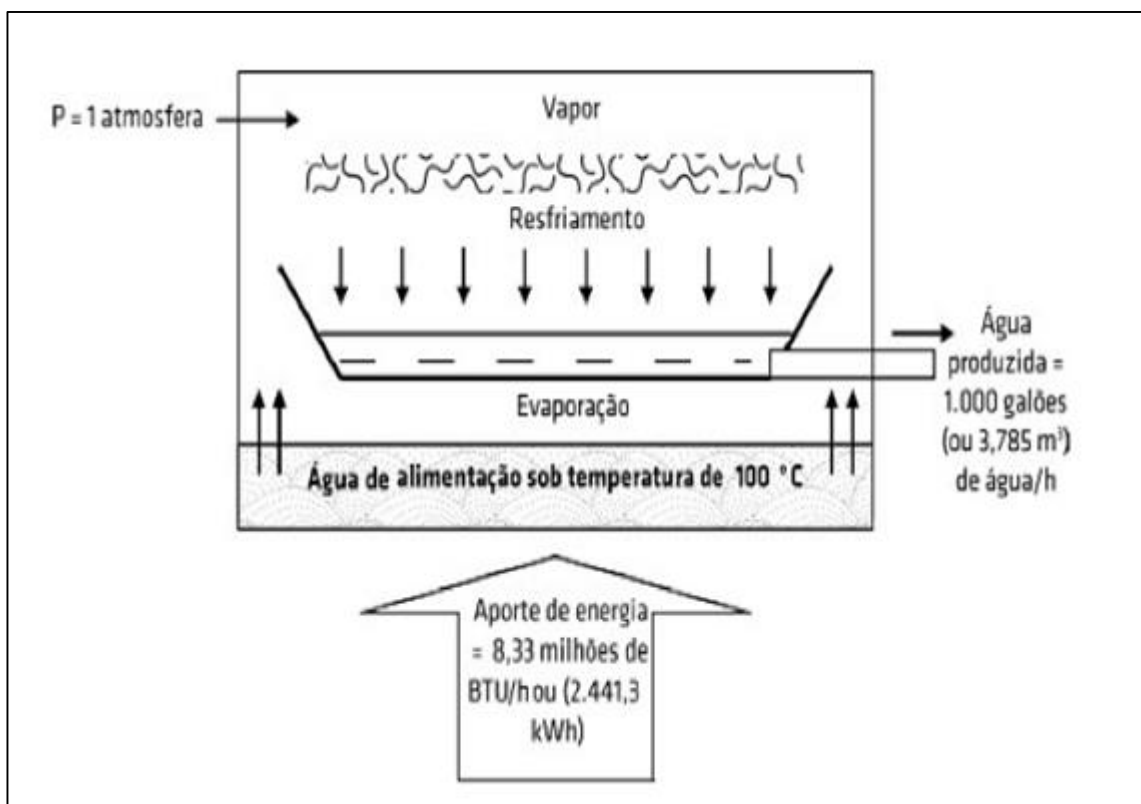


Fonte: USBR (2003)

Processos de dessalinização de água por destilação

A destilação é basicamente um processo de transferência de calor. O problema é encontrar maneiras de transferir grandes quantidades de água, vapor e calor de forma econômica. Na Figura 2 apresenta-se o processo básico de destilação.

Figura 2. Esquema conceitual do processo convencional de destilação

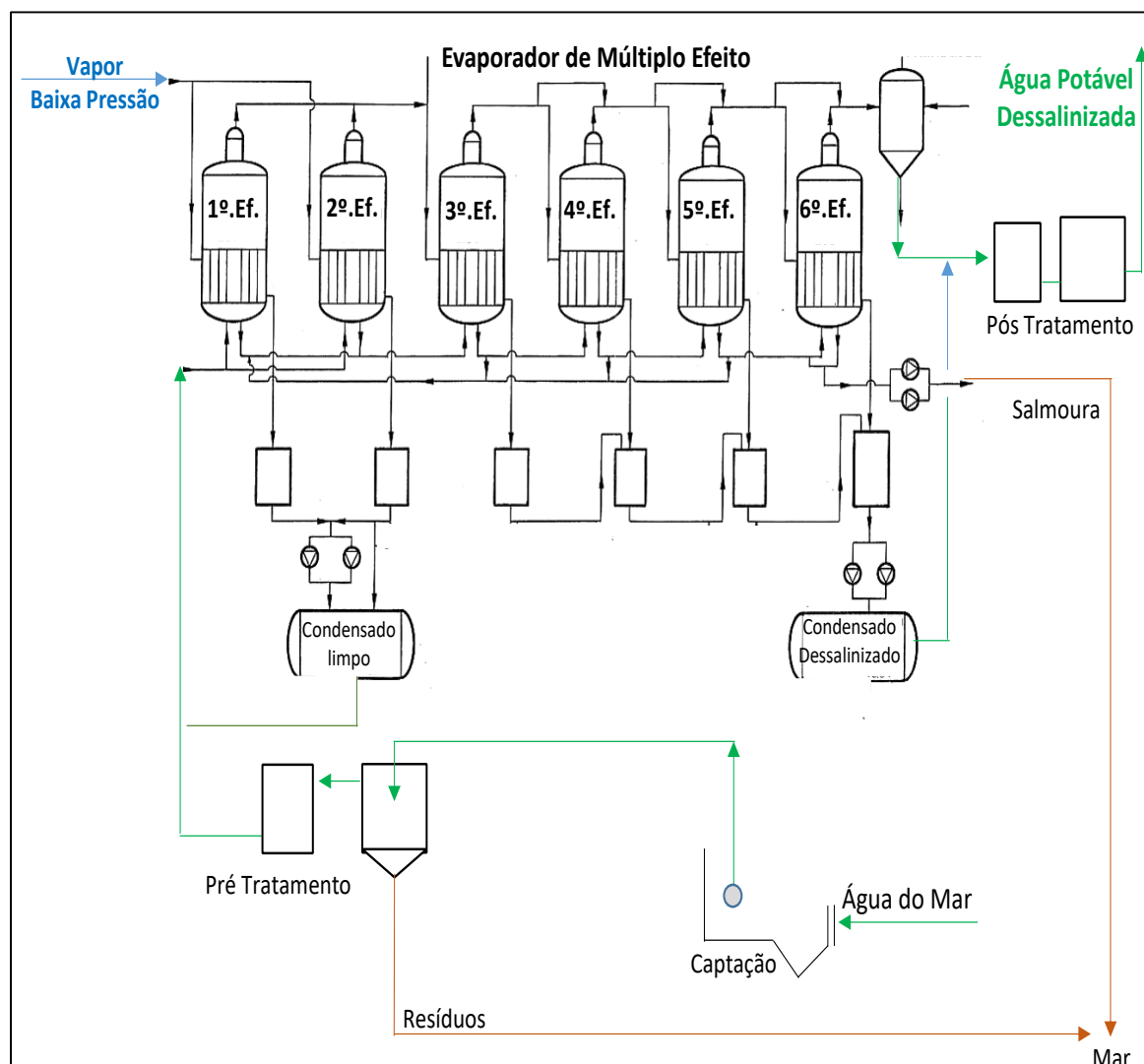


Fonte: Silveira *et al* (2015).

A água que passa por esse processo, é quase pura e a presença de sólidos dissolvidos é quase inexistente. Após analisar a FIGURA 2 percebe-se que é necessária uma quantidade significativa de energia, para produzir água dessalinizada. Existem três tipos de processos que foram desenvolvidos com esse objetivo: Destilação por Multiestágio Flash, Processo de Destilação por Múltiplo Efeito e Destilação por Compressão de Vapor.

A Figura 3 mostra seis fases de um evaporador de múltiplo efeito. A pressão de vapor na fase 1 é maior do que na fase 2. Da mesma forma que a pressão na fase 2 é maior que na fase 3. O vapor que é formado na fase anterior aquece a próxima fase, que se encontra com pressão inferior, até que o vapor da última fase seja condensado. Através da condensação do vapor em cada fase é obtido o destilado.

Figura 3. Esquema do Processo de Evaporação por Múltiplo Efeito



Fonte: USBR (2003).

Processos de dessalinização da água com cogeração

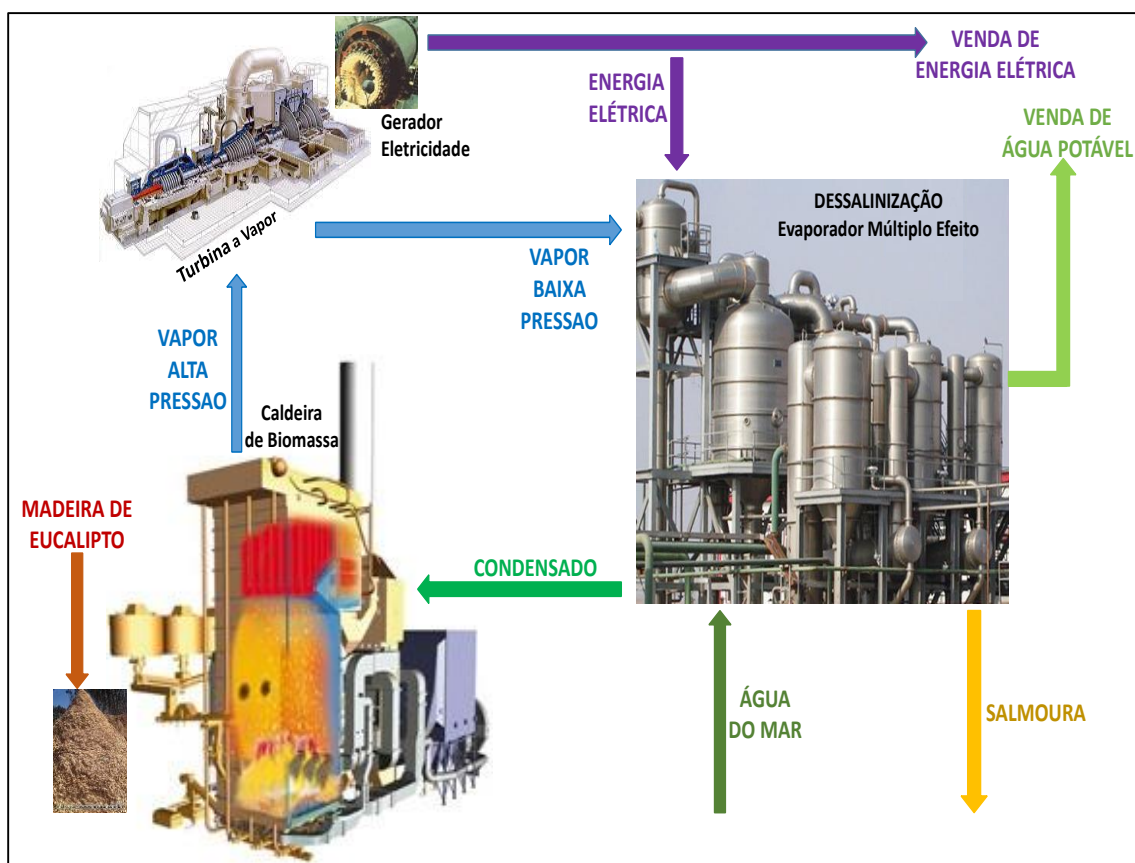
Em todos os processos de dessalinização por destilação, o maior problema a ser equacionado é a quantidade de vapor necessária para o processo de dessalinização e que é bastante elevada, aumentando-se significativamente o custo do capital do projeto devido necessidade de grandes caldeiras e o custo operacional devido ao alto custo do combustível comparável ao preço da água praticado no mercado.

Torna-se viável a cogeração de energia, ou seja, unidades de dessalinização operando juntamente com usinas termelétricas para a produção

de energia. Como nem toda energia gerada é consumida na evaporação, torna-se o projeto viável economicamente e reduzindo o custo da água produzida.

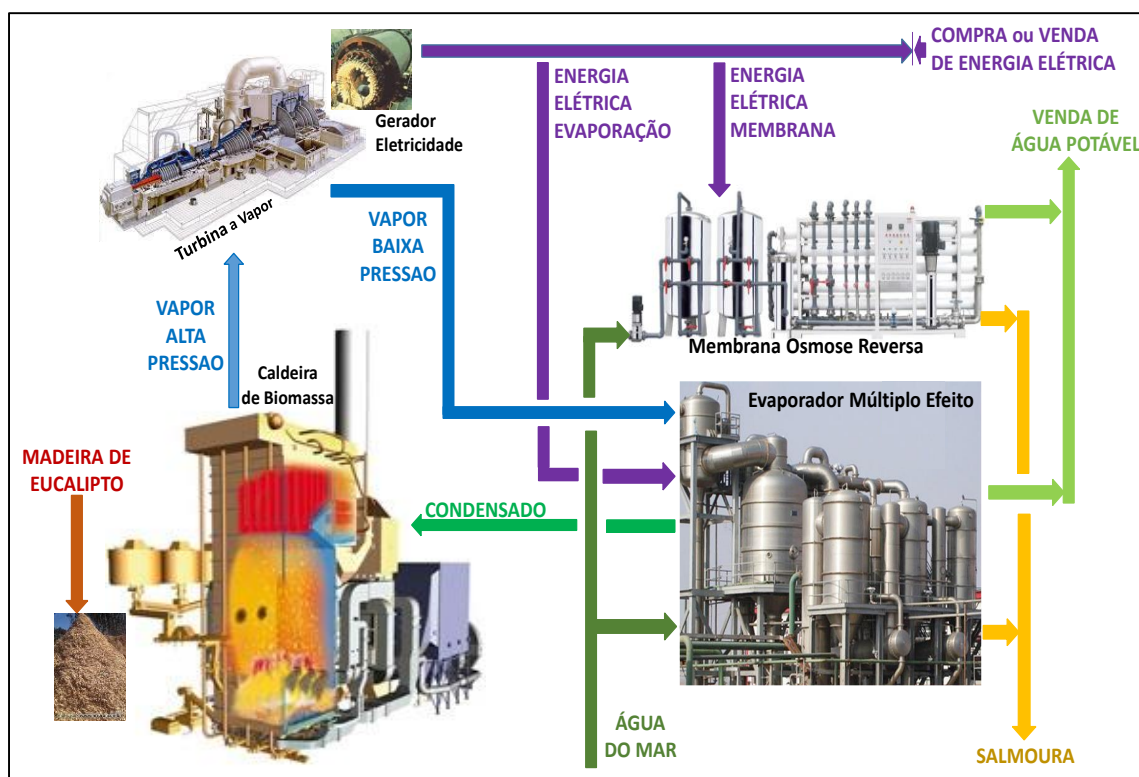
Salienta-se que o sistema de cogeração poderá ser utilizado para as duas tecnologias de dessalinização de água do mar, sendo que para a dessalinização por destilação utilizará o vapor de baixa pressão e energia elétrica oriunda do turbo gerador e a dessalinização por membrana poderá ser beneficiada da energia elétrica excedente, ou seja, o que não foi consumida pelo processo de destilação. Pode-se resumir, portanto, a utilização da cogeração para as duas situações descritas e ilustradas nas Figura 4 (dessalinização da água por destilação com venda da energia elétrica excedente) e Figura 5 (dessalinização da água por destilação com utilização do excedente de energia produzida para a dessalinização de água por membrana).

Figura 4. Destilação e cogeração com venda de energia elétrica.



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 5. Destilação, membrana e cogeração de energia elétrica.



Fonte: elaborado pelos autores.

A Figura 6, apresenta um processo de dessalinização por evaporação em múltiplo efeito. O processo opera com cogeração de energia, através de uma caldeira de biomassa, produzindo vapor superaquecido a alta pressão de 90 bar (bar) que alimenta um turbo - gerador (turbina a vapor + gerador elétrico), para produção de energia elétrica a 60 hz (hertz) e 13,8 kV (kilo volts), através da redução de pressão do vapor para 5 bar que será utilizado na evaporação.

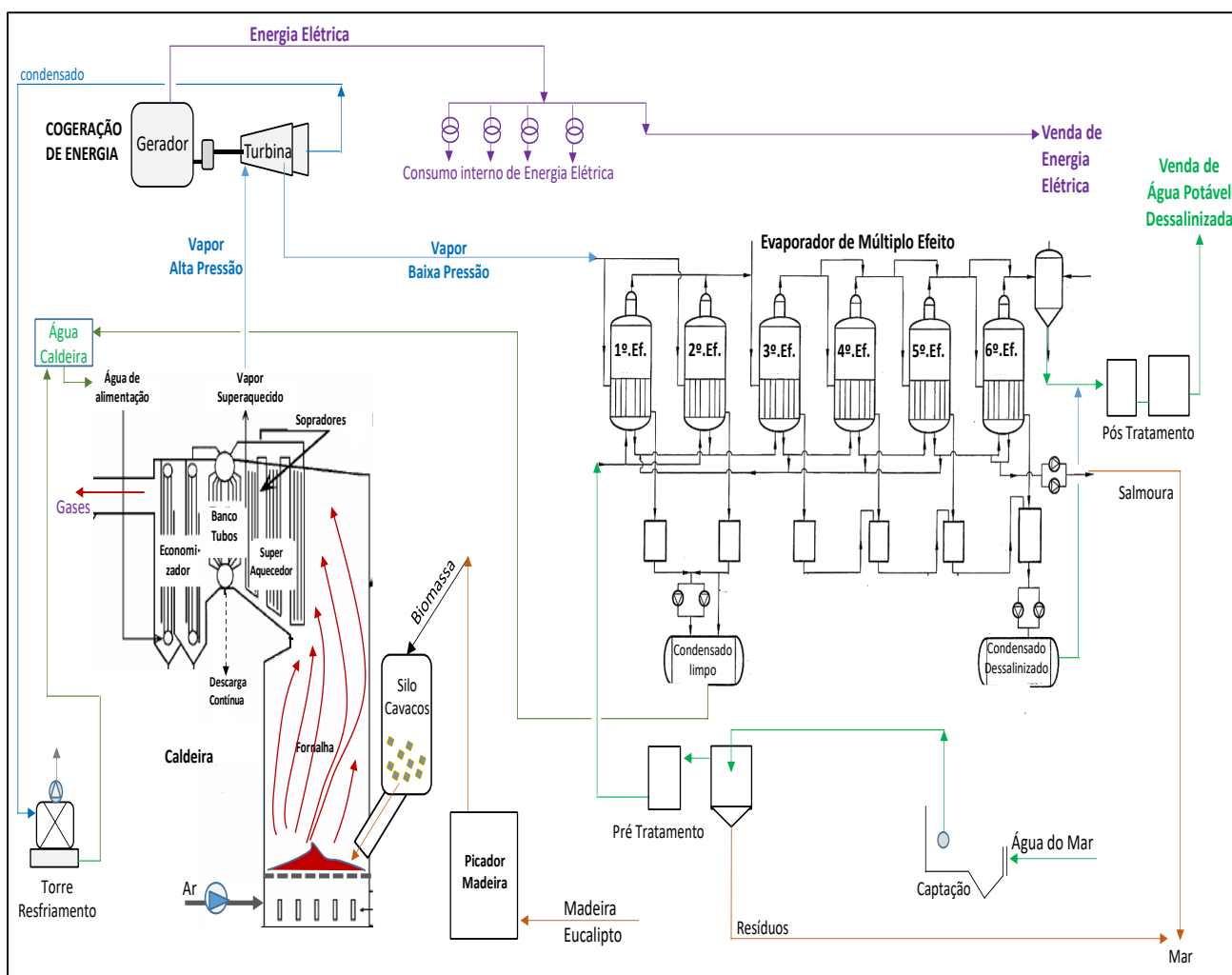
Conforme Azzolini (2007) da empresa TGM, uma turbina a vapor superaquecido com 90 bar de pressão e 510°C (graus Celsius) de temperatura, com uma contrapressão de vapor a 5 bar de pressão é capaz de produzir uma potência de 0,28 MW (Mega Watss) para cada 1,0 t/h (tonelada por hora) de vapor produzido na caldeira. Considerando-se que um sistema de dessalinização de água por evaporação somando-se à caldeira não consome nem a terça parte desta potência elétrica, e dessa forma, o sistema torna-se bastante atraente do ponto de vista da viabilidade econômica de instalação e de operação.

A descrição do processo de funcionamento da evaporação a múltiplo efeito já foi detalhada na Figura 5, tendo como característica o reaproveitamento do evaporado para aquecimento e evaporação nos diversos estágios, com a aplicação de vácuo no último estágio.

A água destilada é encaminhada ao processo de pós-tratamento para estabilização, ou seja, o carbonato de cálcio não precipita (causando incrustação) nem dissolve (causando corrosão). Para isso, utiliza-se de adição de soda cáustica ou cal hidratada. A reintrodução de minerais é necessária para atingir os requisitos mínimos especificados por normas federais. A desinfecção com cloro e flúor deve ser feita para atingir as especificações de qualidade da água.

De acordo com dados de instalações (SILVEIRA *et al*, 2015), para uma planta de dessalinização de capacidade de 10.000 m³/dia de produção de água potável, a caldeira será de cerca de 105 t/h de vapor a 90 bar e 510 °C, necessitando-se de 850 m³/dia de madeira de eucalipto correspondente a 9.000 há (hectare) de florestas plantadas. A energia elétrica gerada será de 29 MW, sendo o consumo de cerca de 5 MW, resultando em 24 MW para venda.

Figura 6. Fluxograma de dessalinização da água do mar.



Fonte: elaborado pelos autores.

MATERIAL E MÉTODO

Na análise de leitura discutiu-se em detalhes o processo de produção de água potável por dessalinização utilizando as tecnologias de evaporação por múltiplo efeito e por osmose reversa comentando sobre o uso de cogeração de energia nestes processos.

Neste trabalho, o objetivo foi verificar se a introdução da cogeração de energia com combustível florestal renovável é capaz de viabilizar economicamente a produção de água potável por dessalinização, quando comparada com o processo de dessalinização sem cogeração.

Trata-se, portanto, de utilizar parte da metodologia da engenharia do projeto de processos, a qual envolve os seguintes conceitos (SHERWOOD, 1972):

- A. Concepção da ideia de que algo pode ser realizado de maneira compensadora, seja por uma necessidade social, ambiental ou de uma oportunidade econômica.
- B. Proposta de um projeto para melhorar a ideia. Pode envolver invenção ou ser uma sugestão, baseada em projetos conhecidos ou inovadores.
- C. Análise da concepção onde o engenheiro emprega uma variedade de recursos: conhecimento, viabilidades técnicas, econômicas e financeiras, habilidades de cálculos em operações unitárias, e ciclo de vida do processo no contexto atual e futuro, etc. A melhor alternativa é a que dará o melhor resultado no projeto e com os “*stakeholders*” envolvidos, ou seja, funcionários, comunidade, clientes, fornecedores, etc.
- D. Sendo aprovado ocorre o projeto pormenorizado, incluindo a seleção do local de instalação, planos financeiros, especificações dos equipamentos, materiais de construção e serviços auxiliares.

Afirma-se que com os itens 1 e 2, considera-se que os conceitos “A” e “B” da metodologia, já foi concluída, partindo e terminando com o conceito “C”, pois não temos a pretensão e nem recursos para realizar o conceito “D”.

Neste contexto, detalha-se nos próximos itens deste trabalho, o conceito “C” de análise de concepção, calculando, comparando e analisando os seguintes itens:

- ✓ Definição da capacidade de produção da planta de dessalinização.
- ✓ Fluxogramas preliminares de processo.
- ✓ Balanços de massa e energia.
- ✓ Comparativos de custos de investimento, operacionais e faturamento.
- ✓ Estudo e análise da viabilidade técnica econômica.
- ✓ Conclusão para aprovação ou não do projeto.

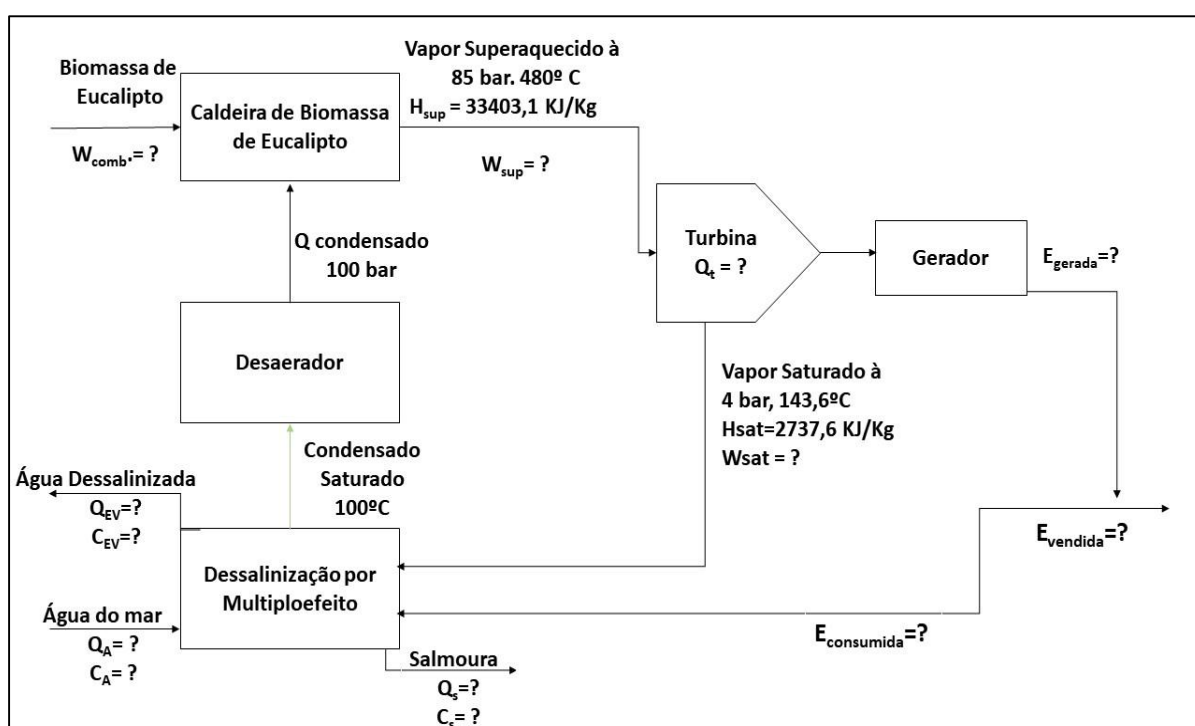
A fase conceitual de análise de concepção de projeto é a mais importante e algumas recomendações são de extrema importância, assim sendo indispensável qualquer detalhe.

RESULTADO E DISCUSSÃO

Resultado dos Cálculos de Projeto

Neste item serão realizados os cálculos de projeto para a Proposta 1 – Processo de Dessalinização por Múltiploefeito sem Cogeração de Energia Elétrica, e Proposta 2 - Processo de Dessalinização por Múltiploefeito com Geração de Energia Elétrica.

Figura 7. Processo de Dessalinização com cogeração de energia.



Fonte: elaborado pelos autores.

A Figura 7 demonstra de forma resumida um processo de dessalinização com cogeração de energia de forma global. Uma corrente de água salina é alimentada no início do processo. Enquanto isso o vapor que é gerado através da caldeira de biomassa de eucalipto, é enviado para uma turbina, gerando assim energia elétrica. Parte desta energia gerada será destinada a venda externa e a outra parte volta para o processo, possibilitando a dessalinização por múltiplo efeito, produzindo então duas correntes de água: uma de água dessalinizada e a outra concentrada em sais (salmoura).

Determinação da Vazão Volumétrica de Água Requerida, Água Evaporada (Água Dessalinizada) e Descarte

Levando em consideração o edital lançado pelo governo de Fortaleza, sobre o interesse de empresas a desenvolverem um projeto para implantação de uma planta de dessalinização no município (PORTAL G1, 2017), pode-se:

- ✓ Determinar a capacidade de produção da planta de 15.000 m³/dia de água dessalinizada, desta forma a vazão de água evaporada (água dessalinizada) será: $Q_{EV} = 625 \text{ m}^3/\text{h}$.
- ✓ O percentual de sais na água do mar é igual a 3,5% (SILVEIRA *et al*, 2015).
- ✓ O percentual de sais na salmoura (resíduo) é igual a 7% (JUSTINO, 2017). Sendo assim, a vazão de água requerida (água alimentada Q_A) será:

$$Q_A = Q_{EV} + Q_S$$

$$C_A \cdot Q_A = C_{EV} \cdot Q_{EV} + C_S \cdot Q_S \quad ? \quad Q_S = \frac{C_A \cdot Q_A}{C_S}$$

$$Q_A = Q_{EV} + \frac{C_A \cdot Q_A}{C_S} \quad ? \quad Q_A = \frac{Q_{EV}}{1 - \frac{C_A}{C_S}} \quad ? \quad Q_A = \frac{625}{1 - \frac{0,035}{0,07}} \quad ? \quad Q_A = 1.250 \text{ m}^3 \text{ h}$$

Com isso, a vazão de água de descarte (resíduo Q_S) será:

$$Q_A = Q_{EV} + Q_S \quad ? \quad Q_S = 1.250 - 625 \quad ? \quad Q_S = 625 \text{ m}^3 \text{ h}$$

Calculo da Vazão de Vapor para a Evaporação

De acordo com Justino (2017) em Projeto de Dimensionamento Básico para Obtenção de Água Potável a partir da Dessalinização da Água do mar, foi encontrado um valor de economia de vapor de $EV = 3,13$ Toneladas de água evaporada/ Tonelada de vapor vivo, sendo assim, o valor da vazão de vapor para evaporação será:

$$EV = \frac{Q_{EV}}{W} \quad ? \quad W = \frac{625}{3,13} \quad ? \quad W = 199,68 \frac{\text{Toneladadevapor}}{\text{Hora}} = W_{\text{Sup}}$$

W representa W_{SAT} que é o vapor requerido na evaporação, igual à $W_{SUP}=199,68$ ton. de vapor/ h, que é o vapor superaquecido à 85bar, 480°C, produzido na caldeira, que alimentará a turbina para geração de energia elétrica no gerador.

Determinação da Geração, Consumo e Venda de Energia Elétrica

Levando-se em consideração o valor de vazão de vapor para evaporação $W_{SUP}=199680$ Kg de vapor/ h (quilograma de vapor por hora) encontrado no item anterior, podemos calcular o valor de trabalho gerado pela turbina (Q_T), que será:

De acordo com o programa SteamTable, podemos calcular os valores de entalpia para vapor superaquecido à 85 bar, 480°C ($H_{SUP}=3343,1$ KJ/ Kg kilo Joule por quilograma) e a entalpia para vapor saturado á 4 bar, 143,6°C ($H_{SAT}=2737,6$ KJ/Kg).

$$Q_T = W_{Sup} \cdot H_{Sup} - H_{Sat} \quad ? \quad Q_T = 199680 \cdot 3343,1 - 2737,6$$
$$Q_T = 120906240 \text{ KJ h}$$

Conforme Brand (2007); Barcellos (2005); Azzolini (2010) e conjunto de instalações similares, a eficiência do conjunto turbo - gerador é da ordem de 85%, portando a potência gerada pelo turbo - gerador (P_{GER}), será:

$$P_{Ger} = Q_T \cdot 0,85 \quad ? \quad P_{Ger} = 120906240 \cdot 0,85 \quad ? \quad P_{Ger} = 102770304 \text{ KJ h ou } 28,55\text{MW}$$

Sendo assim a Energia Elétrica Gerada será igual a 239.820 MWh/ ano. Considerando 350 dias de operação no ano.

Se levarmos em consideração que a planta de dessalinização irá ter um consumo de energia elétrica de 29.400 MWh/ ano, poderá ser vendida 210.420 MWh/ ano de energia elétrica.

Em um processo de dessalinização sem cogeração de energia, é necessário adquirir de um terceiro cerca de 29,1MWh/ano, que é a quantidade de energia utilizada no processo.

Determinação do Consumo de Biomassa de Eucalipto

Conforme Santos (2017), um Projeto de Dimensionamento Básico de um Processo de Cogeração de Energia com Caldeira de biomassa, o consumo de madeira de eucalipto com casca com cerca de 35 a 45% de umidade é da ordem

de 0,32 m³/t. de vapor em caldeiras de alta pressão a 85 bar e 480°C, usada no processo com cogeração de energia elétrica.

Desta forma, o consumo de biomassa como combustível da caldeira será:

$$W_{\text{COMB. BIOMASSA}} = W_{\text{SUP.}} \cdot 0,32$$

$$W_{\text{COMB. BIOMASSA}} = 4792,32 \cdot 0,32$$

$$W_{\text{COMB. BIOMASSA}} = 1533,54 \text{ m}^3/\text{d}$$

64

Em um processo de dessalinização sem cogeração de energia elétrica, a caldeira utilizada possui uma baixa pressão de 6 bar, tendo um consumo de madeira de eucalipto com cerca de 35% a 45% de umidade, da ordem de 0,28 m³/t. de vapor.

Com isso, o consumo de biomassa de eucalipto como combustível será (utilizando W_{sup} calculado nos itens acima):

$$W_{\text{COMB. BIOMASSA}} = W_{\text{SUP.}} \cdot 0,28$$

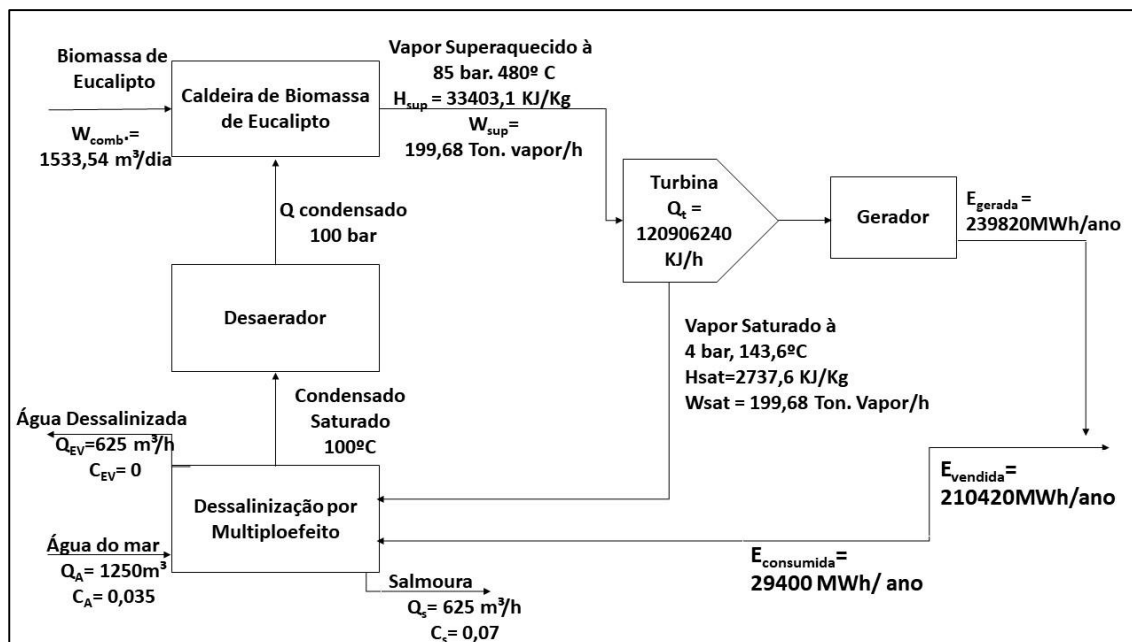
$$W_{\text{COMB. BIOMASSA}} = 4792,32 \cdot 0,28$$

$$W_{\text{COMB. BIOMASSA}} = 1341,85 \text{ m}^3/\text{d}$$

Fluxogramas com Resultados dos cálculos e Projeto

A Figura 8 representa os valores dos cálculos acima realizados para a Proposta 2 – Processo de Dessalinização por Múltiplo efeito com cogeração de energia elétrica, onde se utiliza caldeira de alta pressão a 85 bar, 480 °C.

Figura 8. Processo de dessalinização por múltiplo efeito com cogeração de energia.



Fonte: elaborado pelos autores.

Custos de Investimentos, Operacionais de Receitas

Nos itens abaixo, serão realizados uma comparação entre os custos de investimento, custos operacionais e receita entre a Proposta 1: Processo de Dessalinização por múltiplo efeito sem cogeração de energia elétrica e a Proposta 2: Processo de Dessalinização por múltiplo efeito com cogeração de energia elétrica.

Para a realização destes respectivos comparativos, irão ser utilizados os valores dos cálculos realizados nos itens anteriores.

Comparativo de custo de investimento

Na Tabela 1, será demonstrado o comparativo de custo de investimento entre os processos de dessalinização com cogeração de energia e sem cogeração de energia. Os dados da tabela foram cedidos pela empresa SUEZ *Environmental* Brasil e a Andritz *Separation* Ltda, conforme Justino (2017) e Santos (2017).

Tabela 1. Comparativo de custo de investimento entre os processos de dessalinização.

Descrição	Proposta 1 (R\$): Dessalinização sem cogeração de Energia	Proposta 2 (R\$): Dessalinização com cogeração de Energia
Projeto de Detalhamento de Equipamentos	800000,00	2000000,00
Projeto Elétrico, Instrumental e Mecânico	1200000,00	1400000,00
Projeto Civil	800000,00	1050000,00
Sistema de captação de água do mar	1500000,00	1500000,00
Sistema de medição e dosagem de floculantes	200000,00	200000,00
Sistema de decantação de impureza	1500000,00	1500000,00
Sistema de tratamento e retorno de impurezas	1500000,00	1500000,00
Sistema de Armazenagem de água Semi-tratada	600000,00	600000,00
Bombeamento para evaporação	800000,00	800000,00
Sistema de evaporação de Múltiplo Efeito	4000000,00	4000000,00
Sistema de Vácuo da Evaporação Múltiplo Efeito	500000,00	500000,00
Sistema de Distribuição de Vapor de Baixa Pressão	600000,00	1000000,00
Sistema de Condensação da água Evaporada	500000,00	500000,00
Tanque de Armazenagem de Água Tratada	600000,00	600000,00
Sistema de cloração e fluoretação de água	400000,00	400000,00
Sistema de Distribuição de Água Potável	800000,00	800000,00
Sistema de Recepção de Terras e Madeira	2000000,00	2000000,00
Picagem e Armazenagem de Cavacos	7000000,00	7000000,00
Transporte de Cavacos e Caldeira	500000,00	500000,00
Caldeira de Biomassa	60000000,00	80000000,00
Turbina e Redutor e Sistema de Segurança	-	5000000,00
Gerador e Sistema de Segurança e Controle	-	8000000,00
Sistema de Distribuição de Vapor de Alta Pressão	500000,00	1000000,00
Sistema de Barramento Elétrico	-	500000,00
Tratamento de Água da Caldeira	1500000,00	2500000,00
Condensação de Vapor da Turbina	-	800000,00
Montagem Civil (prédios e bases)	2000000,00	3500000,00
Montagem mecânica (equipamentos)	3000000,00	11000000,00
Montagem Tubulação	3000000,00	4500000,00
Montagem Elétrica	2000000,00	3000000,00
Montagem Instrumental	1500000,00	2750000,00
SDCD e Montagem Automação	1500000,00	4500000,00
Contingências	500000,00	3500000,00
Comissionamento	200000,00	700000,00
Treinamento e Star- Up	150000,00	350000,00
TOTAL	102050000,00	159900000,00

Fonte: adaptado SUEZ *Environmental* Brasil (2017); Andritz *Separation* Ltda. (2017).

Comparativo de custos operacionais e receita

A Tabela 2 apresenta um comparativo de custos entre os processos de dessalinização com cogeração de energia e sem cogeração de energia.

Fazendo um levantamento do valor gasto para preparar a madeira própria, oriunda dos eucaliptos plantados nas florestas ao redor da fábrica, pode-se determinar o custo do combustível de biomassa utilizado pelas caldeiras na geração de vapor, para as duas propostas. Estes dados estão contidos na Tabela 2 abaixo, cedidos por Bertini (2019) trabalhou na indústria de papel e embalagens International Paper

Os demais dados contidos na Tabela 2 foram obtidos através de pesquisas de mercado e baseados em plantas operantes.

Tabela 2. Tabela Comparativa dos custos operacionais.

Custos Operacionais	Proposta 1	Proposta 2
	Dessalinização sem cogeração de energia	Dessalinização com cogeração de energia
Produção de Vapor (dias)	350	350
Geração de Vapor (ton. / ano)	1.680.000	1.680.000
Pressão de Vapor da caldeira (bar)	7	85
Consumo de Madeira Própria (m ³ / ano)	470.400	537.600
Preço da Madeira Própria (R\$/ m ³)	50	50
Custo da Madeira Própria (R\$/ ano)	23.520.000,00	26.880.000,00
Custo com Manutenção (R\$/ ano)	1.330.000,00	5.000.000,00
Custo com Tratamento de Água (R\$/ ano)	1.000.000,00	3.500.000,00
Custo com mão-de-obra (R\$/ano)	250.000,00	500.000,00
Custo com Segurança, Eng. e Adm. (R\$/ano)	150.000,00	400.000,00
Custo Total (R\$/ ano)	26.250.000,00	36.280.000,00
Custo por Tonelada de Vapor (R\$/ ton. vapor)	15,63	21,6

Fonte: elaborado pelos autores.

A Tabela 3 representa o comparativo de receita entre as propostas de dessalinização com cogeração de energia e sem cogeração de energia. Os dados

desta tabela foram obtidos através da CAGECE e da ENEL distribuição, empresas responsáveis pelo abastecimento de água e energia de Fortaleza/ CE.

Tabela 3. Comparativo de receita de venda de energia elétrica e água potável.

Descrição	Proposta 1	Proposta 2
	Dessalinização sem cogeração de energia	Dessalinização com cogeração de energia
Volume de água vendida (m ³ / ano)	5.250.000,00	5.250.000,00
Volume de Energia vendido (MW)	-	25,05
MWh/ ano	-	210.420,00
Preço de Água vendida (R\$/ m ³)	5	4
Preço de Energia elétrica (R\$/ MWh)	-	250
Receita com água (R\$/ ano)	26.250.000,00	21.000.000,00
Receita com energia (R\$/ ano)		52.605.000,00
Receita Total (R\$/ ano)	26.250.000,00	73.605.000,00
Margem de Contribuição, R\$	0	37.325.000,00
Margem de Contribuição, % vendas	0	50,7

Fonte: adaptado de CAGECE (2018); ENEL distribuição (2018)

Estudo da Viabilidade Técnico-Econômica

Conceito de análise financeira

Na análise de viabilidade econômica deste projeto, foram utilizadas ferramentas para verificar se o projeto era economicamente viável, porém, é necessário conceituar fluxo de caixa, fluxo de caixa acumulado e descontado, taxa média anual de juros (TMA) para melhor entendimento, conforme Blank (2007):

- ✓ Fluxo de caixa são a saída e entrada de recursos financeiros no projeto.
- ✓ Fluxo de caixa acumulado é a soma do saldo do fluxo de caixa do período anterior com o saldo do período atual, não se considera nenhum desconto ou taxa.
- ✓ Fluxo de caixa descontado é a soma do saldo do fluxo de caixa do período anterior com o saldo do período atual, considerada a taxa média anual de juros.
- ✓ Taxa média anual de juros (TMA) é a taxa de rendimento na qual o dinheiro poderia estar rendendo se não estivesse sido utilizado no

projeto. Irá ser considerada uma TMA de 10%, para a realização dos nossos cálculos.

As ferramentas financeiras abaixo, podem ser aplicadas, após o conhecimento dos conceitos apresentados acima.

- ✓ Valor presente líquido (VPL), representada por uma série de pagamentos futuros descontando a taxa média anual de juros (TMA) que foi estipulada.
- ✓ Taxa Interna de Retorno (TIR) pode ser definida como a taxa de juros que uma aplicação financeira teria que render para ser tão lucrativa quanto ao novo projeto.
- ✓ PAYBACK, é tempo de retorno do investimento inicial até o momento no qual o ganho acumulado se iguala ao valor deste investimento. Existem dois tipos o simples e o descontado, cuja única diferença é que para o cálculo do PAYBACK simples utiliza-se o valor de fluxo de caixa acumulado, enquanto para o PAYBACK descontado utiliza-se o fluxo de caixa descontado.
- ✓ Retorno Sobre Investimento (ROI), que é indicado como o retorno financeiro, fornecendo um parâmetro entre o que é ganho com o que é gasto no projeto. Esta ferramenta é importante por medir o desempenho da empresa em certo investimento.

Através destes cálculos e estudos da parte econômica, foi possível montar as tabelas de comparação entre a proposta de investimento 1 e a proposta 2. Podendo comparar e confirmar qual o melhor investimento.

Análise Financeira das Propostas

Nas Tabelas 4 e 5, estão sendo apresentados as análises financeiras da Proposta 1 – Sem cogeração de energia e da Proposta 2 – Com cogeração de energia.

Para a realização desta análise financeira, pode-se notar que no ano inicial o investimento realizado tem um percentual de 75% de todo o investimento reservado a infraestrutura da planta. Para ampliação e aperfeiçoamento da planta, são destinados os 25% restantes. A fábrica tem aproximadamente, um ano e meio de previsão para construção.

Com base nas informações, pode-se realizar o cálculo do faturamento, considerando que no ano 1 o valor seria de 75% do previsto para faturamento do ano 2. Nos demais anos não foram considerados ajustes anuais.

Para o cálculo do Custo Operacional, levando em consideração as informações contidas na Tabela 2, também não foram considerados aumentos anuais. Desta forma, no ano 0 considera-se um custo de 15%, no ano 1 e no custo representa 70%, respectivamente levado em consideração o previsto no ano 2.

Tabela 4. Análise financeira da proposta 1: processo de dessalinização por multiploefeito sem cogeração de energia elétrica.

PROPOSTA 2 - PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO POR MULTIPLOEFEITO COM COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA									
Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Capital Investido - R\$	119.925.000,00	39.975.000,00	0	0	0	0	0	0	0
Faturamento - R\$	0	55.283.750,00	73.605.000,00	73.605.000,00	73.605.000,00	73.605.000,00	73.605.000,00	73.605.000,00	73.605.000,00
Custo Operacional - R\$	5.442.000,00	25.396.000,00	36.280.000,00	36.280.000,00	36.280.000,00	36.280.000,00	36.280.000,00	36.280.000,00	36.280.000,00
Fluxo de Caixa - R\$	-125.367.000,00	-19.167.250,00	37.325.000,00	37.325.000,00	37.325.000,00	37.325.000,00	37.325.000,00	37.325.000,00	37.325.000,00
Fluxo de Caixa - R\$ Acumulado	-125.367.000,00	-135.534.250,00	-98.209.250,00	-60.884.250,00	-23.559.250,00	13.765.750,00	51.090.750,00	88.415.750,00	125.740.750,00
Fluxo de Caixa - R\$ Descontado	-125.367.000,00	-9.242.954,55	30.847.197,44	28.042.824,94	25.493.477,22	23.175.888,38	21.068.989,44	19.153.626,76	17.412.387,97
Fluxo de Caixa - R\$ Descontado Acumulado	-125.367.000,00	-134.609.954,55	-103.762.847,11	-75.720.022,16	-50.226.544,94	-27.050.656,56	-5.981.667,12	13.171.959,64	30.584.347,61

Fonte: elaborado pelos autores.

Tabela 5. Análise financeira da proposta 2: processo de dessalinização por multiploefeito sem cogeração de energia elétrica.

PROPOSTA 2 - PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO POR MULTIPLOEFEITO SEM COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA									
Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Capital Investido - R\$	76.537.500,00	25.512.500,00	0	0	0	0	0	0	0
Faturamento - R\$	0	19.637.500,00	26.250.000,00	26.250.000,00	26.250.000,00	26.250.000,00	26.250.000,00	26.250.000,00	26.250.000,00
Custo Operacional - R\$	3.937.500,00	18.375.000,00	26.250.000,00	26.250.000,00	26.250.000,00	26.250.000,00	26.250.000,00	26.250.000,00	26.250.000,00
Fluxo de Caixa - R\$	-80.475.000,00	-24.200.000,00	0	0	0	0	0	0	0
Fluxo de Caixa - R\$ Acumulado	-80.475.000,00	-104.675.000,00	-104.675.000,00	-104.675.000,00	-104.675.000,00	-104.675.000,00	-104.675.000,00	-104.675.000,00	-104.675.000,00
Fluxo de Caixa - R\$ Descontado	-80.475.000,00	-22.000.000,00	0	0	0	0	0	0	0
Fluxo de Caixa - R\$ Descontado Acumulado	-80.475.000,00	-102.475.000,00	-102.475.000,00	-102.475.000,00	-102.475.000,00	-102.475.000,00	-102.475.000,00	-102.475.000,00	-102.475.000,00

Fonte: elaborado pelos autores.

Tabela 6. Comparação dos indicadores financeiros das propostas 1 e 2.

Descrição do Processo	Proposta 1 Dessalinização sem cogeração de energia	Proposta 2 Dessalinização com cogeração de energia
Investimento - R\$	102.050.000,00	159.900.000,00
Faturamento - R\$/ano	26.250.000,00	73.605.000,00
Custo Total - R\$/ano	26.250.000,00	36.280.000,00
Margem de contribuição (Lucro bruto) - R\$/ano	0,00	37.325.000,00
Margem de contribuição (Lucro bruto/venda) - R\$/ano - %	0,00	50,70
VPL - R\$	-	13.171.959,64
TIR - %	-	17,03
Payback simples - anos	-	5,63
Payback descontado - anos	-	7,17
ROI Simples - %	-	17,76
ROI Desconto - %	-	13,95

Fonte: elaborado pelos autores.

Abaixo, seguem considerações referentes às propostas acima mencionadas.

- ✓ Na proposta 1, o faturamento é igual ao custo de operação, (margem de contribuição igual a zero), não existindo lucro para amortizar o investimento, portanto não ocorre retorno financeiro, já na proposta 2, nota-se que ouve um retorno financeiro de TIR= 17,03%.
- ✓ Na proposta 2 o VPL é de R\$ 13.171.959,64, tornando-se assim lucrativo em relação a proposta 1 que é nula.
- ✓ Na proposta 2 o Payback simples é de 5 anos e meio e o descontado de 7 anos, levando anos para um retorno de investimento, e o ROI simples será de 17,76% e o descontado de 13,95%.

Levando-se em consideração os cálculos de projeto, são evidentes as vantagens financeiras que a proposta 2 apresenta em relação a proposta 1. Além de ser uma oportunidade única, pois o preço da energia elétrica pode oscilar, dependendo dos níveis dos reservatórios hidráulicos no Brasil. Também, sendo benéfico em relação ao efeito estufa, devido à utilização de biomassa de eucalipto como combustível, além destes ser plantados em florestas próximas a indústria, onde estas consomem através da fotossíntese o gás carbônico produzido.

Portanto, esta proposta 2 é viável para um investimento governamental a curto prazo, pois proporciona um retorno financeiro, além de melhorar a infraestrutura de água para a população de Fortaleza/ CE. Tratando-se de um investimento de infraestrutura e bem-estar da população, não necessariamente é necessário obter-se um retorno financeiro, pois em tese, os impostos deveriam

ser necessários para realizar o investimento. No entanto, o retorno financeiro, ajuda a aprovar o projeto para instalação a curto prazo.

CONCLUSÃO

Em aspecto geral, pode-se concluir que a dessalinização de água do mar com processo de cogeração de energia utilizando biomassa de eucalipto como fonte renovável de energia obteve os resultados esperados, no âmbito social, econômico e ambiental.

Através de pesquisas, pode-se notar que a elaboração de um projeto de dessalinização na região de Fortaleza/ CE, seria uma adequada opção para se resolver a grave crise hídrica que o município anda enfrentando, sendo a problemática inicial do trabalho. Por outro lado, um processo de dessalinização tem um custo relativamente alto, em comparação ao tratamento convencional de água, principalmente quando compara-se o volume de água tratada, ou seja, a dessalinização é uma opção somente em locais onde não se dispõe de água doce em abundância.

Após realizar uma análise financeira do projeto, considerando os gastos principais, retorno e análises de taxas necessárias, tornou-se evidente que a proposta 2, onde se adiciona ao processo de dessalinização, uma caldeira de alta pressão que irá fornecer vapor de alta pressão o turbo-gerador para cogeração de energia, é a mais viável, se comparada a um processo sem cogeração de energia, com caldeira de baixa pressão e sem turbo-gerador instalado. O retorno do investimento será de 2 anos.

Ao adotar um processo de evaporação por múltiplo efeito, reaproveitando os vapores gerados, teremos resultados ambientais e econômicos significativos. Além de se utilizar uma caldeira de alta pressão onde se tem um ganho na produção energética, aumentando assim a energia gerada, que por sua vez se utiliza no processo, dispensando a compra de energia elétrica, vendendo o excedente desta energia para terceiros, trazendo lucro a longo prazo.

Levando em consideração o cuidado e respeito ao meio ambiente, observou-se, que o projeto apresentado não busca apenas obter lucros, mas também economizar energia e diminuir o impacto ambiental.

O objetivo de apresentar o processo de dessalinização de água do mar, assim como determinar a sua viabilidade econômica foi totalmente cumprido e detalhado neste trabalho, propiciando mais um estudo de caso para análise de profissionais de projeto industrial, operação de processos químicos e da área acadêmica.

REFERÊNCIAS

ANDRITZ SEPARATION LTDA. **Dados fornecidos para cotação de investimento do projeto.** Obtidos em: 11 set. 2019.

AZZOLINI, P. **Moderno conceito de geração de energia elétrica com turbinas TGM.** 2007. Disponível em: <https://www.coursehero.com/file/6018802/06-TGM-TURBINAS-Sr-Paulo-Azzolini/>. Acesso em: 05 mai. 2019.

AZZOLINI, P. Tecnologias de Turbinas a Vapor. In: 4º. Congresso Brasileiro de Eficiência Energética e Cogeração de Energia da ABESCO, 2007. São Paulo. **Anais.** São Paulo, v.3, p.278-285. CD-ROM.

BARCELLOS, D. C.; COUTO, L. C.; MULLER, M. D.; COUTO, L. O estado da arte da qualidade da madeira de eucalipto para produção de energia: Um enfoque nos tratamentos silviculturais. **RENABIO-Biomassa/Energia**, v.2, n.2, p.141-158, 2005.

BLANK, L. **Engenharia Econômica.** 6.ed. São Paulo: Editora Atlas, 2007.

CAGECE – COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CÉARA. **Estrutura Tarifária.** 2018. Disponível em: https://www.cagece.com.br/atendimentovirtual/faces/publico/home.xhtml?page=estrutura_tarifaria. Acesso em: 11 set. 2019.

ENEL DISTRIBUIÇÃO. **Tarifas.** 2018. Disponível em: <https://www.eneldistribuicao.com.br/ce/TaxasETarifas.aspx>. Acesso em: 11 set. 2019.

FRAGOSO, S. **A falta de água no Brasil.** 2015. Disponível em: <http://www.administradores.com.br/artigos/cotidiano/a-falta-de-água-no-brasil/85293/>. Acesso em: 31 mar. 2019.

G1 – PORTAL GLOBO. **Fortaleza e mais 11 municípios cearenses entram em situação de emergência por causa da seca.** 2017. Disponível em: <https://g1.globo.com/ceara/noticia/fortaleza-e-mais-11-municipios-cearenses-entram-em-situacao-de-emergencia-por-cao-da-seca.ghtml>. Acesso em: 02 mar. 2019 a.

G1 – PORTAL GLOBO. **Fortaleza segue como a 5ª cidade mais populosa do Brasil, diz IBGE.** 2016. Disponível em: <http://g1.globo.com/ceara/noticia/2016/08/fortaleza-segue-como-5-cidade-mais-populosa-do-brasil-diz-ibge.html>. Acesso em: 02 mar. 2019 b.

san, A, F. **Projeto de dimensionamento básico para obtenção de água potável a partir da dessalinização da água do mar.** Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química), UNIFAE, São João da Boa Vista-SP, 2017.

KOPITTKKE, B, H; FILHO, C, N. **Análise de Investimento.** São Paulo: Editora Atlas. 2010.

MORAES, F, A, B. **Introdução ao projeto na indústria química.** Apostila do curso de projetos de processos químicos industriais do curso de engenharia química da UNIFAE de São João da Boa Vista/SP e FMPFM de Mogi Guaçu/SP. 2014. Disponível em <<https://pt.scribd.com/document/239738174/Apostila-Projeto-Quimico>>. Acesso em: 04 jun. 2019

PIRES, D. **Duplicação de adutora reforça abastecimento de água em Fortaleza.** 2017. Disponível em: <<http://www.ceara.gov.br/2017/09/21/duplicacao-de-adutora-reforca-abastecimento-de-agua-em-fortaleza/>>. Acesso em: 02 mar. 2019.
SABESP. **Dicas de economia.** 2018. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=140>>. Acesso em: 31 mar. 2019.

SANTOS, A, L. **Projeto de dimensionamento básico de um processo de cogeração de energia com caldeira de biomassa.** Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química) 2017 – UNIFAE, São João da Boa Vista-SP, 2017.

SILVEIRA, A. *et al.* **Dessalinização de Águas.** São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2015.

SUEZ Environmental Brasil. **Dados fornecidos para cotação de investimento do projeto.** Obtidos em: 11 set. 2019.

Os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.