



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TALITA OTONI GONÇALVES DE CARVALHO

**CONTROLE PREDITIVO GENERALIZADO APLICADO A UM PROCESSO DE
DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA**

FORTALEZA

2023

TALITA OTONI GONÇALVES DE CARVALHO

CONTROLE PREDITIVO GENERALIZADO APLICADO A UM PROCESSO DE
DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Bismark Claire Torrico.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C329c Carvalho, Talita Otoni Gonçalves de.
Controle Preditivo Generalizado Aplicado A Um Processo De Dessalinização Por Osmose Reversa /
Talita Otoni Gonçalves de Carvalho. – 2023.
68 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Bismark Claire Torrico.
Coorientação: Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira.

1. Controle Preditivo. I. Título.

CDD 621.3

TALITA OTONI GONÇALVES DE CARVALHO

CONTROLE PREDITIVO GENERALIZADO APLICADO A UM PROCESSO DE
DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 28/09/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. René Descartes Olímpio Pereira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dr^a. Rejane Cavalcante Sá
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

À Deus.

Ao meu pai, seu amor incondicional foi essencial para minha conquista e eu não poderia ter chegado tão longe sem você.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por me guiar, fortalecer e prover apoio durante esta caminhada, sou grata também pela sabedoria para tomar as decisões certas ao longo do caminho, por me trazer conforto, esperança e motivação durante os desafios e obstáculos e pela força para conseguir persistir diante das dificuldades. Ao meu pai, Mário Otoni, sua dedicação em me fornecer as oportunidades necessárias para o meu crescimento e desenvolvimento. Seja financeiramente, emocionalmente ou de qualquer outra forma, fazendo sempre o possível para garantir que eu tivesse as ferramentas e recursos necessários para buscar meus sonhos. Seu amor, apoio e orientação moldaram quem eu sou hoje e me capacitaram a alcançar o sucesso.

Essa conquista é nossa, e dedico a você como uma expressão de gratidão e amor. Ao meu irmão David, meu tio Carvalho e minha avó Maria Aldair, obrigada por todo amor, apoio nos momentos de dificuldade, suporte, compreensão, empatia e encorajamento. Aos amigos que conquistei durante esta caminhada, José Raimundo, Aparecida, Breno, Dayse e Fádua. Sem eles esta conquista não teria sido possível, obrigada por todo suporte acadêmico e emocional, pela amizade e carinho. Aos meus colegas Gabriel e Renê, obrigada por toda ajuda com as disciplinas, foram essenciais para esta conquista. Ao Prof. Dr. Bismark Claire Torrico por me orientar em minha dissertação de mestrado. Ao Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira, Coordenador do PPGEE - UFC.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos professores que estiveram ao meu lado durante esta jornada acadêmica. Suas contribuições foram inestimáveis e moldaram significativamente minha educação e desenvolvimento pessoal.

E à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento (Funcap), na pessoa do Presidente Tarcísio Haroldo Cavalcante Pequeno pelo financiamento da pesquisa de mestrado via bolsa de estudos.

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana.”

(Carl Jung).

RESUMO

Considerando a possível escassez de água potável no futuro, o processo de Osmose Reversa, surge como uma solução promissora capaz de transformar a água salgada em água potável. Este estudo apresenta a sintonia e a implementação de um controlador preditivo generalizado para controle e simulação de uma planta de dessalinização por Osmose Reversa. A estratégia propõe o controle do fluxo e da condutividade da água produzida no processo através da manipulação da pressão e do pH da água de alimentação do sistema, sendo comparado a um controlador proporcional-integral-derivativo convencional. Como resultados de simulações, o GPC proposto apresentou melhores índices de desempenho quanto à integral do erro absoluto para 9 cenários e equivalente para 2 dos 16 avaliados. Quanto à variação total do sinal de controle, outro índice de desempenho, o controlador GPC estudado foi melhor em 6 cenários e equivalente em 2 dos 16 cenários analisados. Conclui-se que os resultados mostraram que a estrutura proposta apresenta uma rejeição de perturbação mais rápida tanto na malha de fluxo quanto na malha de condutividade e melhores índices de desempenho para a maioria das etapas analisadas.

Palavras-chave: Osmose Reversa; Dessalinização; Controle preditivo baseado em modelo; controle preditivo generalizado; Índice de robustez.

ABSTRACT

Considering the possible scarcity of potable water in the future, the Reverse Osmosis process appears as a promising solution capable of transforming salt water into potable water. This study presents the tuning and implementation of a generalized predictive controller to control and simulate a reverse osmosis desalination plant. The strategy proposes controlling the flow and conductivity of the water produced in the process by manipulating the pressure and pH of the system's feed water, being compared to a conventional proportional-integral-derivative controller. As simulation results, the proposed GPC presented better performance indices regarding the absolute error integral for 9 scenarios and equivalent for 2 of the 16 evaluated. As for the total variation of the control signal, another performance index, the GPC controller studied was better in 6 scenarios and equivalent in 2 of the 16 scenarios analyzed. It is concluded that the results showed that the proposed structure presents a faster disturbance rejection both in the flux and in the conductivity mesh and better performance indices for most of the analyzed steps.

Keywords: Reverse osmosis; Desalination; Model predictive control; Generalized predictive control; Robustness index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos processos de dessalinização	19
Figura 2 – Esquema de uma unidade de dessalinização por Osmose Reversa	22
Figura 3 – Esquema do sistema de dessalinização MSF-BR	31
Figura 4 – Esquema de uma unidade de MED	33
Figura 5 – Esquema de um Sistema de Compressão Térmica à Vapor	34
Figura 6 – Esquema de destilação por Energia Solar	35
Figura 7 – Destilação por congelamento direto	37
Figura 8 – Destilação por congelamento indireto	38
Figura 9 – Diagrama de um sistema de <i>feedback</i> simples (controlador de <i>feedback</i>)	39
Figura 10 – Controlador PID	41
Figura 11 – Diagrama esquemático de plantas de OR	52
Figura 12 – Controlador PID	56
Figura 13 – Caso nominal	61
Figura 14 – Caso incerto	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do Controlador	60
Tabela 2 – População brasileira por situação em domicílio em 2003	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

atm.	Atmosférica
Ca ²⁺	Cálcio
CARIMA	<i>Controlled Autoregressive Integrated Moving Average</i>
Funcap	Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento
GOR	Gain Output Ratio
GPC	Generalized Predictive Control
MED	Multi-Effect Distillation
MPC	Model Predictive Control
MSF	Multi-Stage Flash
MSF-BR	Multi-Stage Flash Brine Recycle
MVC	Mechanical Vapor Compression
N/m ²	Newton por metro quadrado
Na ⁺	Sódio
pH	Potencial hidrogeniônico
PID	Proporcional Integral Derivativo
RO	Osiose Reversa
TFC	Thin-Film Composite
VTC	Vapor Thermal Compression
m ³ /h	Metros cúbicos por hora
nm	Nanômetro

LISTA DE SÍMBOLOS

β	Beta
Δ	Delta
\in	pertence
π	Pi
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivos	16
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	16
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	16
1.3	Estrutura da dissertação	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Dessalinização da água	18
2.2	Dessalinização por Osmose Reversa	19
<i>2.2.1</i>	<i>Conceito e princípios da Osmose Reversa</i>	19
<i>2.2.2</i>	<i>Mecanismo de dessalinização</i>	21
<i>2.2.3</i>	<i>Membrana de Osmose Reversa</i>	22
<i>2.2.4</i>	<i>Funcionamento da membrana de Osmose Reversa</i>	23
<i>2.2.5</i>	<i>Parâmetros de influência no processo de Osmose Reversa</i>	24
<i>2.2.6</i>	<i>Aplicações da dessalinização por Osmose Reversa</i>	26
2.3	Outras tecnologias para dessalinização de água	29
<i>2.3.1</i>	<i>Destilação Flash de múltiplos estágios (MSF)</i>	29
<i>2.3.2</i>	<i>Destilação múltiplo efeito (MED)</i>	32
<i>2.3.3</i>	<i>Destilação por Compressão Térmica à Vapor</i>	34
<i>2.3.4</i>	<i>Destilação através de Energia Solar</i>	35
<i>2.3.5</i>	<i>Destilação por congelamento</i>	37
2.4	Controladores de rastreamento	40
2.5	Controladores PID	42
2.6	Controle Preditivo Generalizado	45
<i>2.6.1</i>	<i>Princípios do Controle Preditivo Generalizado</i>	46
<i>2.6.2</i>	<i>Modelo de planta CARIMA e a predição de saída</i>	46
<i>2.6.3</i>	<i>A função custo do GPC</i>	50
3	METODOLOGIA	53
3.1	Apresentação do modelo de uma planta de Osmose Reversa utilizado	53
3.2	Estrutura do controlador aplicado	55
3.3	Análise de robustez	57

3.4	Procedimento de sintonia do controlador	58
4	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	60
5	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Mesmo que 70% da superfície do planeta da Terra seja coberta por água, somente 2,5% é constituída por água doce (CHEN *et al.*, 2019). No Brasil, esse percentual é de 12% (QUEIROZ, 2021). Os recursos hídricos disponíveis, atualmente, são insuficientes considerando a demanda global. Além do que, parte destes recursos ainda é gerenciado de forma insustentável devido a fatores como desperdício e poluição (IHSANULLAH *et al.*, 2021).

O difícil acesso à água potável é considerado um problema que tende piorar nos próximos anos e afeta pessoas em todo o mundo, principalmente aquelas que vivem em regiões áridas e semiáridas, que representam um terço da população rural dos países em desenvolvimento (THEODORE; DUPONT, 2019). Neste sentido, as tecnologias de dessalinização que removem sais dissolvidos e outros minerais da água salobra, fornecendo água doce para uso potável e não potável, tornando-se, assim, uma solução para a sobrevivência da humanidade.

Dessa forma, dentre as tecnologias de dessalinização, destaca-se a Osmose Reversa, considerada um processo no qual se utiliza da pressão para forçar um solvente através de uma membrana semipermeável, solvente este que se encontra em uma região de alta concentração de soluto e sofre uma pressão maior que a pressão osmótica da solução, sendo, portanto, transportada para uma região de baixa concentração de soluto. Onde o solvente puro, resultado da porção de água que passou através da membrana semipermeável, é denominado de permeado (RATHORE *et al.*, 2015).

O processo de Osmose Reversa apresenta restrições de temperatura, pH, pressão, fluxo e resistência a oxidação. Restrições estas que devem ser atendidas dentro de um custo de instalação aceitável, disponibilidade de habilidades operacionais e de manutenção adequada (MINDLER; EPSTEIN, 1986).

Para atender estas restrições a fim de se obter resultados operacionais ótimos, torna-se necessário a medição e/ou o controle de parâmetros como pressão, fluxo, condutividade e pH. O controle da pressão se deve ao fato de que é necessária a aplicação da pressão de salmoura adequada para que ocorra a transferência de massa de água e sais e para proteger o sistema de Osmose Reversa de danos físicos. O controle da condutividade é feito para assegurar que o permeado tenha qualidade satisfatória e para detectar incrustações ou vazamentos dentro do módulo de Osmose Reversa. O controle do fluxo garante a produtividade adequada. O controle do pH previne a incrustação alcalina, promove estabilidade da membrana e otimiza a rejeição de sal (MINDLER; EPSTEIN, 1986).

1.1 Motivação

Considerando a possível escassez de água potável no futuro, o processo de Osmose Reversa, surge como uma solução promissora capaz de transformar a água salgada em água potável. E para viabilizar mais ainda esse processo, a aplicação de um controlador preditivo generalizado (GPC, do inglês *Generalized Predictive Control*) na planta possibilitará que a produtividade e condutividade da água produzida sejam monitorados e automatizados, garantindo assim uma maior eficiência operacional no processo, reduzir erros humanos e otimização do consumo de energia elétrica. Além disso, sendo a água potável elemento fundamental e necessário para o futuro e sobrevivência do ser humano, pensar em escassez de água potável é pensar em extinção da espécie.

Destarte, justifica-se a realização deste estudo como forma de apresentar um método, potencialmente, passível de substituir controladores PID (Proporcional Integral Derivativo) para aplicações em plantas de dessalinização por Osmose Reversa, capaz de oferecer e garantir uma forma sustentável de obter água potável, conforme pedido da Organização da Nações Unidas em 2015 para prosperidade do planeta (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2015).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Apresentar um controlador preditivo generalizado aplicada a uma planta de dessalinização por Osmose Reversa.

1.2.2 Objetivos específicos

- Sintonizar e implementar um Controlador Preditivo Generalizado (GPC), que é uma estratégia MPC (*Model Predictive Control*), que combina o modelo do processo e o modelo da perturbação para controle e simulação de uma planta de Osmose Reversa;
- Simular aspectos como rejeição de perturbações, seguimento de referência e resposta do sistema às incertezas com intuito de ilustrar os benefícios da

metodologia de controle proposta;

- Comparar seu desempenho com um controlador PID convencional.

1.3 Estrutura da dissertação

Objetivando uma melhor compreensão, esta dissertação encontra-se dividida em sete capítulos. Na introdução, procede a delimitação do tema, problema da pesquisa, justificativa da pesquisa e objetivos da pesquisa e sua estrutura. Em seguida, o capítulo 2 apresenta o referencial teórico. No capítulo 3 a metodologia e o capítulo 4 estão a apresentação e análise dos resultados e; por fim, no capítulo 5 apresenta a conclusão.

No capítulo 2 segue a fundamentação teórica, a fim de dar embasamento sobre o tema estudado, esse capítulo encontra-se subdividido cinco subtópicos sendo eles: dessalinização da água; dessalinização por Osmose Reversa; outras tecnologias para dessalinização de água (destilação *flash* de múltiplos estágios; destilação múltiplo efeito; destilação por compressão térmica do vapor); controladores PID (Proporcional Integrativo Derivativo) e; controladores de rastreamento.

No capítulo 3 é exposta a metodologia onde constam os instrumentos e procedimentos utilizados da pesquisa, sendo assim apresentado a estrutura do controlador aplicado, descrição da análise de robustez, definindo matematicamente a condição de estabilidade robusta, o procedimento de sintonia do controlador e o exemplo de simulação onde são evidenciados os parâmetros utilizados para a sintonia do controlador proposto, incluso uma descrição dos índices de desempenho utilizados e uma comparação detalhada entre o controlador PID convencional e o GPC

O capítulo 4 compara um controlador PID descentralizado, sintonizado conforme a proposta de Lee et al. (2004), com um controlador GPC (*Generalized Predictive Control*) em um contexto de robustez. O GPC foi sintonizado para garantir índices de robustez comparáveis aos do PID. As simulações envolveram perturbações de degrau nas referências de fluxo e condutividade, além de perturbações na entrada de pressão e pH. Em cenários nominal e com incertezas modeladas por uma redução de 50% no ganho estático da malha de condutividade e pH, os sinais de saída e controle foram analisados. Os índices de desempenho (IAE e TV) para ambos os controladores, em ambas as condições, estão resumidos na Tabela 2.

E, por fim, no Capítulo 5, apresentam-se os resultados da comparação entre a aplicação de ambos os controladores, utilizando como critério os índices de desempenho nos 16 cenários avaliados. Ilustram-se os resultados da sintonia do GPC na planta em questão,

avalia-se o potencial do GPC em substituir o PID na aplicação em plantas de dessalinização por Osmose Reversa e, por fim, fazem-se sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fim de promover embasamento teórico ao presente estudo, neste capítulo apresentam-se os principais conceitos e contextualização sobre: dessalinização da água; dessalinização por Osmose Reversa; outras tecnologias para dessalinização de água (destilação flash de múltiplos estágios; destilação múltiplo efeito; destilação por compressão do vapor); controladores PID e; controladores de rastreamento.

2.1 Dessalinização da água

Sabe-se que a dessalinização da água é remota bem antes do cristianismo. No período das navegações se utilizavam da técnica por evaporação para conseguir água potável com a separação dos cristais de sal da água. Dessa forma, a dessalinização é entendida como “a remoção de sais da água salobra ou da água do mar” (GOMES *et al.*, 2022, p. 12).

Tal processo acontece de formas natural no planeta, durante o período do dia, que por meio do “ciclo hidrológico da Terra”, as águas dos mares, rios e lagoas, evaporam por meio da radiação emitida pelo sol, e se condensam, formando as nuvens. Em seguida, se precipitam em forma de chuva (ARAÚJO, 2013).

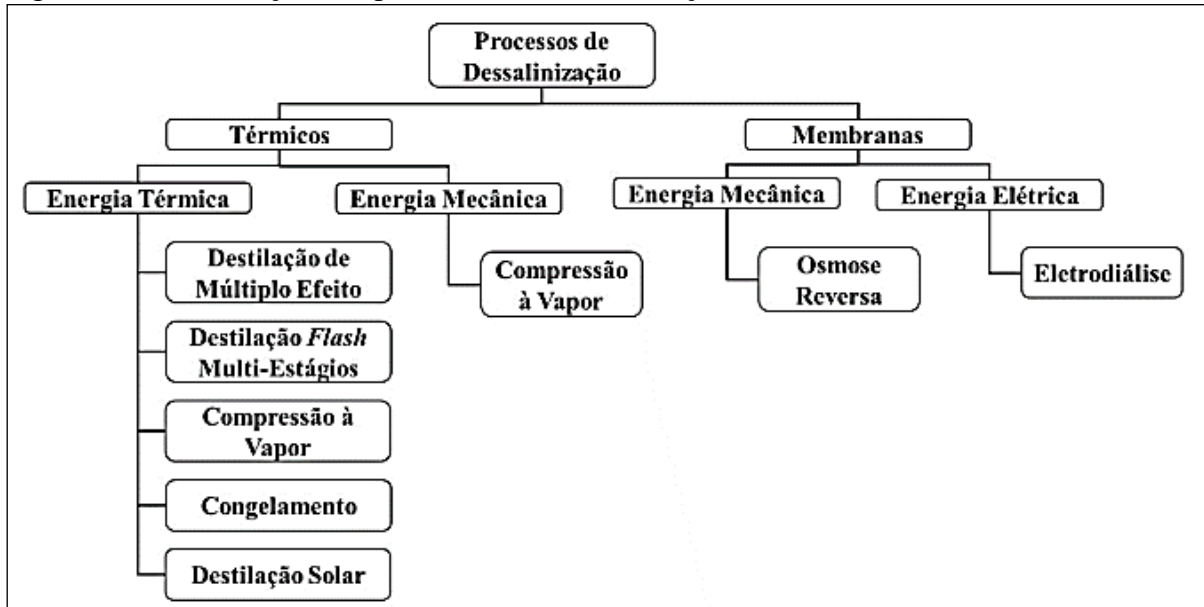
A dessalinização da água para a obtenção de água potável é, notadamente, um tema bastante abordado por vários estudos (ARAÚJO, 2013; ARAUJO; ROSA; OLIVEIRA, 2021; COSTA; SANTOS, 2018; GOMES FILHO; ROCHA; OLIVEIRA, 2015; SILVA; QUIRINO, 2020; SIQUEIRA; MARTINS; VIANA, 2022; SOUZA, 2006) ao longo do tempo. Este tema é abordado a fim de buscar a melhor forma de obter água doce, como forma de sanar o problema da escassez de água potável, bem como pela sua sustentabilidade, conforme proposto pela Organização da Nações Unidas em 2015, como uma das metas para até 2030 (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2015).

A dessalinização da água salgada ou salobra representa um processo mais viável e econômico, comparado ao processo de captação e tratamento de água proveniente de rios e lagos, devido seu grau de redução e contaminação (GOMES FILHO; ROCHA; OLIVEIRA, 2015). Considera-se dessalinizada a água que alcançar menos de 100 mg.L-1 (miligramas por litro) de sais ou de total de sólidos dissolvidos (TDS) (ARAUJO; ROSA; OLIVEIRA, 2021).

Para melhor compreensão segue abaixo na Figura 1 a classificação dos processos de dessalinização quanto à formação de fase e à fonte de energias requerida pelo processo. Nos

processos térmicos encontram-se divididos em energia térmica e energia mecânica e nos processos que envolvem as membranas, em energia mecânica e energia elétrica.

Figura 1 – Classificação dos processos de dessalinização



Fonte: Siqueira, Martins e Viana (2022, p. 4).

De acordo com o esquema apresentado na Figura 1, em relação à formação de fase, os processos de dessalinização podem ser classificados em térmicos (quando há mudança de fase) ou de separação por membrana (quando não há mudança de fase). Quanto a fonte de energia para gerar o processo, pode ser classificada em térmica, mecânica ou elétrica.

Atualmente, a dessalinização por Osmose Reversa é definida no meio científico, como o processo mais aplicado devido sua eficiência e economia (ARAUJO; ROSA; OLIVEIRA, 2021; SILVA; QUIRINO, 2020), tendo em vista que esse método apresenta uma grande quantidade de registros de patentes nos últimos anos (GOMES *et al.*, 2022). Sendo assim, esse método, foco desta pesquisa, é apresentado a seguir.

2.2 Dessalinização por Osmose Reversa

Nesta secção, aborda-se o tema da dessalinização por Osmose Reversa, um processo amplamente utilizado para a obtenção de água potável a partir de fontes salinas. Apresentando o conceito e princípios básicos da Osmose Reversa, seu funcionamento, aplicações e desafios associados ao seu uso como tecnologia de dessalinização

2.2.1 Conceito e princípios da Osmose Reversa

Segundo El-Salam (2003) a dessalinização por Osmose Reversa, trata-se de um processo amplamente utilizado para a obtenção de água potável a partir de fontes salinas. Seu processo constitui-se na separação de solutos e solventes baseado no fenômeno da difusão, onde um solvente é forçado a passar de uma solução mais concentrada para uma solução menos concentrada através de uma membrana semipermeável sob pressão externa. A pressão externa desempenha um papel crucial na superação da osmose e permite que o solvente passe pela membrana na Osmose Reversa. Na osmose natural, as moléculas de solvente se movem de uma região de menor concentração de soluto para uma região de maior concentração de soluto, através de uma membrana semipermeável. Esse movimento ocorre devido à diferença de pressão osmótica entre as duas soluções.

Classificado como um processo de membrana com uso de energia mecânica, a Osmose Reversa, ocorre em sentido inverso ao da osmose natural, passando assim a água do meio mais concentrado para o menos concentrado (SIQUEIRA; MARTINS; VIANA, 2022).

Na Osmose Reversa, o processo é revertido pela aplicação de pressão externa no lado com maior concentração de soluto. Essa pressão neutraliza a pressão osmótica, empurrando efetivamente as moléculas de solvente do lado da solução concentrada para o lado da solução diluída através da membrana semipermeável. A pressão externa aplicada precisa ser maior que a pressão osmótica para inverter a direção do fluxo do solvente. Ao exceder a pressão osmótica, a pressão aplicada permite que as moléculas do solvente superem a tendência natural de passar de baixa para alta concentração, permitindo que passem pela membrana (EL-SALAM, 2003).

A importância da pressão externa reside na sua capacidade de conduzir o processo de Osmose Reversa de forma eficiente. Ao aumentar a pressão aplicada, a taxa de fluxo de permeado e a eficiência geral do processo podem ser aprimoradas. No entanto, é fundamental existir um equilíbrio, pois uma pressão excessiva pode danificar a membrana ou aumentar o consumo de energia. Assim, a pressão externa é um fator vital na Osmose Reversa, pois permite a separação de solutos e solventes, facilitando a produção de água purificada ao forçar o solvente a se mover contra seu gradiente de concentração através da membrana semipermeável (MOHAMMADIFAKHR *et al.*, 2020).

Segundo Cuenca (2020, p. 3) a Osmose Reversa comumente utilizado nas diversas áreas industriais, principalmente, na dessalinização da água do mar e na purificação da água bruta, trata-se de um processo que:

consiste em conduzir a água bruta (alimentada) em alta pressão através de uma membrana semipermeável, que permite a separação de partículas indesejadas contidas na água, a fim de obter água pura e ultrapura, conforme necessário. deste modo, obtém-se, por um lado, um fluxo de água pura (filtrada) sem pressão e, por outro lado, um fluxo de água com partículas indesejadas (rejeição) a alta pressão.

Ainda segundo Cuenca (2020), com o aumento da aplicação da Osmose Reversa na dessalinização da água do mar, uma preocupação de se usar uma estratégia de controle que permita um melhor controle surge sobre as variáveis críticas desse processo, a fim de promover uma água de boa qualidade com baixo consumo de energia e baixo custo de produção. Sendo, portanto, importante apresentação de um sistema de controle eficaz para assegurar a produção de potável de boa qualidade.

2.2.2 Mecanismo de dessalinização

Conforme apresentado por Valavala *et al.* (2011), o mecanismo de dessalinização por Osmose Reversa, envolve seis etapas descritas a seguir:

(1) Pré-tratamento: a água de alimentação, que pode ser água do mar ou água salobra, passa por um pré-tratamento para remover partículas grandes, sólidos suspensos e quaisquer substâncias que possam sujar ou danificar as membranas de Osmose Reversa. Isso pode incluir processos como sedimentação, filtração e dosagem química.

(2) Pressurização: a água pré-tratada é pressurizada por meio de bombas de alta pressão. A pressão aplicada é maior que a pressão osmótica, permitindo que a água supere a tendência natural de passar de baixa concentração de soluto para alta concentração de soluto.

(3) Separação por membrana: a água pressurizada é então passada através de uma série de membranas semipermeáveis, normalmente feitas de composto de filme fino (TFC) ou acetato de celulose. Essas membranas possuem poros extremamente pequenos que permitem a passagem de moléculas de água enquanto bloqueiam a passagem de sais dissolvidos e outras impurezas.

(4) Fluxos de permeado e concentrado: à medida que a água pressurizada passa pelas membranas, ela se separa em dois fluxos: o permeado e o concentrado. O permeado contém a água purificada, enquanto o concentrado, também conhecido como salmoura ou fluxo de rejeitos, contém os sais concentrados e as impurezas que não passaram pelas membranas.

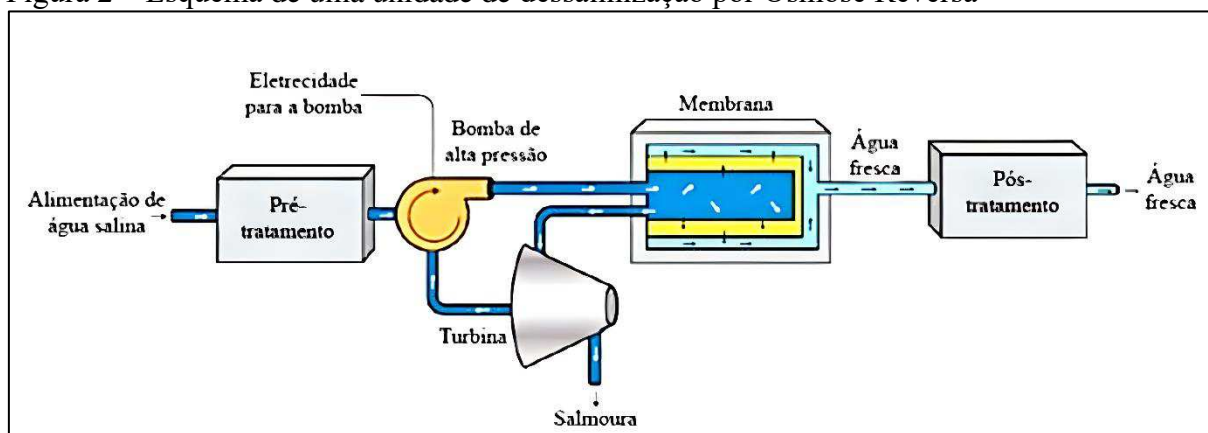
(5) Pós-Tratamento: o permeado do processo de membrana pode sofrer tratamento adicional para ajustar seu pH, remineralizá-lo e desinfetá-lo, dependendo do uso pretendido.

Garantindo que o produto atenda aos padrões de qualidade da água exigidos.

(6) Recuperação de energia (opcional): em algumas usinas de dessalinização por Osmose Reversa, dispositivos de recuperação de energia, como trocadores de pressão ou turbinas de recuperação de energia, são empregados para recuperar e reutilizar a energia do fluxo de concentrado. Isso ajuda a reduzir o consumo geral de energia do processo.

A Figura 2 apresenta um esquema de uma unidade de dessalinização por Osmose Reversa.

Figura 2 – Esquema de uma unidade de dessalinização por Osmose Reversa



Fonte: Siqueira, Martins e Viana (2022, p. 6).

Ao repetir essas etapas em uma série de módulos de membrana, o processo de dessalinização por Osmose Reversa pode atingir um alto nível de rejeição de sal e produzir água doce com baixa salinidade (VALAVALA *et al.*, 2011).

Conforme Siqueira, Martins e Viana (2022), atualmente, esse método é o mais aplicado, pois possui uma capacidade diária entre 0,1 m³/dia em aplicações marítimas e domésticas e acima de 128.000 m³/dia em aplicações comerciais. O consumo de energia varia entre 4 e 6 kW h/m³.

2.2.3 Membrana de Osmose Reversa

Em relação a composição de uma membrana de Osmose Reversa, seu *design* normalmente têm uma estrutura constituída em várias camadas. Mayyahi (2018) apresenta os principais componentes de uma membrana de OR que são:

Camada *Thin-Film Composite* (TFC): camada ativa da membrana e é responsável pela separação de sais e impurezas da água. A camada de TFC é tipicamente feita de um filme

fino de um material de poliamida, que é formado no topo de uma camada de suporte porosa. A camada de poliamida contém uma matriz densa de cadeias poliméricas interconectadas com permeabilidade seletiva às moléculas de água. Estas camadas são descritas da seguinte forma:

- Camada de suporte: camada de suporte fornece resistência mecânica à membrana e evita que ela seja facilmente danificada. É tipicamente feito de um material poroso, como polissulfona ou poliétersulfona. A camada de suporte pode ter uma estrutura de poros graduados, com poros maiores no lado da água de alimentação e poros menores no lado do permeado.
- Reforço de tecido: em algumas membranas, uma camada de reforço de tecido é adicionada entre a camada de suporte e a camada de TFC ativa. Este reforço ajuda a melhorar a estabilidade mecânica da membrana e a resistência à pressão.

Ainda segundo Mayyahi (2018) o *design* específico e a composição das membranas de Osmose Reversa podem variar dependendo do fabricante e da aplicação. Avanços na tecnologia de membranas levaram ao desenvolvimento de membranas com melhor rejeição de sal, maiores taxas de fluxo de água e maior durabilidade. Pesquisadores e engenheiros continuam a explorar materiais inovadores e configurações de membrana para melhorar o desempenho e a eficiência das membranas de Osmose Reversa para dessalinização e outras aplicações de tratamento de água.

2.2.4 Funcionamento da membrana de Osmose Reversa

Quanto ao seu funcionamento, a membrana de Osmose Reversa tem a função de reter os sais dissolvidos e outras impurezas, utilizando uma combinação de processos físicos e químicos. Para Gullinkala *et al.* (2010) os principais mecanismos envolvidos nesse processo são:

- Exclusão de tamanho: a membrana de Osmose Reversa tem poros extremamente pequenos, geralmente na faixa de 0,1 a 1 nanômetro (nm). Esses poros são significativamente 10 vezes menores do que a maioria dos íons de sal dissolvidos e outras moléculas maiores presentes na água de alimentação. Como resultado, a membrana atua como uma barreira física, impedindo a passagem desses solutos enquanto permite que as moléculas de água menores permeiem.
- Difusão de solução: enquanto os poros da membrana desempenham um papel na

exclusão de tamanho, a separação de sais é obtida principalmente por meio de um processo chamado difusão de solução. Nesse processo, os sais dissolvidos entram em contato com a camada ativa da membrana. A camada de poliamida contém cadeias poliméricas densamente compactadas com grupos funcionais que têm afinidade com as moléculas de água. Quando a água de alimentação contendo sais dissolvidos entra em contato com a camada ativa, as moléculas de água interagem com as cadeias poliméricas por meio de pontes de hidrogênio. Essa interação facilita o movimento das moléculas de água para a matriz polimérica, ao mesmo tempo em que evita a passagem de solutos maiores. Os sais dissolvidos, sendo maiores e com diferentes propriedades químicas, não conseguem se difundir através da camada de poliamida e ficam retidos.

- **Repulsão eletrostática:** a natureza carregada de muitos íons de sais dissolvidos desempenha um papel em sua retenção pela membrana de Osmose Reversa. A camada de poliamida da membrana tem uma superfície carregada negativamente devido à presença de grupos funcionais. Como resultado, íons carregados positivamente, como sódio (Na^+) e cálcio (Ca^{2+}), são repelidos pela superfície carregada negativamente e são menos propensos a permear através da membrana. Esses mecanismos combinados de exclusão de tamanho, difusão de solução e repulsão eletrostática contribuem para as altas capacidades de rejeição de sal das membranas de Osmose Reversa. A membrana permite seletivamente a passagem de moléculas de água enquanto retém efetivamente sais dissolvidos e outras impurezas. Isso resulta na produção de água purificada, conhecida como permeado, e uma corrente concentrada contendo os sais rejeitados, conhecida como concentrado ou salmoura.

Ressalta-se que, embora as membranas de Osmose Reversa exibam alta rejeição de sal, mesmo assim, uma pequena fração de sais pode passar pela membrana. Conhecido como permeabilidade da membrana ou incrustação da membrana, pode sofrer influência de certos fatores como: condições operacionais, qualidade da água de alimentação e potencial de incrustação da membrana. A limpeza regular e a manutenção das membranas são necessárias para manter seu desempenho ao longo do tempo (GULLINKALA *et al.*, 2010).

2.2.5 Parâmetros de influência no processo de Osmose Reversa

Qasim *et al.* (2019) apresentam a seguir seis parâmetros que desempenham um papel significativo na determinação da eficácia da dessalinização por Osmose Reversa. Esses parâmetros afetam tanto o desempenho quanto o custo-benefício do processo. Os principais parâmetros incluem:

- **Qualidade da água de alimentação:** a qualidade da água de alimentação, seja água do mar ou água salobra, tem um impacto direto na eficiência da dessalinização por Osmose Reversa. Fatores como nível de salinidade, presença de sólidos em suspensão, matéria orgânica e potencial de incrustação pode afetar o desempenho e a vida útil da membrana. Níveis de salinidade mais altos e concentrações mais altas de impurezas podem reduzir o fluxo de permeado e aumentar a probabilidade de incrustação da membrana, exigindo limpeza e manutenção mais frequentes.
- **Pressão operacional:** a pressão operacional aplicada é um parâmetro crucial na dessalinização por Osmose Reversa. Pressões operacionais mais altas aumentam o fluxo de permeado através da membrana, permitindo maiores taxas de produção de água. No entanto, pressões mais altas também resultam em requisitos de energia mais altos, o que pode afetar significativamente os custos operacionais gerais da usina de dessalinização. Portanto, encontrar a pressão operacional ideal é crucial para equilibrar a produção de água e o consumo de energia.
- **Taxa de recuperação:** a taxa de recuperação é a porcentagem de água de alimentação que é convertida em permeado. É a razão entre o volume de água produzida (permeado) e o volume total de água de alimentação. Taxas de recuperação mais altas aumentam a eficiência do processo de dessalinização, maximizando a produção de água. No entanto, operar em altas taxas de recuperação também pode levar ao aumento da concentração de sais e outras impurezas no fluxo de concentrado, levando potencialmente a problemas de incrustação e incrustação.
- **Características da membrana:** as propriedades da membrana de Osmose Reversa, como sua permeabilidade, taxa de rejeição de sal e resistência à incrustação, tem um impacto direto na eficiência do processo de dessalinização. Membranas de alta qualidade com melhor rejeição de sal e resistência à incrustação podem

alcançar maiores recuperações de água, reduzir a necessidade de limpeza frequente e melhorar o desempenho geral do sistema.

- Temperatura: a temperatura influencia a eficiência da dessalinização por Osmose Reversa. Temperaturas mais altas podem aumentar o fluxo de água através da membrana, resultando em maior produtividade. No entanto, a temperatura também afeta a solubilidade dos sais, levando potencialmente a problemas de incrustação se a concentração de sais exceder seus limites de solubilidade. Além disso, temperaturas mais altas podem aumentar os requisitos de energia para manter a pressão operacional desejada.
- Pré-tratamento: o pré-tratamento eficaz da água de alimentação é fundamental para minimizar a incrustação e a descamação da membrana. Pré-filtragem, ajuste de pH, coagulação e dosagem química anti-incrustação são alguns dos métodos de pré-tratamentos usados para otimizar a qualidade da água de alimentação e reduzir o potencial de incrustação e incrustação.

Tais parâmetros segundo os autores supracitados, precisam ser cuidadosamente monitorados, otimizados e controlados para garantir a operação eficiente de uma planta de dessalinização por Osmose Reversa. O projeto do sistema, as práticas de manutenção e o monitoramento regular do desempenho são essenciais para maximizar a eficiências e a longevidade do processo de dessalinização, minimizando os custos operacionais.

2.2.6 Aplicações da dessalinização por Osmose Reversa

De acordo com os autores Sourav Mondal e Sirshendu De (2020), a dessalinização por Osmose Reversa possui várias aplicações em diferentes setores da indústria. Destacam-se dentre elas as principais aplicações:

- Produção de água potável: a Osmose Reversa é comumente usada para produzir água potável a partir de água do mar ou fontes de água salobra. Ele fornece um método confiável e econômico para obter água doce em áreas onde o acesso à água potável é limitado.
- Tratamento de água municipal: a Osmose Reversa é usada em estações de tratamento de água municipal para purificar a água para abastecimento público. Ajuda a remover contaminantes, incluindo sais, minerais e compostos orgânicos, garantindo a produção de água potável de alta qualidade.

- Processos industriais: muitas indústrias, como geração de energia, produtos farmacêuticos, alimentos e bebidas e eletrônicos, requerem água purificada para seus processos de fabricação. A dessalinização por Osmose Reversa fornece uma solução para obter a água de alta pureza necessária para essas aplicações industriais.
- Agricultura e irrigação: em regiões áridas onde os recursos hídricos são escassos, a dessalinização por Osmose Reversa pode ser usada para tratar água salina ou salobra para fins agrícolas. ele permite que os agricultores irriguem as lavouras com água com teor reduzido de sal, evitando problemas de salinidade do solo e melhorando a produtividade das lavouras.
- Aplicações *offshore* e marítimas: a dessalinização por Osmose Reversa é amplamente utilizada em indústrias marítimas e *offshore*, como navios, plataformas *offshore* e navios de cruzeiro. Ele permite a produção de água doce a partir da água do mar, garantindo um abastecimento confiável de água potável para diversas necessidades a bordo.
- Áreas remotas e afetadas por desastres: a dessalinização por Osmose Reversa é valiosa em áreas remotas ou regiões afetadas por desastres naturais, onde o acesso a fontes de água doce pode ser limitado ou comprometido. Sistemas portáteis de Osmose Reversa podem ser implantados para fornecer acesso imediato a água potável segura.
- Tratamento e reutilização de águas residuais: as membranas de Osmose Reversa podem ser usadas em processos avançados de tratamento de águas residuais para remover contaminantes e produzir água reutilizável. Esta aplicação ajuda a conservar os recursos hídricos e promove práticas sustentáveis.

A tecnologia continua evoluindo e encontrando novas aplicações em diversos setores, contribuindo para a sustentabilidade hídrica e atendendo ao crescente demanda por recursos de água doce (MONDAL; DE, 2020).

Contudo, alguns desafios ainda precisam ser superados no processo de Osmose Reversa para sua sustentabilidade. Zubair *et al.* (2023) alerta quanto aos principais desafios a serem ultrapassados:

- Escassez e demanda de água: à medida que a escassez global de água aumenta e a demanda por água aumenta, espera-se que a demanda por água dessalinizada cresça. Atender a essa demanda exigirá o desenvolvimento de tecnologias de

dessalinização mais eficientes e sustentáveis, bem como abordagens integradas de gerenciamento de água que combinem a dessalinização com outras fontes de água.

- Preocupações ambientais: abordar as preocupações ambientais associadas à dessalinização por Osmose Reversa, como minimizar o impacto nos ecossistemas marinhos e reduzir as emissões de carbono, será um desafio crítico. O desenvolvimento de processos de dessalinização mais ecológicos e a implementação de regulamentações ambientais rígidas podem ajudar a mitigar essas preocupações.
- Incrustação e manutenção da membrana: a incrustação da membrana, o acúmulo de impurezas na superfície da membrana, é um desafio persistente na dessalinização por Osmose Reversa. A incrustação reduz o desempenho da membrana, aumenta o consumo de energia e requer limpeza e manutenção regulares. Avanços em materiais de membrana, técnicas de prevenção de incrustação e tecnologias de limpeza de membrana são essenciais para melhorar a eficiência e sustentabilidade dos sistemas de Osmose Reversa.
- Qualidade da água e descarte de salmoura: garantir a qualidade da água dessalinizada é crucial para a saúde e segurança pública. Monitorar e abordar a presença potencial de contaminantes, como produtos químicos e poluentes emergentes, na água dessalinizada é um desafio. Além disso, encontrar soluções sustentáveis para descarte de salmoura, como tratamento de salmoura e recuperação de recursos, é necessário para minimizar o impacto ambiental da descarga de concentrado.

Zubair *et al.* (2023) alerta quanto a superar tais desafios de sustentabilidade, considerações futuras requerem pesquisa interdisciplinar, avanços tecnológicos, apoio político e colaboração entre as partes interessadas.

Além de tudo isso, de acordo com estudo de Do Thi e Tóth (2023) as emissões de carbono da água potável produzida a partir da água do mar usando essas três tecnologias com fontes de energia fósseis e renováveis investigada com base em dois métodos: avaliação do ciclo de vida (LCA) um software de análise específico do ciclo de vida (SimaPro) e emissões de carbono. Revelam que a tecnologia RO tem emissões de CO₂ significativamente mais baixas do que as tecnologias térmicas. A energia renovável combinada a Osmose Reversa é a mais ecológica, fornecendo benefícios excepcionais em termos de saúde humana e qualidade do

ecossistema. Essa tecnologia ainda pode evoluir no futuro para produzir membranas mais duradouras e mais baratas (DO THI; TÓTH, 2023).

2.3 Outras tecnologias para dessalinização de água

Além da dessalinização de água salinizada por Osmose Reversa vista na seção anterior, há outras tecnologias destinadas para esse fim. Segundo Cuenca (2020) tais tecnologias podem ser agrupadas de acordo com seus processos: térmico e de membrana. Das tecnologias que envolvem os processos térmicos com uso de energia térmica estão: destilação *flash* de múltiplos estágios (MSF, do inglês *Multi-Stage Flash*); destilação múltiplo efeito (MED, do inglês *Multi-Effect Distillation*); destilação por Compressão Térmica à Vapor; destilação por energia solar e; destilação por congelamento. Já nos processos que envolvem membranas estão: eletroanálise para a dessalinização da água salobra e dessalinização por Osmose Reversa (água do mar). Nesta subsecção, apresentam-se as tecnologias que envolvem os processos térmicos de dessalinização de água.

2.3.1 Destilação Flash de múltiplos estágios (MSF)

A destilação *Multi-Stage Flash* (MSF) ou destilação *flash* multiestágio é um processo de dessalinização térmica utilizado para suprir demandas de água em regiões com crise hídrica (FARHADI; DEYMI-DASHTEBAYAZ; TAYYEBAN, 2022; DO THI; TÓTH, 2023). O processo MSF envolve o aquecimento da água do mar em uma série de câmaras, ou estágios, e, em seguida, sua transformação em vapor. O vapor é então condensado para produzir água doce. O processo MSF pode ser otimizado ajustando a temperatura da salmoura superior, o número de estágios e a temperatura ambiente (FARHADI; DEYMI-DASHTEBAYAZ; TAYYEBAN, 2022). O processo MSF é uma das três tecnologias de dessalinização mais aplicadas, juntamente com a Osmose Reversa e a destilação multiefeito (MED) (DO THI; TÓTH, 2023).

Para Cuenca (2023, p. 9) “o princípio deste método baseia-se na redução abrupta da pressão da água do mar, abaixo da pressão do vapor de equilíbrio, o que causa uma evaporação repentina ou uma ebulição explosiva da mesma”. O autor faz uma descrição do processo em que:

É possível conseguir isso introduzindo água do mar, previamente aquecida à temperatura de ebulição com vapor de uma fonte externa, numa câmara, através de

um orifício para que possamos reduzir sua pressão. Devido à natureza violenta e turbulenta da evaporação, a área superficial da água exposta aumenta, beneficiando assim a produção de vapor. O vapor assim produzido passa por "*demisters*" (desnebulizadores), onde se separa das gotas de salmoura que carrega. Esse vapor é condensado na superfície dos tubos que alimentam a água do mar para a central, sendo obtida uma água do mar pré-aquecida pelo calor libertado pelo vapor durante a condensação da água dessalinizada (CUENCA, 2023, p. 9).

Os *demisters* ou desnebulizadores são dispositivos utilizados neste sistema para separar de forma “mais eficiente as gotículas muito finas transportadas por um gás ou vapor, seja em fase de ebulição, evaporação a vácuo ou borbulhar de um líquido” (CUENCA, 2023, p. 9).

O autor citado acima, explica detalhadamente quanto o aquecimento do sistema MSF, onde:

a água é antecipadamente aquecida a uma temperatura aproximada de 100 °C dentro de uma câmara de vácuo chamada “setor de aquecimento”. Este pré-aquecimento é realizado com o vapor de aquecimento que entra na câmara e é condensado nos tubos que conduzem a água do mar à entrada da central. Esta temperatura é conhecida como temperatura “top” que está entre um intervalo de 90 °C a 110 °C. Esse aumento da temperatura da água do mar é realizado com a intenção de otimizar o custo de produção de água em função de um termo chamado "*Gain Output Ratio*" (GOR) e o número de etapas (estágios). O GOR é a proporção (rácio) entre a produção de água e o consumo de vapor (CUENCA, 2023, p. 9).

O sistema de destilação *flash* multiestágio requer vapor de aquecimento de baixa pressão para funcionar e vapor de média pressão para criar um vácuo no sistema. Um sistema de dessalinização MSF com 4 a 40 estágios pode produzir de 1.000 a 35.000 m³ por dia de água potável (FARHADI; DEYMI-DASHTEBAYAZ; TAYYEBAN, 2022).

Conforme Farhadi, Deymi-Dashtebayaz e Tayyeban (2022) no sistema MSF, a água do mar ou água salobra, também chamada de salmoura de alimentação, entra no último estágio sendo pré-aquecida em cada estágio e segue em direção ao primeiro estágio. Em seguida, ele vai para o aquecedor de salmoura e atinge uma temperatura e pressão mais altas por meio da transferência de calor com o vapor de aquecimento que entra. Depois disso, ele flui de volta para os estágios que têm pressão e temperatura cada vez mais baixas. Isso faz com que uma pequena fração dela evapore parcialmente (*flash*) em cada estágio que é então condensada após entrar em contato com os tubos contendo a água salgada de alimentação e produz água potável.

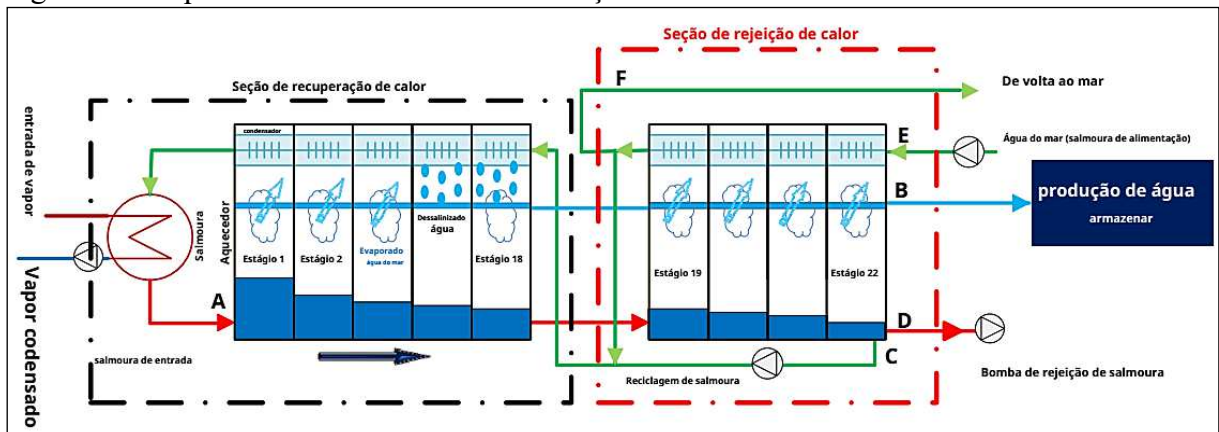
Ainda segundo os autores supracitados, neste tipo de sistema a energia térmica utilizada para o aquecedor de salmoura do sistema MSF pode ser fornecida através da queima de combustíveis fósseis, calor residual de refinaria ou usinas de energia, energia solar, e outros. Contudo, devido à alta participação da dessalinização MSF entre os sistemas de dessalinização

térmica, vários estudos têm sido realizados na otimização e melhoria do desempenho dos sistemas MSF. A substituição de energias não renováveis por renováveis e calor residual dos sistemas energéticos é outro campo de estudo nesta área que reduz as emissões, custos e aumenta a eficiência. Além disso, como se sabe, a salmoura de saída dos sistemas MSF ainda está quente.

Destaca-se assim, a necessidade de se utilizar um método de reutilização da energia térmica da salmoura de saída para aumentar a temperatura da salmoura de alimentação de entrada. Resultados de alguns estudos (AL-WESHAHI *et al.*, 2013; AL GHAMDI; MUSTAFÁ, 2016; ALI; KAIROUANI, 2016; SANAYE; ASGARI, 2013; BANDI *et al.*, 2016) que trabalharam no desempenho de sistemas de *flash* multiestágio com reciclagem de salmoura (MSF-BR - *Multi-Stage Flash Brine Recycle*) revelam melhorias significativas em parâmetros importantes do sistema de dessalinização MSF, considerado assim como uma solução.

A Figura 3 apresenta um exemplo de esquema do sistema de dessalinização MSF-BR, composto por 18 estágios na seção de recuperação de calor e quatro estágios na seção de rejeição de calor.

Figura 3 – Esquema do sistema de dessalinização MSF-BR



Fonte: Farhadi, Deymi-Dashtebayaz e Tayyeban (2022, p. 5).

Farhadi, Deymi-Dashtebayaz e Tayyeban (2022) fazem a descrição do sistema de dessalinização MSF-BR (Ver Figura 3) onde a água do mar (salmoura) entra no último estágio da seção de rejeição através de tubos (ponto E), é pré-aquecida e flui em direção à seção de recuperação. Neste ponto (ponto F), parte da água do mar é devolvida ao mar e o restante é misturada com salmoura reciclada (ponto C) e entra na seção de recuperação e segue para a primeira etapa. Em seguida, é pré-aquecido novamente em cada estágio usando o calor latente do vapor destilado e segue para o aquecedor de salmoura e é aquecido pelo aquecimento do vapor para atingir uma temperatura e pressão mais altas do que no primeiro estágio. Agora, ele

flui de volta a uma temperatura de 11 °C em condições saturadas para o primeiro estágio que é um vácuo (ponto A). Isso faz com que uma fração da salmoura de entrada evapore parcialmente (*flash*), que é então condensada por meio de transferência de calor com tubos de salmoura de alimentação e é drenada. O restante da salmoura de entrada flui para o próximo estágio e esse processo continua até o último estágio e a água condensada é coletada como um produto de água destilada (ponto B). Parte da salmoura concentrada restante é descarregada (ponto D) e o restante é reciclado a uma temperatura de 42 °C.

2.3.2 Destilação múltiplo efeito (MED)

Conforme Cuenca (2020) a Destilação Múltiplo Efeito (MED) possui o mesmo princípio que o processo de MSF. Porém, há uma diferença importante entre eles que se encontra no processo de evaporação:

As centrais MED utilizam diferentes tipos de evaporadores do tipo película fina, com os quais podem ser obtidos melhores coeficientes de transferência de calor em comparação com o obtido nas centrais de MSF, onde produzem diretamente a evaporação repentina. Entre as configurações mais utilizadas estão: tubo vertical com película ascendente, tubo horizontal e vertical com película descendente e do tipo plano, que são baseadas em pratos corrugados (CUENCA, 2020, p. 11).

A Destilação de Efeito Múltiplo ou Múltiplo Efeito é uma técnica de destilação que envolve o uso de múltiplos efeitos de evaporação e condensação para aumentar a potência energética do processo. Nessa técnica, o vapor gerado na primeira etapa de evaporação é usado como fonte de calor para a segunda etapa, e assim por diante, até que o líquido seja completamente evaporado. A destilação de efeito múltiplo é amplamente utilizada na indústria química e de celulose, entre outras, para a concentração de soluções e separação de misturas líquidas. (BESSA; MEIRELLES, 2012; MOREIRA, 2018; SARAIVA *et al.*, 2017).

Além disso, a técnica de destilação de efeito múltiplo também tem sido utilizada na produção de etanol anidro através da destilação extrativa salina com recuperação do agente de separação (LIGERO, 1999). Modelagem matemática e simulação numérica são frequentemente utilizadas para otimizar o processo de destilação de efeito múltiplo (MOREIRA, 2018; SILVEIRA; COSTA JUNIOR; COSTA, 2017; SIQUEIRA; MARTINS; VIANA, 2022).

Cuenca (2020, p. 11) faz uma descrição do processo MED onde:

a água do mar é pré-aquecida no estágio de condensação do vapor gerado no último efeito, entra no primeiro efeito em que sua temperatura sobe ao ponto de ebulição com o vapor de aquecimento. A água do mar é pulverizada na superfície dos tubos do

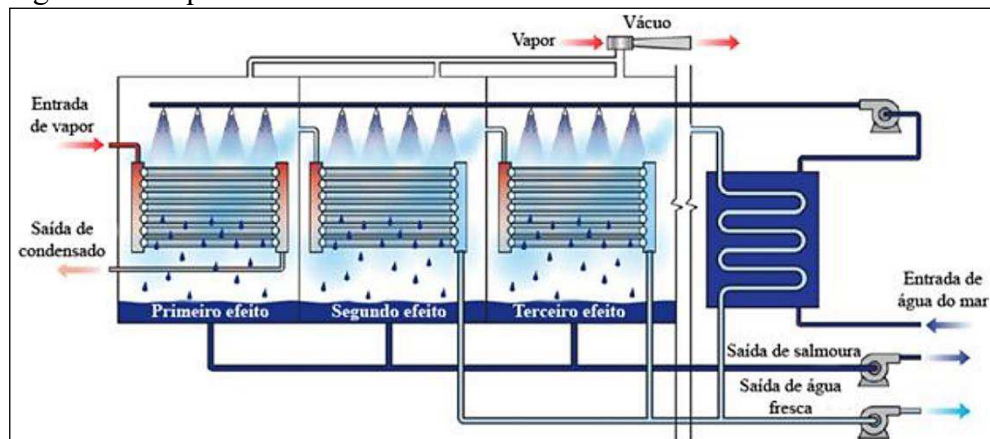
evaporador, onde é formada imediatamente uma película fina que favorece sua rápida ebulição e evaporação. O vapor produzido (*Backpressure steam*) é coletado nesse efeito e enviado para dentro dos tubos do evaporador (*Condensate return*), com o seguinte efeito, que opera a uma temperatura e pressões inferiores às do anterior. A salmoura (*Recycled brine*) do primeiro efeito também é enviada para o próximo efeito, onde é pulverizada, formando uma película fina na superfície dos tubos através da qual o referido vapor (*Steam*) circula repetindo o processo de evaporação. O vapor de cada um dos efeitos torna-se água dessalinizada quando condensado no evaporador do seguinte efeito. O processo é repetido várias vezes, dependendo do número de efeitos no sistema.

Para melhor compreensão, Siqueira, Martins e Viana (2022, p. 8-9) descrevem o início do processo MED:

com a aspersão da água salgada fria sobre um conjunto de tubos quentes, parte da água evapora e segue para fornecer calor para o segundo efeito. Já a água que não evapora cai no fundo e é bombeada para o segundo efeito, iniciando o segundo ciclo do processo MED. O processo se repete em cada novo efeito. Assim como o processo MSF, a pressão e a temperatura vão diminuindo ao longo dos efeitos. Calor externo é fornecido para aumentar a temperatura da salmoura do primeiro efeito.

Logo abaixo na Figura 4, mostra-se o exemplo de uma unidade de MED, conforme descrito pelos autores acima.

Figura 4 – Esquema de uma unidade de MED



Fonte: Siqueira, Martins e Viana (2022, p. 9).

Destacam-se como vantagens deste método: baixo consumo elétrico, uma vez comparado aos métodos OR e MSF; baixa temperatura de funcionamento que evita grande corrosão e não necessidade de um pré-tratamento da água salgada. Porém, funciona de forma eficiente quando anexada a uma central elétrica, sendo este um fator limitador (SIQUEIRA; MARTINS; VIANA, 2022).

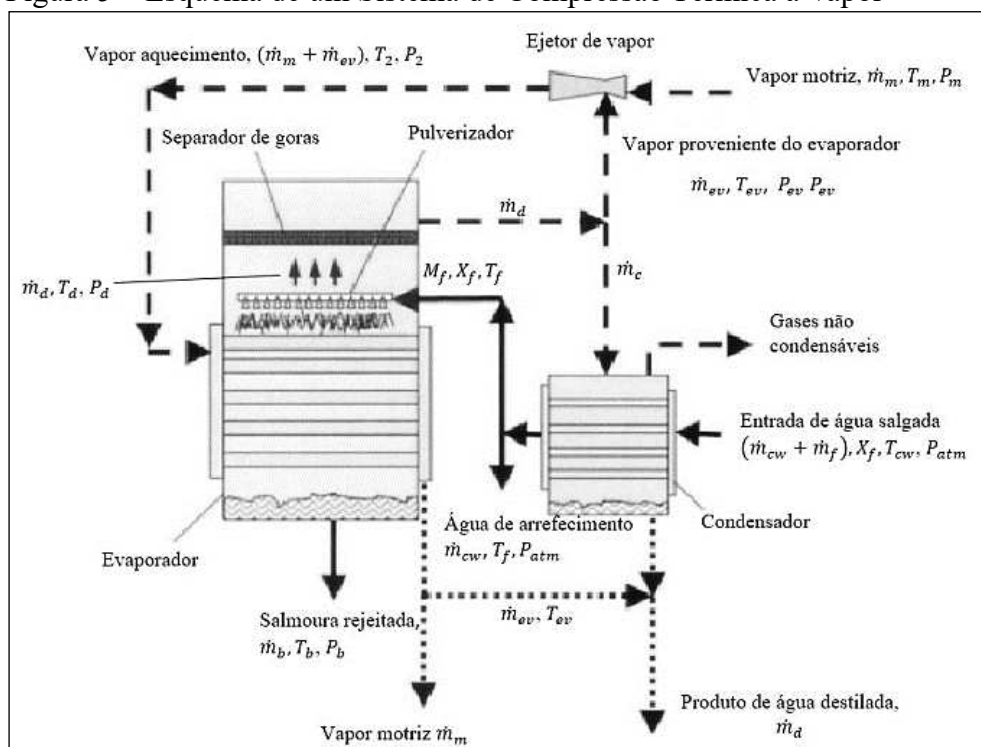
2.3.3 Destilação por Compressão Térmica à Vapor

A destilação por terapia térmica à vapor é um processo de dessalinização de água que utiliza vapor comprimido para separar a água salgada em água doce e salmoura. O processo envolve a ventilação do vapor gerado pela evaporação da água salgada, aumentando sua temperatura e pressão, e em seguida, a condensação do vapor comprimido para produzir água doce. Esse método é amplamente utilizado na dessalinização de água do mar para produção de água potável, e é uma alternativa mais eficiente e econômica do que outros métodos de dessalinização (SEGUNDO; CAVALCANTI; SILVA, 2019). Assim, diferente da Compressão Mecânica à Vapor (MVC, do inglês *Mechanical Vapor Compression*) que utiliza a energia elétrica, a Compressão Térmica à Vapor (VTC, do inglês *Thermal Vapor Compression*) se utiliza da compressão da energia térmica como forma de comprimir o vapor (SANTOS, 2021).

A Destilação por Compressão Térmica à Vapor, de acordo com Siqueira, Martins e Viana (2022) caracteriza-se por apresentar uma compressão térmica que “adiciona pequenas quantidades de vapor a alta pressão por meio de ejetor e necessita de mais de uma etapa”

Nesse sistema tem como componentes principais um evaporador, um ejetor de vapor e um condensador, que estão esquematicamente na Figura 5 abaixo.

Figura 5 – Esquema de um Sistema de Compressão Térmica à Vapor



Fonte: Santos (2021, p. 11).

Conforme Siqueira, Martins e Viana (2022) esse sistema possui uma capacidade que varia entre 10.000 e 30.000 m³/dia, tendo em média o valor de 16,26 kW h/m³ de consumo total de energia elétrica (energia elétrica acrescida da energia térmica equivalente).

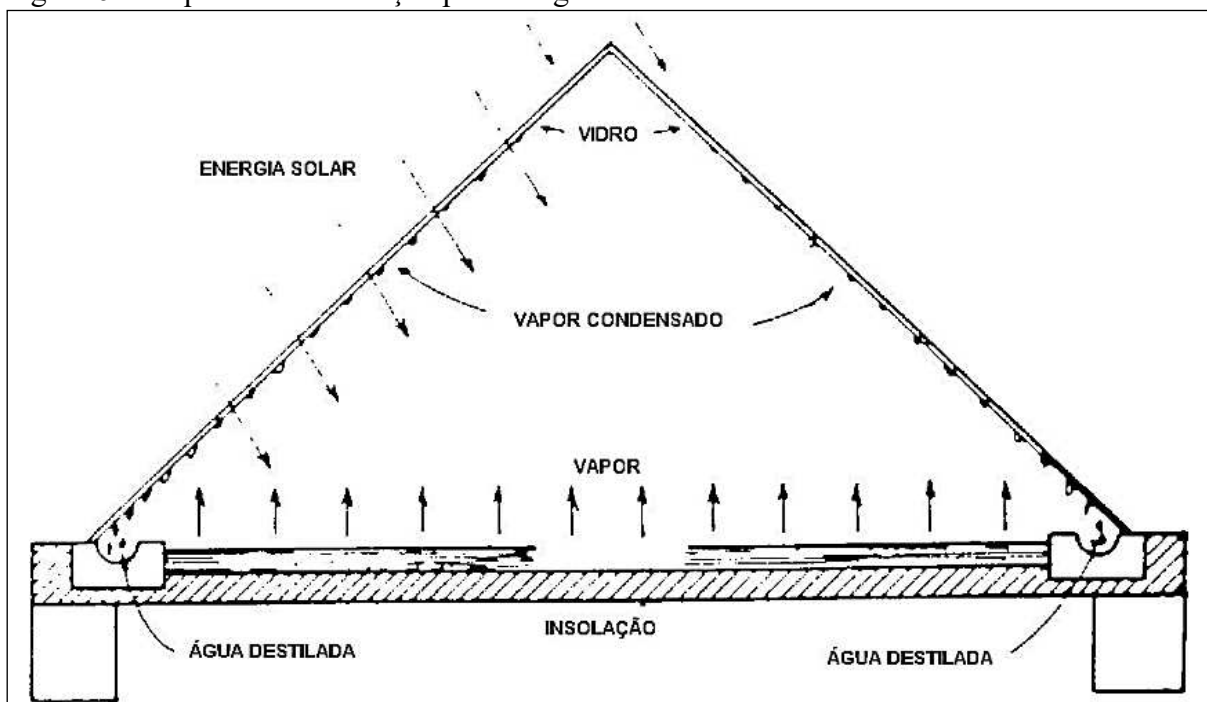
2.3.4 Destilação através de Energia Solar

A destilação por Energia Solar tem como princípio básico parte do ciclo hidrológico da água. Segundo Souza (2006) o sistema funciona da seguinte forma:

“A água salina é aquecida pelos raios solares de forma a propiciar a produção de vapor d’água (umidificação). O vapor de água é então condensado em uma superfície fria e o condensado coletado como água produto. Um exemplo deste tipo de processo é o destilador solar, similar à estufa solar de plantas e vegetais, no qual a água é aquecida num reservatório existente sobre o piso (ocupando toda área do piso).

Na Figura 6 abaixo observa-se uma estufa solar onde água condensa na parte da superfície interna da cobertura inclinada de vidro que cobre o reservatório descendo pelas laterais para o caminho do reservatório destinado a água destilada do sistema (SOUZA, 2006).

Figura 6 – Esquema de destilação por Energia Solar



Fonte: Souza (2006, p. 89).

Ressalta-se que mesmo se utilizando de raios solares, o destilador solar, necessita de energia adicional para bombear a água destilada (produto do processo). Como também cuidados de manutenção e operacionalização a fim de prevenir a formação de crostas causada pela secagem do reservatório (resíduos de sais) (SOUZA, 2006).

Siqueira, Martins e Viana (2022, p. 7) descrevem esse método sendo composto por:

um grande tanque com uma cobertura transparente, que utiliza da entrada de radiação solar para aumentar a temperatura da água salgada. A exposição ao sol faz com que a água evapore e condense ao tocar a parte interior da cobertura, escorrendo e sendo recolhida lateralmente por uma calha que conduz a água destilada para fora da cobertura.

Em relação as vantagens e desvantagens desse método, Siqueira, Martins e Viana (2022) destacam como principais benefícios os baixos custos com energia, recursos técnicos e econômicos empreendidos. Porém, como limitações estão: sujeita às boas condições climáticas (radiação solar) e requer uma significativa área de implantação para o sistema.

2.3.5 Destilação por congelamento

A destilação por congelamento é um método de separação de misturas que se baseia na diferença de ponto de fusão dos componentes. Esse método é utilizado principalmente para separar misturas que contêm água e outros componentes que possuem ponto de fusão mais elevado, como sais e ácidos orgânicos. O processo consiste em resfriar a mistura até que o componente com ponto de fusão mais elevado congele, formando cristais que podem ser separados por filtração ou centrifugação. O componente líquido restante é então aquecido para remover a água por evaporação, resultando na separação dos componentes (MARQUES; SANTOTÓRIO, 2019).

A destilação por congelamento acontece quando ainda “na formação dos cristais de gelo os sais dissolvidos são excluídos naturalmente, portanto, antes de toda a massa ser descongelada a mistura é lavada e enxaguada para remover os sais. O gelo então é derretido para produzir água doce” (SIQUEIRA; MARTINS; VIANA, 2022, p. 7).

O processo de destilação por congelamento envolve as seguintes etapas: 1) resfriamento: a mistura é resfriada até que o componente com ponto de fusão mais elevado congele, isso pode ser feito por meio do uso de álcool ou de um líquido; 2) formação de cristais:

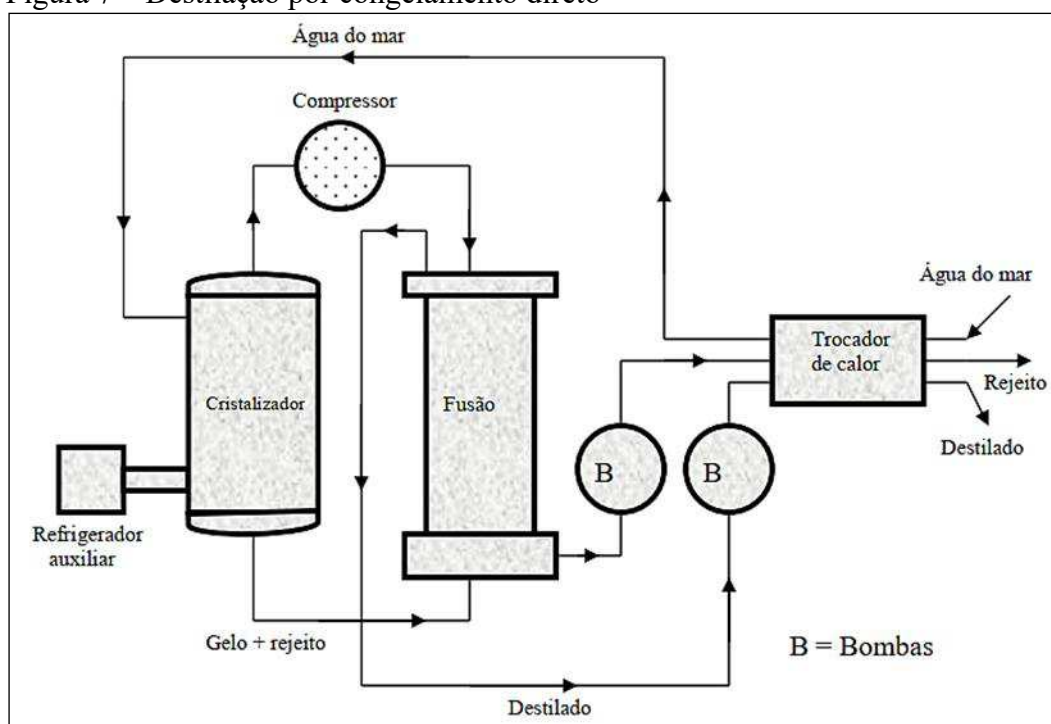
o componente congelado forma cristais sólidos, que podem ser separados do líquido restante; 3) filtração ou centrifugação: os cristais são separados do líquido através de filtração ou centrifugação; 4) aquecimento: o líquido restante é aquecido para remover a água por evaporação, resultou na separação dos componentes (SOUZA, 2004).

Ressalta-se que tais etapas são comuns a todas as aplicações da destilação por congelamento, incluindo a dessalinização da água do mar, que é uma das principais aplicações desse método. No entanto, é importante notar que o processo pode variar dependendo da mistura que está sendo separada e das condições específicas de cada aplicação (SILVA; MARTINS JÚNIOR; RAMOS, 2022).

Esse processo de destilação por congelamento, estão fundamentados em princípios e tecnologia de refrigeração que se classificam em congelamento direto e indireto. “No congelamento direto a água é seu próprio refrigerante ao usar o próprio vapor d’água”, enquanto no congelamento indireto utiliza-se de um líquido volátil insolúvel em água, como por exemplo o “n-butano, além de não necessitar da instalação dos “dois sistemas de circulação separados por superfície de troca de calor (SOUZA, 2004, p. 30).

Conforme mostra a Figura 7, logo abaixo, no congelamento direto, inicialmente, a água a ser tratada passa por um processo de resfriamento, passando em seguida para uma torre de congelamento ou *freezer*, onde a pressão é controlada em torno de 400 N/m^2 (0,004 atm) (SOUZA, 2004; SOUZA, 2006).

Figura 7 – Destilação por congelamento direto



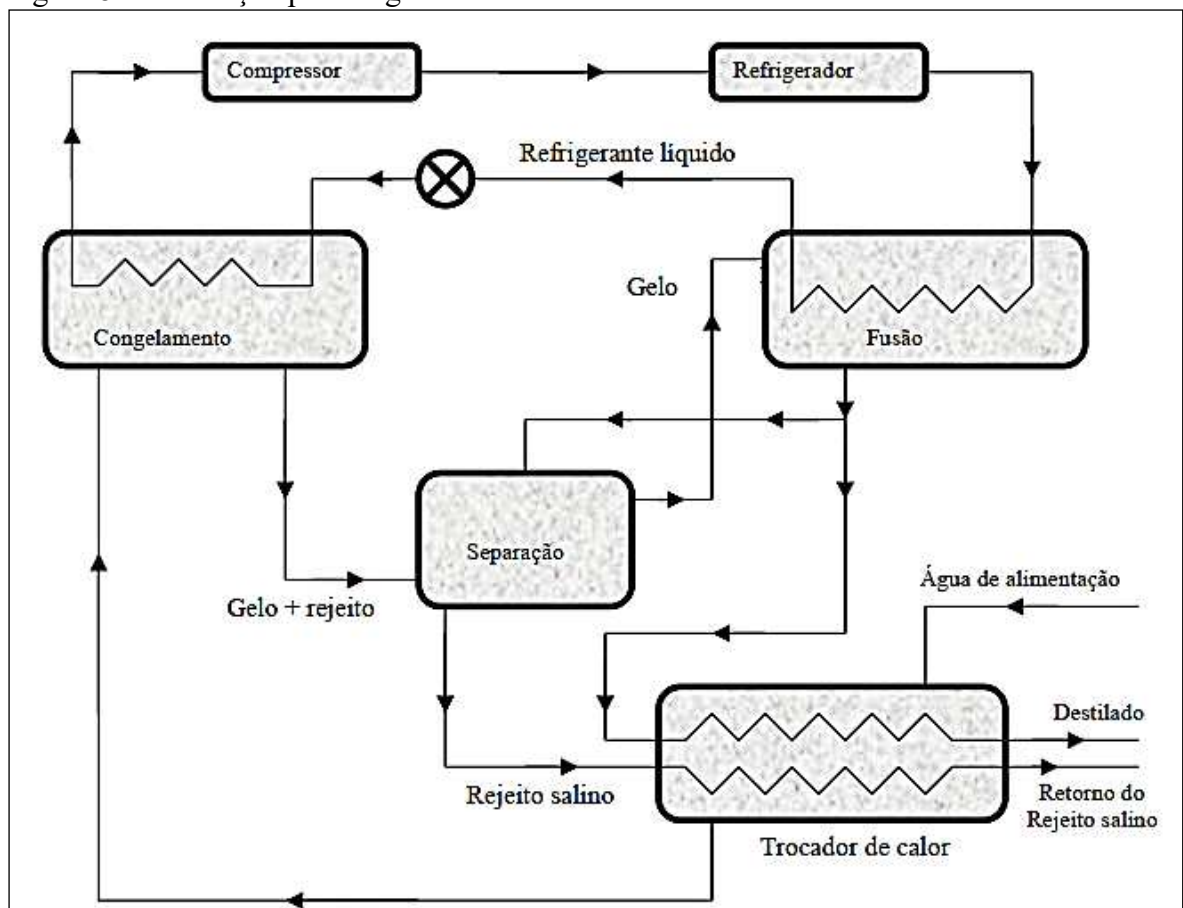
Fonte: Souza (2004, p. 31).

Para Souza (2004) para se manter o equilíbrio térmico deste sistema:

torna-se necessário compensar as entradas de calor, derivadas das seguintes fontes: energia aplicada ao compressor principal, trabalho de bombeamento e penetração de calor da atmosfera. Para isolar o sistema dessas entradas de calor, em geral é usado um sistema convencional de refrigeração, que remove calor da água de alimentação.

Enquanto no congelamento indireto (ver Figura 8), o líquido volátil insolúvel em água (n-butano) é misturado com a água salgada ou salobra previamente resfriada, ocorrendo em seguida, com a troca de calor, conseqüentemente, a água é congelada e o hidrocarboneto é aquecido. O n-butano por sua vez, contido no sistema, evapora-se com à baixa pressão existente (SOUZA, 2004; SOUZA, 2006).

Figura 8 – Destilação por congelamento indireto



Fonte: Souza (2004, p. 33).

Souza (2004, p. 32) explica que a “solução salina adsorvida nos cristais de gelo é removida através de lavagem com água doce. Os cristais de gelo são levados a um recipiente para o derretimento e obtenção do produto final desejado (água potável)”.

Considerado baixo a energia empreendida nesse processo, uma vez que são formados cristais de gelos de formatos significativamente grandes, os custos com a lavagem são reduzidos. Porém, se a taxa de formação de cristais for alta, e a retirada de vapores não estiver envolvida, o equipamento requer volume relativamente pequeno. A única desvantagem deste processo refere-se os custos elevados com a dispendiosa separação e lavagem do gelo (SOUZA, 2004; SOUZA, 2006).

Esse processo é eficaz na remoção de sais da água do mar, produzindo água potável ou água com baixa concentração de sal. No entanto, é importante ressaltar que a destilação por congelamento é um processo que consome muita energia devido à necessidade de resfriamento da água, elevando assim o custo com energia elétrica, sendo assim menos utilizado na indústria (SIQUEIRA; MARTINS; VIANA, 2022). Além disso, esse método é limitado a misturas que contêm água e componentes com ponto de fusão mais elevado, o que restringe sua aplicação em muitos processos de separação (SILVA; MARTINS JÚNIOR; RAMOS, 2022).

2.4 Controladores de rastreamento

Conforme alguns autores (BONNA; CAMINO, 2016; ESTRABIS *et al.*, 2022; SANTOS *et al.*, 2020), um controlador de rastreamento é um componente usado em sistemas para garantir que um objeto ou sistema siga uma trajetória ou referência desejada. Responsável por ajustar as variáveis de controle de acordo com as informações de entrada e *feedback* do sistema, de forma a minimizar o erro entre a trajetória desejada e a trajetória real.

Há diferentes tipos de controladores de rastreamento, cada um com suas características e técnicas específicas. Dentre alguns exemplos apresentam-se: (1) **controladores baseados em realimentação linear**, que se utilizam técnicas de controle clássicas, como o controlador proporcional-integral-derivativo (PID), para ajustar a variável de controle de acordo com o erro entre a referência e a saída do sistema; (2) **controladores baseados em realimentação não linear**, que se utilizam técnicas de controle não linear, como o controle por realimentação de estados, para ajustar as variáveis de controle levando em consideração as não linearidades do sistema; (3) **controladores com base em técnicas avançadas de controle**, estes usam técnicas mais avançadas, como o controle preditivo, controle por otimização, controle por modos deslizantes, entre outros, para garantir um melhor desempenho de rastreamento; (4) **controladores adaptativos**, capazes de ajustar seus parâmetros de acordo com as mudanças no sistema ou nas condições de operação, permitindo um rastreamento mais preciso e robusto (BONNA; CAMINO, 2016; ESTRABIS *et al.*, 2022; SANTOS *et al.*, 2020, grifo nosso).

Ressalta-se que a escolha do controlador de rastreamento adequado depende das características do sistema, das restrições e dos requisitos de desempenho. Além disso, é necessário considerar as perturbações e interferências presentes no sistema, para garantir um

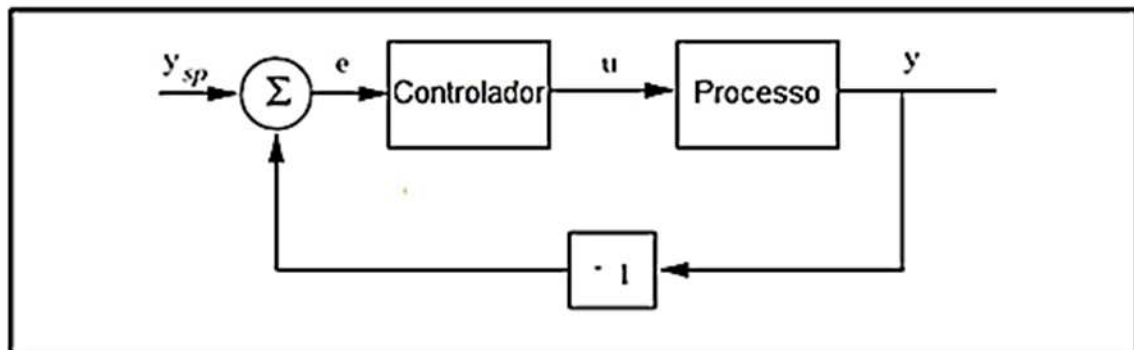
rastreamento eficiente e estável (BONNA; CAMINO, 2016).

Dentre alguns exemplos de controladores de rastreamento encontrados em estudos mais recentes estão: controladores de corrente para rastreamento do ponto de potência máxima em arranjo fotovoltaico (MOREIRA; BRASIL; NUNES, 2021); controladores de corrente para inversores conectados à rede com filtro LCL por realimentação de estados com número reduzido de sensores (MATTOS *et al.*, 2022); controlador preditivo generalizado para rastreamento de referência polinomial (Poly-GPC) ante perturbações, sendo considerado capaz de rastrear referências polinomiais enquanto as perturbações são rejeitadas (ESTRABIS *et al.*, 2022); controladores de formação assentados em espaço nulo, onde o rastreamento de trajetória de espaço nulo com gerenciamento de duas tarefas de prioridades conflitantes (seguimento da trajetória e manutenção da estrutura) alcançaram resultados satisfatórios (ERNANDES NETO; SARCINELLI-FILHO; BRANDÃO, 2019); controladores de rastreamento de trajetória com um controlador por *feedback linearization* responsável por neutralizar as não linearidades presentes no modelo dinâmico e lidar com a sub atuação inerente do sistema (BONNA; CAMINO, 2016).

2.5 Controladores PID

Originalmente, os controladores PID baseiam-se no *feedback* do sinal, que possibilita a redução de efeitos de perturbações, tornando menos instável às variações do processo por meio do acompanhamento do seu sinal de entrada (CUENCA, 2020), conforme pode-se observar na Figura 9 abaixo.

Figura 9 – Diagrama de um sistema de *feedback* simples (controlador de *feedback*)



Fonte: Cuenca (2020, p. 4).

De acordo com o exemplo de controlador de *feedback* simples (Figura 9) apresentado por Cuenca (2020), há dois blocos: o processo e o controlador. No bloco de **processo** tem uma entrada que é chamada de variável de controle (VC) ou variável manipulada (VM), representada pela letra u . A VC influencia diretamente o processo, através de uma variável de saída que é chamada de variável de processo (VP) denotada pela letra y . O valor esperado da VP é chamado de *set point* (sp) ou valor de referência, que é denotado por y_{sp} . O erro de controle é a diferença entre o SP e a VP , ou seja, $e = y_{sp} - y$.

Segundo Tejado *et al.* (2019) o controlador PID, que significa controlador Proporcional-Integral-Derivativo, trata-se de um tipo de sistema de controle de realimentação comumente utilizado em processos industriais. Projetado para ajustar continuamente a entrada de controle com base no erro entre o ponto de ajuste desejado e a variável de processo medida. Ainda segundo os autores, consiste em três componentes principais, sendo eles descritos a seguir:

O termo proporcional (P) produz uma saída que é proporcional ao erro atual. Ele fornece uma ação de controle que é diretamente proporcional ao desvio do ponto de ajuste. O ganho proporcional determina a sensibilidade do controlador ao erro. Um ganho proporcional maior leva a uma resposta mais forte ao erro. Assim, conforme a Figura 9, a equação é descrita assim:

$$u = K(y_{sp} - y) = Ke \quad (1)$$

Onde a letra K (maiúsculo) representa o ganho do controlador.

O termo integral (I) soma os erros passados ao longo do tempo e produz uma saída que é proporcional à integral do erro. Ele ajuda a eliminar erros de estado estacionário e fornece uma ação de controle baseada no erro acumulado. O ganho integral determina a taxa na qual o controlador responde ao erro acumulado. Um ganho integral maior leva a uma resposta mais rápida para eliminar erros de estado estacionário, representado pela equação 2:

$$u(t) = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2)$$

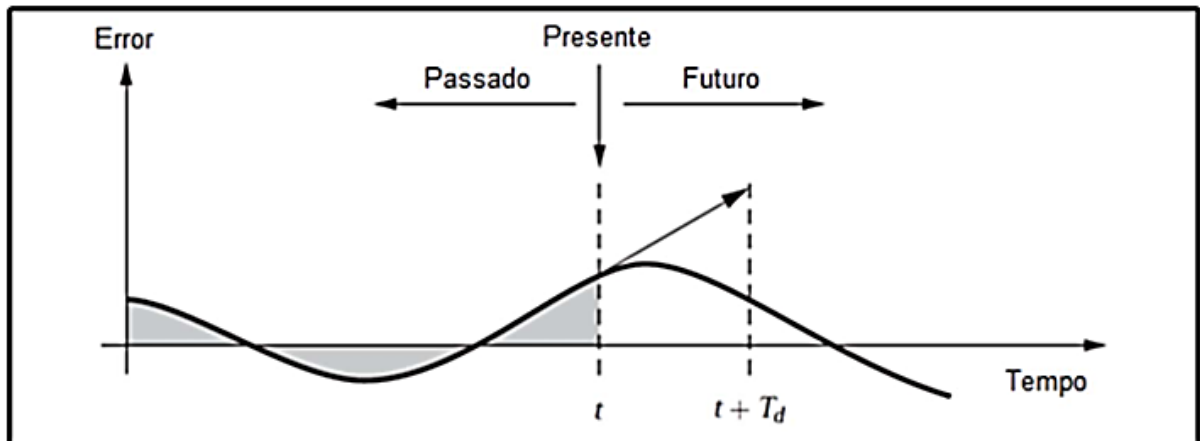
Onde k (minúsculo) é o ganho integral.

O termo derivativo (D) prevê a tendência futura do erro com base em sua taxa de variação. Ele produz uma saída que é proporcional à taxa de mudança do erro. Ajuda a amortecer a resposta do controlador e melhorar a estabilidade ao antecipar mudanças no erro. O ganho derivativo determina a taxa na qual o controlador responde à taxa de mudança do erro. Um ganho derivativo maior leva a uma resposta mais rápida às mudanças no erro.

A combinação desses três termos permite que o controlador PID responda a diferentes aspectos do erro e forneça uma ação de controle que minimize o desvio do ponto de ajuste. A sintonia dos controladores PID envolve o ajuste dos ganhos para atingir o desempenho de controle desejado, como estabilidade, capacidade de resposta e robustez (TEJADO *et al.*, 2019).

Na Figura 10, Cuenca (2020) apresenta exemplo de controlador PID que calcula sua ação de controle com base em erros passados, presentes e futuros. Tendo assim, a integração dos três termos que representam o passado para a ação integral do erro (I), o presente (P) e o futuro para a extrapolação linear do erro (D).

Figura 10 – Controlador PID



Fonte: Cuenca (2020, p. 5).

Sendo assim, ainda segundo o autor supracitado, a soma é representada pela equação 3:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

Onde a partícula $e + T_d \frac{de(t)}{dt}$ é uma previsão linear do erro com T_d unidades de tempo no futuro. Os parâmetros do controlador são chamados: ganho proporcional k , tempo integral T_i e tempo derivativo T_d .

Sendo assim, importante frisar que o controlador PID é capaz de:

eliminar erros de estado estacionário por meio de ação integral e pode antecipar o futuro com ação derivativa. Até se pode mencionar que os controladores PI são suficientes para resolver muitos problemas de controle, onde a dinâmica do processo é benigna e os requisitos comportamentais são modestos (CUENCA, 2020, p. 6)

Vale ressaltar que também existem variações de controladores PID, como controladores PID de ordem fracionária, que introduzem ordens não inteiras de integração e diferenciação para fornecer mais flexibilidade no projeto de controle (TEJADO *et al.*, 2019). Além disso, pesquisas foram feitas para otimizar os parâmetros do controlador PID usando algoritmos como otimização de enxame de partículas (QI; SHI; ZHANG, 2020).

Os controladores PID são amplamente utilizados em diversas aplicações industriais devido à sua eficácia. Dentre alguns exemplos de suas aplicações verificam-se controle de: velocidade, temperatura, neutralização de pH, biorreatores e de processos (EL-HAMID *et al.*, 2015; JAMIL *et al.*, 2022; KILLINGSWORTH; KRSTIĆ, 2005; RAȚĂ; RAȚĂ; CHATZIATHANASIOU, 2014; SANDHYA, 2016).

Controladores PID são comumente usados em sistemas de controle de motores para regular a velocidade do motor. Por exemplo, um sistema de controle de velocidade de circuito fechado pode ser implementado em uma aplicação de carga centrífuga para controlar o fluxo de ar ajustando a velocidade do motor do ventilador usando um VFD (RAȚĂ; RAȚĂ; CHATZIATHANASIOU, 2014).

Os controladores PID também são usados em sistemas de controle de temperatura para manter um ponto de ajuste de temperatura desejado. Os controladores de derivada integral proporcional de ordem fracionária (FOPID) estão se tornando cada vez mais populares para sistemas de controle de temperatura devido às suas vantagens em obter melhor desempenho, robustez, estabilidade, flexibilidade e resposta mais rápida (JAMIL et al., 2022).

Controladores PID são usados em processos de neutralização de pH para manter um nível de pH desejado. Os valores dos ganhos do controlador PID (K_p , K_i e K_d) podem ser calculados usando o algoritmo de otimização de Levenberg-Marquardt (LMA) (EL-HAMID et al., 2015).

Controladores PID são usados em biorreatores para controlar a temperatura, pH e níveis de oxigênio dissolvido. Controladores PID de ordem fracionária têm sido usados para melhorar o desempenho de biorreatores (SANDHYA, 2016).

Os controladores PID são usados em vários processos industriais para controlar variáveis como pressão, vazão e nível. O ajuste dos controladores PID é importante para alcançar o desempenho de controle ideal e métodos como busca extrema podem ser usados para ajustar os parâmetros PID para desempenho ideal (KILLINGSWORTH; KRSTIĆ, 2005). Entende-se assim, que os controladores PID são versáteis e amplamente utilizados em várias aplicações industriais para controlar processos e manter os pontos de ajuste desejados.

2.6 Controle Preditivo Generalizado

Pioneiramente introduzido por (CLARKE et al., 1987), o GPC (do inglês, *Generalized Predictive Control*) pertence a uma ampla classe de Métodos de Controle Preditivo de Modelo (do inglês, *Model Predictive Control*). Ele incorpora todas as principais características dos controladores preditivos em uma estrutura unificada e oferece vantagens, como a capacidade de estabilizar e controlar processos de atraso de transporte não mínimos, variáveis ou desconhecidos, processos instáveis em malha aberta e até mesmo plantas com ordens desconhecidas. Ao longo dos anos, o GPC tem se mostrado muito eficaz quando os requisitos de robustez e desempenho são difíceis de alcançar com projetos tradicionais (SHI;

KELKAR SOLOWAY, 2003).

2.6.1 Princípios do Controle Preditivo Generalizado

Conforme Takács e Rohal'-Ilkiv (2012) o objetivo da lei de controle preditivo é aproximar ao máximo as saídas futuras da planta do valor de referência. Assim, um controlador preditivo é baseado nos seguintes conceitos:

- Utilizar um modelo matemático representativo da dinâmica da planta obtido por modelagem física ou um procedimento de identificação do sistema;
- Prever a dinâmica futura da planta;
- Expressar a otimalidade do processo por meio de uma função de custo apropriada para os erros e controles futuros;
- Prever o custo da dinâmica futura da planta;
- Minimizar a função custo (controle ótimo);
- E, por fim, aplicar uma estratégia de controle de horizonte recuante.

O objetivo principal do GPC é prever o comportamento futuro do sistema com base em seu modelo, utilizando uma janela de predição finita. A partir dessa predição, o GPC calcula os sinais de controle ótimos para minimizar a função custo. Um controlador preditivo generalizado utiliza precisamente o modelo CARIMA (*Controlled Autoregressive Integrated Moving Average*) para realizar essas predições (TAKÁCS; ROHAL'-ILKIV, 2012).

2.6.2 Modelo de planta CARIMA e a predição de saída

O modelo CARIMA é um modelo estatístico utilizado para análise e previsão de séries temporais. Ele é uma combinação do modelo ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*) e o modelo de médias móveis cumulativas (CMA, do inglês *Cumulative Moving Average*).

Ao considerar a regulação em relação a um ponto operacional específico, mesmo uma planta não linear geralmente admite um modelo linearizado localmente (Equação 4):

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t-1) + \frac{C(z^{-1})}{\Delta}e(t) \quad (4)$$

com

$$\Delta = 1 - z^{-1}$$

Onde $u(t)$ é o sinal de controle e $y(t)$ é a saída da planta e $e(t)$ é um ruído branco com média zero. A , B e C são os seguintes polinômios no operador de atraso z^{-1} :

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} \quad (5)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n} \quad (6)$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_n z^{-n} \quad (7)$$

Por fim, multiplica-se ambos os lados da equação 4 por Δ para eliminá-lo do último termo da equação, conforme a Equação 7.

$$\Delta \cdot (A(z^{-1})y(t)) = \Delta \cdot \left(B(z^{-1})u(t-1) + \frac{C(z^{-1})}{\Delta(z^{-1})} e(t) \right)$$

$$\tilde{A}(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})\Delta u(t-1) + C(z^{-1})e(t) \quad (8)$$

O sinal gráfico \sim em \tilde{A} significa que este termo está sendo multiplicado por Δ .

A partir de qualquer função de transferência, pode-se representar o modelo equivalente em Espaço de Estados. Os coeficientes dos polinômios a , b e c , pertencentes ao modelo, estão distribuídos na Equação 9 na forma de espaço de estados. Neste caso, $x(t)$ será um estado. Para uma representação mais genérica, utiliza-se uma forma canônica em que os estados não têm interpretação física, apenas a entrada e a saída. Nesta representação, $\Delta u(t)$ será a entrada, $y(t)$ a saída e $e(t)$ será o ruído branco de média nula.

$$x(t+1) = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & & \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \\ -a_{n-1} & 0 & 0 & & 1 \\ -a_n & 0 & 0 & & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{n-1} \\ b_n \end{bmatrix} \Delta u(t) + e(t) + \begin{bmatrix} c_1 - b_1 \\ c_2 - b_2 \\ \vdots \\ c_{n-1} - b_{n-1} \\ c_n - b_n \end{bmatrix} e(t)$$

$$y(t) = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] x(t) + e(t) \quad (9)$$

Por simplicidade, substituem-se as matrizes da equação 9 por coeficientes, conforme a Equação 10:

$$x(t+1) = Ax(t) + B\Delta u(t) + De(t)$$

$$y(t) = Hx(t) + e(t) \quad (10)$$

Utiliza-se então o modelo CARIMA para calcular as predições de forma recursiva.

$$x(t+1) = Ax(t) + B\Delta u(t) + De(t)$$

$$x(t+2) = Ax(t+1) + B\Delta u(t+1) + De(t+1)$$

$$x(t+2) = A(Ax(t) + B\Delta u(t) + De(t)) + B\Delta u(t+1) + De(t+1)$$

$$x(t+2) = A^2 x(t) + B\Delta u(t) + De(t) + B\Delta u(t+1) + De(t+1)$$

$$\bar{x}(t+N|t) = A^N x(t) + A^{N-1} B\Delta u(t) + \dots + B\Delta u(t+N-1) + A^{N-1} De(t) \quad (11)$$

O ruído no futuro é impossível de ser medido, porém, se o mesmo for branco e gaussiano, será zero, ou seja, $De(t + 1) = 0$. A saída é então denominada saída predita e será representada por x .

O cálculo foi realizado até $(x + N|t)$, onde N é o horizonte de predição, o qual deve ser escolhido de acordo com a dinâmica da planta.

Por meio do teorema do valor final, torna-se possível calcular uma função de transferência que relacione a entrada com a saída, a saída no caso seria o valor da predição no infinito. Essa estratégia não controla de forma direta os estados, mas sim controla a saída. Por esse motivo, realiza-se a predição não apenas dos estados, mas também das saídas, uma vez que, em última análise, o objetivo principal em um processo é assegurar que a saída siga a referência.

$$y(t) = Hx(t) + e(t)$$

$$y(t + 1) = Hx(t + 1) + e(t + 1)$$

$$y(t + 1) = HAx(t) + HB\Delta u(t) + HDe(t)$$

$$y(t + 2) = HA^2x(t) + HAB\Delta u(t) + HB\Delta u(t + 1) + HDe(t)$$

$$y(t + 3) = HA^3x(t) + HA^2B\Delta u(t) + HAB\Delta u(t + 1) + HB\Delta u(t + 2) + HA^2De(t)$$

$$y(t + N|t) = HA^Nx(t) + HA^{N-1}B\Delta u(t) + HA^{N-2}B\Delta u(t + 1) \cdots HB\Delta u(t + n - 1) + HA^{N-1}De(t)$$

(12)

Por simplicidade, representa-se o vector das predições da saída de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} y(t + 1|t) \\ y(t + 2|t) \\ y(t + 3|t) \\ y(t + n|t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} HA \\ HA^2 \\ HA^3 \\ HA^n \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} HB & 0 & 0 & 0 \\ HAB & HB & 0 & 0 \\ HA^2B & HAB & HB & 0 \\ HA^{n-1}B & HA^{n-2}B & \cdots & HB \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t + 1) \\ \Delta u(t + 2) \\ \Delta u(t + n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} HD \\ HAD \\ HA^2D \\ HA^{n-1}D \end{bmatrix} e(t)$$

(13)

Por simplicidade, substituem-se as matrizes da equação 13 por coeficientes, conforme pode ser visto na equação 14:

$$y = Fx(t) + G\Delta u(t) + Ee(t) \quad (14)$$

Quando o sinal de controle futuro é igual a 0, chama-se essa resposta de Resposta Livre, o termo livre se refere ao fato de que ela não depende do sinal de controle, apenas das condições iniciais do processo. Portanto, a saída predita do sistema será igual à resposta livre, ou seja: $y = Fx(t) + Ee(t)$.

Na equação 14, existem variáveis conhecidas e variáveis que não são conhecidas. É possível medir ou calcular $x(t)$ a partir do processo. Não é possível alterar o erro no instante

atual, apenas medi-lo, o que torna a variável $e(t)$ uma variável fixa. Para cada instante, terá um determinado valor. Por fim, conclui-se que a única variável livre que é possível alterar nas predições é o controle presente e futuro. A predição desejada é alcançada apenas utilizando o sinal de controle.

Se em um processo as condições iniciais são nulas, então, $x(t) = 0$ e $e(t) = 0$. Para simplificar a notação, muitas vezes as predições são representadas como $G\Delta u + f$, onde f seria $fx(t) + e(t)$. O resultado será uma constante, possível de ser calculada, independentemente do sinal de controle que for aplicado na planta.

2.6.3 A função custo do GPC

O algoritmo de Controle Preditivo Generalizado (GPC) consiste em aplicar uma sequência de controle que minimiza uma função de custo multiestágio da seguinte forma:

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - \omega(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (15)$$

Onde $\hat{y}(t+j|t)$ é uma previsão ótima da saída do sistema j etapas à frente com base nos dados até o tempo t , onde N_1 e N_2 são os horizontes de custo mínimo e máximo, N_u é o horizonte de controle, $\delta(j)$ e $\lambda(j)$ são sequências de ponderação, e $\omega(t+j)$ é a trajetória de referência futura.

O objetivo do controle preditivo é calcular a sequência futura de controle $u(t), u(t+1), \dots$ de tal forma que a saída futura da planta $y(t+j)$ seja aproximada de $\omega(t+j)$. Isso é alcançado ao minimizar $J(N_1, N_2, N_u)$.

Representa-se a função custo de forma matricial.

$$J = (y - w)^T (y - w) \quad (16)$$

Essa expressão representa essa soma:

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} (y(t+j|t) - \omega(t+j|t))^2 \quad (17)$$

Adiciona-se agora o sinal de controle:

$$J = (y - w)^T (y - w) + \Delta u^T Q_\lambda \Delta u \quad (18)$$

Todos os valores de λ serão incluídos dentro da matriz chamada Q_λ , que tem como diagonal os valores de λ . Por outro lado, havia sido determinado que $y = G\Delta u + f$, em que f é uma constante. Quando y é adicionado dentro da função custo, a única variável que ficará será Δu , portanto, determina-se Δu de forma tal que minimize essa função custo.

Determina-se a solução através da função custo, que é uma função quadrática. Para determinar o valor máximo e mínimo da função quadrática, deriva-se e iguala-se a zero.

$$hx \cdot \frac{dx}{dt} + b = 0 \quad (19)$$

O sinal de controle ótimo, considerando x um escalar:

$$x = -h^{-1}b \quad (20)$$

Neste caso a variável de decisão não é x , é Δu . Para calcular o controle ótimo, o primeiro passo será escrever essa função de custo no formato quadrático:

$$J = (y - w)^T Q_\delta (y - w) + \Delta u^T Q_\lambda \Delta u \quad (21)$$

É inserida uma matriz de ponderação do erro, representada na equação por Q_δ . No caso principalmente de sistemas multivariáveis é importante ponderar a saída, o erro, escolhe-se uma variável a qual será necessária apresentar uma velocidade mais rápida, por exemplo, e pondera-se, já em sistemas monovariáveis não é necessário.

Considerando que $y = G\Delta u + f$, colocando Δu em evidência e fazendo a multiplicação do erro temos:

$$\Delta u^T (G^T Q_\delta G + Q_\lambda) + \Delta u + 2 [G^T Q_\delta (f - w)]^T \Delta u + Q_\delta (f - w)^2 \quad (22)$$

Derivando e igualando a zero temos que o sinal de controle ótimo é dado pela Equação 23:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot 2 \Delta u^T (G^T Q_\delta G + Q_\lambda) + \Delta u + 2 [G^T Q_\delta (f - w)]^T \Delta u + ctte \\ \Delta u = (G^T Q_\delta G + Q_\lambda)^{-1} G^T Q_\delta (f - w) \end{aligned} \quad (23)$$

Comparando com a equação anterior, $\frac{h}{2} = (G^T Q_\delta G + Q_\lambda)^{-1}$ e $b = G^T Q_\delta (w - f)$. Se $w(t + j) = r(t)$ a referência é constante. Considerando que a resposta livre vai ser $Fx(t) - Ee(t)$, o sinal de controle pode ser calculado como:

$$\Delta u(t) = Kr(t) - KFx(t) - KEe(t) \quad (24)$$

No instante atual, de todos os vetores de controle, aplica-se apenas o primeiro, o resto fica descartado, não se utiliza nem mesmo no próximo tempo de amostragem, porque no próximo tempo de amostragem é feita uma nova predição para aumentar a robustez do sistema, ou seja, por simplicidade, utiliza-se apenas a primeira linha da matriz $(G^T Q_\delta G + Q_\lambda)^{-1} G^T Q_\delta$ onde teremos o sinal de controle no instante t , que será igual a K que será a primeira linha da matriz $K(w - Fx(t) - Ee(t))$. Em muitos processos práticos, a referência futura pode ser definida igual a uma constante, que será a referência atual desejada, ajudando a simplificar. Dessa forma, o sinal de controle será igual a uma constante:

$$\Delta u(t) = k_r r(t) - KFx(t) - KEe(t) \quad (25)$$

3 METODOLOGIA

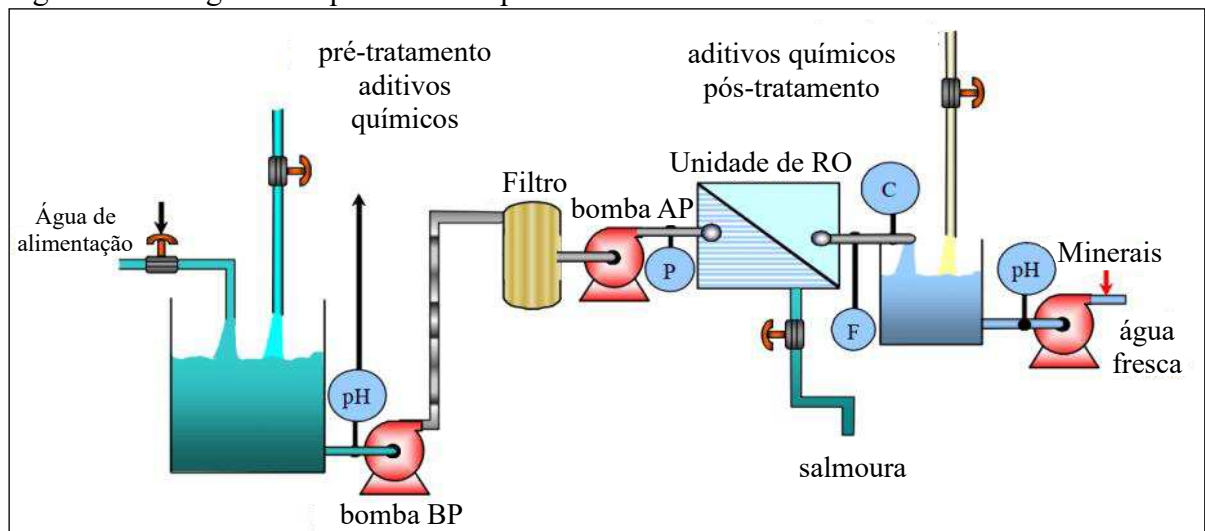
Trata-se de uma pesquisa de natureza aplicada de caráter exploratório-descrito e prospectivo na apresentação de um controlador preditivo generalizado aplicada a uma planta de dessalinização por Osmose Reversa.

O desenvolvimento deste estudo seguiu as seguintes etapas metodológicas: 1) apresentação do modelo de uma planta de Osmose Reversa (OR) utilizado; 2) apresentação da estrutura do controlador aplicado; 3) análise de robustez e; 4) simulação.

3.1 Apresentação do modelo de uma planta de Osmose Reversa utilizado

Apresenta a seguir o modelo usado para simulação e para o projeto do controlador que consiste em um sistema de Osmose Reversa básico que normalmente consiste em quatro subsistemas principais: pré-tratamento, bomba de alta pressão, montagem de membrana (unidade OR) e pós-tratamento (ver Figura 11).

Figura 11 – Diagrama esquemático de plantas de OR



Fonte: Gambier *et al.* (2006).

Para encontrar o modelo do processo, comumente utilizam-se métodos de identificação. Eles são aplicados por meio de experimentos de malha aberta ou de malha fechada, observando a dinâmica da entrada e comparando com a dinâmica da saída. O modelo de OR utilizado neste trabalho é proveniente de um sistema de configuração de membrana de fibra fina oca localizado no laboratório de P&D na fábrica de Osmose Reversa de Doha, no Kuwait, como apresentado em Alatiqi *et al.* (1989) e definido por

$$\begin{bmatrix} F \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}, \quad (26)$$

Onde

$$G_{11} = \frac{F}{P} = \frac{2(0,056s + 1)}{0,003s^2 + 0,1s + 1}, \quad (27)$$

$$G_{12} = \frac{F}{pH} = 0, \quad (28)$$

$$G_{21} = \frac{C}{P} = \frac{-0,51(0,36s + 1)}{0,213s^2 + 0,7s + 1}, \quad (29)$$

$$G_{22} = \frac{C}{pH} = \frac{-57(0,32s + 1)}{0,6s^2 + 1,8s + 1} \quad (30)$$

O C é a condutividade do permeado, F é o fluxo do permeado, P é a pressão de alimentação do sistema e pH é o pH da água de alimentação do sistema (CHITHRA, 2015).

Como é inviável aplicar análises químicas frequentes para avaliar a eficiência do processo, a condutividade tornou-se uma excelente alternativa para estimar a qualidade da água produzida.

O fluxo é um parâmetro utilizado para avaliar a produtividade da planta de OR, pois a mesma geralmente é projetada para produzir um valor de fluxo específico. A pressão de alimentação influencia os dois parâmetros operacionais primários, produtividade e condutividade da água do produto.

O acetato de celulose reage com a água e a taxa desta reação (hidrolise) depende do pH e da temperatura. À medida que esse processo químico ocorre, a passagem de água e sal através da membrana aumenta, porém, a passagem de sal aumenta a uma taxa maior do que a passagem de água, aumentando assim a condutividade da água produzida. Em plantas de Osmose Reversa que usam membranas de acetato de celulose, o pH é reduzido a fim de diminuir a taxa de hidrolise e, conseqüentemente, a condutividade. Vale salientar que a atuação no pH não gera nenhum efeito no fluxo da água produzida.

3.2 Estrutura do controlador aplicado

O modelo foi discretizado usando segurador de ordem zero com período de amostragem $T_s = 0,01$ s, obtendo-se:

$$G_n(z) = \begin{bmatrix} \frac{0,34556(z - 0,8364)}{(z^2 - 1,688z + 0,7165)} & 0 \\ -0,0085974(z - 0,9726) & \frac{-0,30418(z - 0,9692)}{(z - 0,9927)(z - 0,9776)} \end{bmatrix} \quad (31)$$

O filtro de referência F_r é obtido através da equação (32), onde n_p e n_z determinam a ordem do filtro, z é o operador do domínio discreto, β_f e α_f são parâmetros de ajuste para se obter a dinâmica desejada da resposta de seguimento de referência.

$$F_r(z) = \begin{bmatrix} \frac{(1 - \beta_{f_1})^{n_{p1}} \cdot (1 - \alpha_{f_1} z^{-1})^{n_{z1}}}{(1 - \beta_{f_1} z^{-1})^{n_{p1}} \cdot (1 - \alpha_{f_1})^{n_{z1}}} & 0 \\ 0 & \frac{(1 - \beta_{f_2})^{n_{p2}} \cdot (1 - \alpha_{f_2} z^{-1})^{n_{z2}}}{(1 - \beta_{f_2} z^{-1})^{n_{p2}} \cdot (1 - \alpha_{f_2})^{n_{z2}}} \end{bmatrix} \quad (32)$$

O GPC foi sintonizado com horizonte de predição $N = 87$, horizonte de controle $N_u = 1$, polos do polinômio $c(z^{-1})$ $\beta_{11} = \beta_{12} = \beta_{13} = 0,60$, $\beta_{21} = 0,991$, $\beta_{22} = 0,98$, $\beta_{23} = 0,991$, elementos da matriz de ponderação do sinal de controle Q_λ $\lambda_1 = 2000$, $\lambda_2 = 3500$, elementos da matriz de ponderação do sinal de erro Q_δ $\delta_1 = 1000$, polos do filtro de referência $Fr(z)$ $\beta_{f1} = 0,50$, $\beta_{f2} = 0,9845$ e $\alpha_{f1} = \alpha_{f2} = 0$. A Tabela 1 apresenta os parâmetros do GPC.

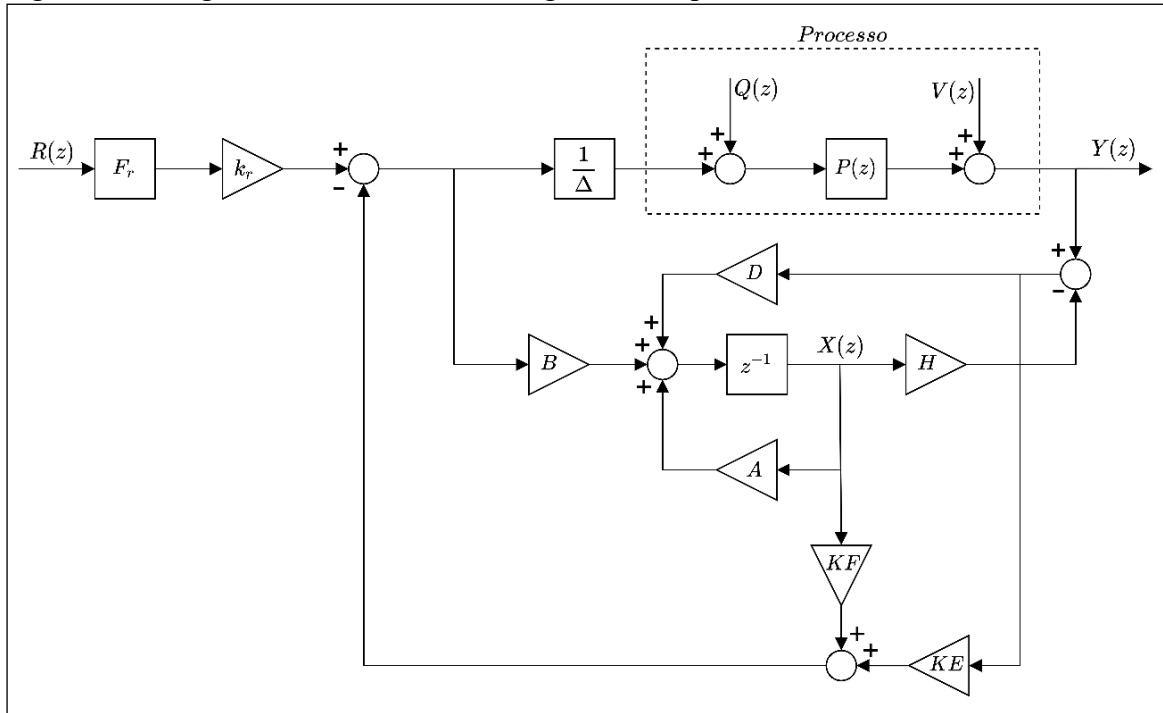
Tabela 1 – Parâmetros do Controlador

Filtro de Referência	K_r	KE
$\begin{bmatrix} \frac{0,5}{z - 0,5} & 0 \\ 0 & \frac{0,0155}{z - 0,9845} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,5087 & 0 \\ -0,0005 & -0,0026 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,1196 & 0 \\ -0,0011 & -0,0685 \end{bmatrix}$
KF		
$\begin{bmatrix} 16,87 & 16,71 & 16,54 & 16,36 & 16,17 & -0,21 & -0,20 & -0,19 & -0,1845 & -0,17 \\ -0,016 & -0,021 & -0,015 & -0,015 & -0,015 & -935,38 & -896,16 & -858,03 & -820,98 & -784,99 \end{bmatrix}$		

Fonte: Elaborada pela autora.

Uma representação de diagrama de blocos da abordagem GPC é apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Diagrama de blocos da abordagem GPC aplicado



Fonte: Elaborada pela autora.

A técnica proposta foi comparada com o controlador PID através de índices de desempenho, como integral do erro absoluto (IAE, do inglês *integrated absolute error*) e variação total (TV, do inglês *total variation*) do sinal de controle. Os índices são aplicados para avaliar o seguimento de referência e rejeição de perturbação de ambas as malhas para o caso nominal e para o caso com incertezas.

As expressões para esses índices são dispostas a seguir nas equações 33 e 34:

$$IAE = \int_{t_0}^{t_f} |r(t) - y(t)| dt, \quad (33)$$

$$TV = \sum_{i=1}^{N_f} |u_{i+1} - u_i|, \quad (34)$$

Onde t_0 é o tempo inicial da resposta, t_f é o tempo final da resposta, i é a amostra e N_f é a quantidade de amostras da resposta. Os índices IAE e TV são calculados para respostas de seguimento de referência, respostas de influência entre malhas e respostas de rejeições de perturbações. Para os dois índices, quanto menores eles forem, melhor será o desempenho do controlador.

A simulação da aplicação do Controlador Preditivo Generalizado (GPC) na planta de dessalinização por Osmose Reversa foi realizada por meio da plataforma integrada

MATLAB e Simulink.

3.3 Análise de robustez

Nesta secção apresenta-se a análise de robustez definindo de forma matemática a condição de estabilidade robusta. Diante disso, uma forma de se representar incertezas paramétricas e através da incerteza aditiva:

$$G(z) = G_n(z) + \Delta G, \quad (35)$$

Onde $G(z)$ é o processo, $G_n(z)$ é o modelo nominal, $\Delta G(z)$ representa a incerteza desconhecida do modelo; Incertezas desconhecidas podem ser decompostas no domínio da frequência da seguinte maneira (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2007):

$$\Delta G(\omega) = W_2(\omega)\Delta(\omega)W_1(\omega), \bar{\sigma}(\Delta(\omega)) < 1, \forall \omega \in [0, \pi/Ts], \quad (36)$$

onde $\Delta(z)$ é uma matrix de rank completo, $W_1(z)$ e $W_2(z)$ são duas matrizes de transferência estáveis que caracterizam a estrutura espacial e de frequência da incerteza e $\bar{\sigma}(X)$ é o valor singular máximo de X .

Utilizando a representação $M - \Delta$, o sistema de malha fechada pode ser dividido em dois termos, o nominal e o incerto, resultando em

$$M(z) = -W_1(z)M'(z)W_2(z), \quad (37)$$

onde

$$M'(z) = [I + C_{eq}(z)G_n(z)]^{-1} C_{eq}(z), \quad (38)$$

e $C_{eq}(z)$ é o controlador equivalente quando a lei de controle (9) é posta na estrutura de controle de 2 graus de liberdade (2DOF, do inglês *2 degrees of freedom*).

Portanto, a condição de estabilidade robusta é obtida por:

$$\bar{\sigma}(M(e^{j\omega Ts})) < 1, \forall \omega \in [0, \pi/Ts], \quad (39)$$

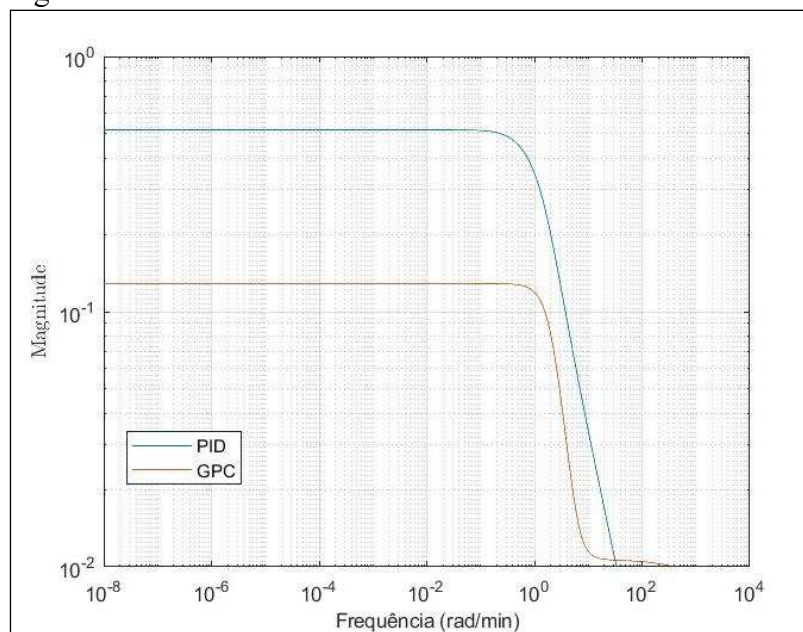
4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

O controlador utilizado para comparação é a estrutura de controle baseada em controle PID de (RATHORE *et al.*, 2013). Ela foi sintonizada utilizando a regra de sintonia proposta em (LEE *et al.*, 2004), resultando no seguinte controlador PID descentralizado:

$$C(s) = \begin{bmatrix} \frac{0,625(s + 22,65)}{s} & 0 \\ 0 & \frac{-0,02946(s + 0,6789)}{s} \end{bmatrix} \quad (40)$$

Na análise da robustez, a Figura 5 mostra as curvas de ambos os controladores. A sintonia do GPC foi realizada de forma que os controladores apresentam índices de robustez semelhantes para uma comparação justa.

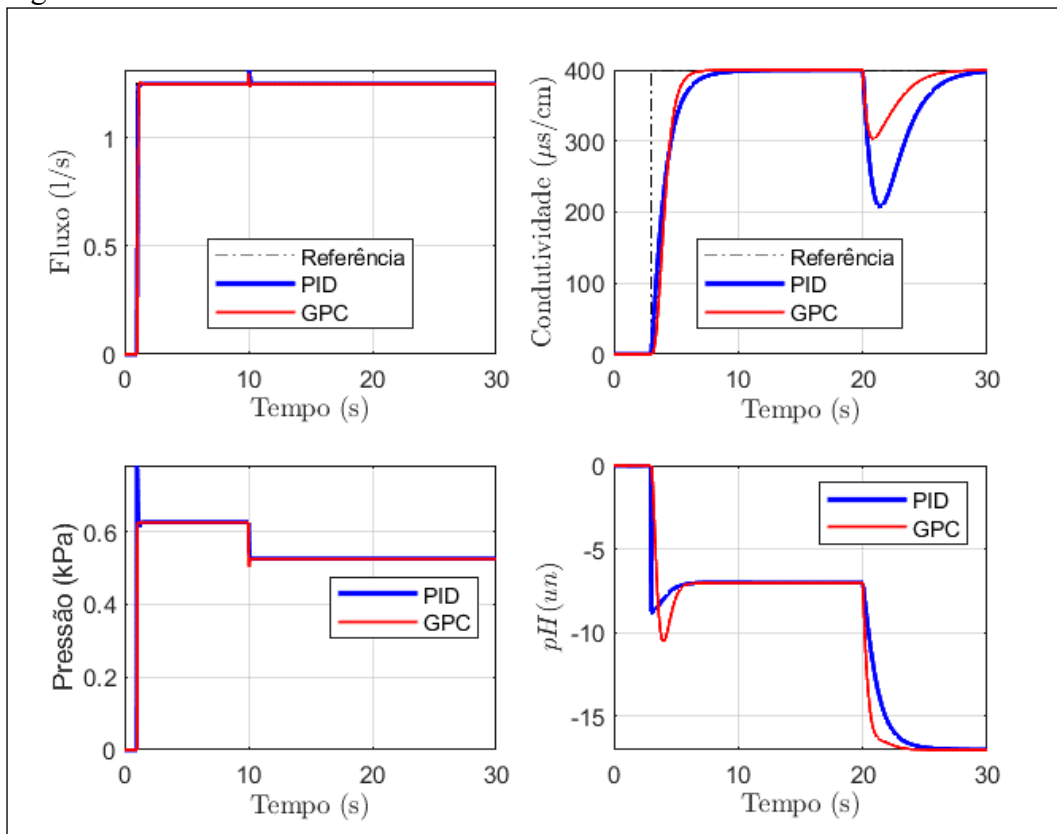
Figura 12 - Índice de Robustez



Fonte: Elaborada pela autora.

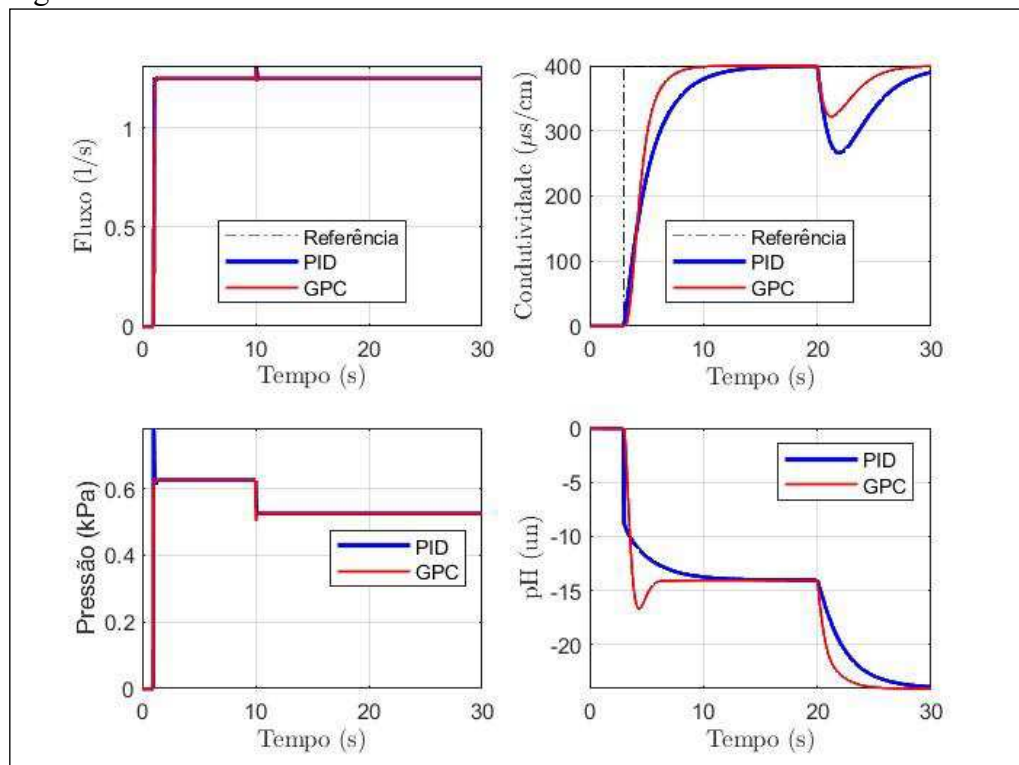
As Figura 13 e Figura 14, logo abaixo, mostram os sinais de saída e de controle para o PID e o GPC proposto nas simulações do caso nominal e do caso com incertezas no modelo, respectivamente. Em $t = 1$ s um degrau de 1,25 l/s é aplicado na referência de fluxo, em $t = 3$ s um degrau de 400 $\mu\text{s/cm}$ é aplicado na referência de condutividade, em $t = 10$ s é aplicada uma perturbação tipo degrau de 0,1 kPa na entrada de pressão e em $t = 20$ s é aplicada uma perturbação tipo degrau de 10 un. na entrada de pH.

Figura 13 - Caso nominal



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 14 - Caso incerto



Fonte: Elaborada pela autora.

No caso com incertezas, foi considerada uma incerteza de -50% no ganho estático da malha que relaciona a condutividade e o pH (5). A incerteza de modelagem foi aplicada na malha mais sensível para o processo.

Os índices de desempenho obtidos para cada controlador para o caso nominal e o caso com incerteza estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Índices de desempenho.

Resposta	TIPO DE CONTROLE	Nominal				Incerto			
		MALHA 01		MALHA 02		MALHA 01		MALHA 02	
		IAE1	TV1	IAE2	TV2	IAE1	TV1	IAE2	TV2
Servo de Fluxo	GPC	0,0884	0,63	0,0745	0,023	0,08	0,63	0,18	0,02
	PID	0,0631	0,97	0	0,039	0,06	0,97	0,19	0,03
Servo de Condutividade	GPC	$6 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	476,30	18,25	0	0	667,02	19,33
	PID	0	0	476,91	10,56	0	0	939,59	14
Regulação no Fluxo	GPC	0,0038	0,14	0,84	0,00084	0	0,14	1,89	0,01
	PID	0,0070	0,10	2,78	0,0088	0,01	0,10	49,23	0,29
Regulação na Condutividade	GPC	$6 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	274,30	10	0	0	273,69	10
	PID	0	0	667,46	9,99	0	0	647,45	9,86

Fonte: Elaborada pela autora.

A tabela é dividida entre Malha 01 e Malha 02, sendo a Malha 01 representada pelo Fluxo e a Pressão e a Malha 02 pela condutividade e o pH. Os índices são calculados em 4 etapas, sendo estas: servo de fluxo, servo de condutividade, regulação no fluxo e regulação na condutividade. O cálculo é feito tanto para o caso nominal, quanto para o caso incerto, tanto para a Malha 01 quanto para a Malha 02, totalizando 16 cenários. Como pode ser visto na Figura 13 e Figura 14, o GPC apresenta rejeição de perturbações mais rápida para ambas as malhas, tanto para o caso nominal, quanto para o caso incerto, com um sobressinal menor para a malha de fluxo e um subsinal menor para a malha de condutividade. O PID apresentou melhores índices de TV em 8 dos 16 cenários avaliados e equivalente em 2, já o GPC apresentou um IAE melhor que o do PID em 9 e equivalente em 2.

5 CONCLUSÃO

Este estudo apresentou um controlador preditivo generalizado aplicado à uma planta de dessalinização por Osmose Reversa submetida às incertezas e perturbações. Ao lidar com perturbações, a estrutura de controle proposta apresentou uma rejeição de perturbações mais rápida para a malha de fluxo e para a malha de condutividade, tanto para o caso incerto quanto para o caso nominal, quando comparada ao controlador PID.

A partir dos resultados da simulação, o GPC apresentou melhores índices de IAE para 9 cenários e equivalente para 2 dos 16 avaliados. O índice TV foi melhor em 6 cenários e equivalente em 2 dos 16 cenários analisados.

Portanto, dado a sua melhor eficácia na rejeição de perturbações, a estrutura de controle proposta apresenta grande potencial na substituição de controladores PID para aplicações em plantas de dessalinização por Osmose Reversa.

Como trabalho futuro, sugere-se explorar métodos avançados de sintonia do controlador preditivo generalizado. Técnicas de otimização automática podem ser utilizadas para buscar os parâmetros ótimos do controlador em termos de desempenho e robustez. Outra sugestão seria aplicar o controlador preditivo generalizado em uma planta de dessalinização por osmose reversa real. Isso proporcionará uma validação prática dos resultados obtidos em simulação.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, A. Model predictive control of a reverse osmosis desalination unit. **Desalination**, [online], v. 194, issues 1–3, p. 268-280, jun. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.10.033>. Acesso em: 19 jun. 2023.
- ABDELMALEK, S.; BELMILI, H. A New Robust H_∞ Control Power. In: AZAR, A. T.; VAIDYANATHAN, S. **Handbook of Research on Advanced Intelligent Control Engineering and Automation**. Hershey/EUA: IGI Global, 2015. cap. 22, p. 601-623. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/276092101_Handbook_of_Research_on_Advanced_Intelligent_Control_Engineering_and_Automation. Acesso em: 19 jun. 2023.
- AL GHAMDI, A.; MUSTAFA, I. Exergy analysis of a MSF desalination plant in Yanbu, Saudi Arabia. **Desalination**, [online], v. 399, p. 148–158, dez. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916416311547>. Acesso em: 19 jun. 2023.
- ALI, M. B.; KAIROUANI, L. Multi-objective optimization of operating parameters of a MSF-BR desalination plant using solver optimization tool of Matlab software. **Desalination**, [online], v. 381, p. 71–83, mar. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916415301326>. Acesso em: 19 jun. 2023.
- ALLEGREZZA, A. E.; BURCHESKY, R. D.; GÖTZ, G.; DAVIS, R. B.; COPLAN, M. J. Hollow fiber composite reverse osmosis membrane. **Desalination**, [online], v. 20, Issues 1–3, p. 87–94, dez. 1977. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916400883770>. Acesso em: 19 jun. 2023.
- AL-WESHAHI, M. A.; ANDERSON, A.; TIAN, G. Exergy efficiency enhancement of MSF desalination by heat recovery from hot distillate water stages. **Applied Thermal Engineering**, [online], v. 53, n. 2, p. 226–233, maio 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431112001093>. Acesso em: 19 jun. 2023.
- ARAÚJO, A. C. S. P. A. **Contribuição para o estudo da viabilidade/sustentabilidade da dessalinização enquanto técnica de tratamento de água**. 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/10203>. Acesso em: 5 ago. 2023.
- ARAÚJO, G. C.; ROSA, T. S.; OLIVEIRA, T. Dessalinização de água salobra por osmose reversa: uma revisão de literatura. **Journal of Exact Sciences**, [online], v. 31, n. 1, p. 18-24, out./ dez. 2021. Disponível em: <https://www.mastereditora.com.br/jes31-1>. Acesso em: 5 ago. 2023.
- BANDI, C. S.; UPPALURI, R.; KUMAR, A. Global optimization of MSF seawater desalination processes. **Desalination**, [online], v. 394, 30–43, set. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916416301618>. Acesso em: 19 jun. 2023.

BARTMAN, A. R.; CHRISTOFIDES, P. D.; COHEN, Y. Nonlinear model-based control of an experimental reverse osmosis water desalination system. **IFAC Proceedings Volumes**, [online], v. 42, n. 11, p. 892-897, 17 abr. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.3182/20090712-4-TR-2008.00146>. Acesso em: 19 jun. 2023.

BESSA, L. C.; MEIRELLES, A. J. **Integração térmica de colunas de destilação alcoólica multicomponente**. 2012. 191 f. Dissertação (mestrado em Engenharia química) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, SP, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/845875>. Acesso em: 19 jun. 2023.

BONNA, R. D.; CAMINO, J. F. **Técnicas de controle não linear para o problema de rastreamento de trajetória aplicada a quadricópteros**. 2016. 122 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000971858>. Acesso em: 19 jun. 2023.

CAMACHO, E.; ALBA, C. **Model Predictive Control**. (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). Springer London. 2007.

CHEN, C.; JIANG, Y.; SIM, Z.; YANG, Y.; HOU, L. Sustainably integrating desalination with solar power to overcome future freshwater scarcity in China. **Glob. Energy Interconnect**, [online], v. 2, n. 2, p. 98-113, out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloe.2019.07.009>. Acesso em: 19 jun. 2023.

CHITHRA, K.; ANDY, S.; VIJAYALAKSHMI, V.; ASUNTHA, A. Pid controller tuning in reverse osmosis system based on particle swarm optimization. **International Journal of Scientific & Technology**, v. 3, p. 351-358, mar. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/325846719>. Acesso em: 19 jun. 2023.

CILDOZ, M. U. **Estudo comparativo de controladores de estrutura variável por modos deslizantes aplicados a veículos subaquáticos autônomos**. 2014. 158 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Dinâmicos e Energéticos) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2014. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/1078>. Acesso em: 19 jun. 2023.

CLARKE, D.; MOHTADI, C.; TUFFS, P. Generalized predictive control—part i. the basic algorithm. **Automatica**, Elsevier BV, v. 23, n. 2, p. 137–148, mar. 1987. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0005109887900872>. Acesso em: 5 ago. 2023.

COSTA, A. O.; SANTOS, P. R. S. **Análise do processo difuso por osmose reversa em processos de dessalinização da água salgada ou salobra para obtenção de água potável**. Belo Horizonte, 2018. 10 p.

CUENCA, J. A. B. **Projeto de controladores PID para uma unidade de dessalinização de água do mar por osmose inversa**. 2020. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Eletrônica) – Universidade do Algarve, Instituto Superior de Engenharia, Portugal, 2020. Disponível em <http://hdl.handle.net/10400.1/15141>. Acesso em: 3 jun. 2023.

CUNHA, D. P. S. Análise de viabilidade técnica e econômica do processo de dessalinização acoplado com sistema de energia solar no Estado da Bahia. 2020. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/32428>. Acesso em: 5 ago. 2023.

DO THI, H. T.; TÓTH, A. J. Investigation of Carbon Footprints of Three Desalination Technologies: Reverse Osmosis (RO), Multi-Stage Flash Distillation (MSF) and Multi-Effect Distillation (MED). **Periodica Polytechnica Chemical Engineering**, [online], v. 67, n. 1, p. 41-48, fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3311/PPch.20901>. Acesso em: 19 jun. 2023.

EL-HAMID, A. M.; EISSA, A. H.; ABOUEL-FOTOUH, A. M.; ABDEL-FATAH, M. A. Comparison Study of Different Structures of PID Controllers. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, [online], v. 11, 2015. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Comparison-Study-of-Different-Structures-of-PID-El-Hamid-Eissa/303a3adf0efc42f6f5a102cfc37ffe564ec87217>. Acesso em: 19 jun. 2023.

EL-SALAM, M. A. Membrane techniques: applications of reverse osmosis. **Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition**. Elsevier, p. 3833–3837, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b0-12-227055-x/00762-8>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ERNANDES NETO, V.; SARCINELLI-FILHO, M.; BRANDÃO, A. S. Análise de Desempenho de Controladores de Formação baseados em Espaço Nulo. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 2014., Ouro Preto, 2019. **Anais [...]**. Campinas: Galoá, 2019. p. 3129-3134. Disponível em: <https://proceedings.science/sbai-2019/trabalhos/analise-de-desempenho-de-controladores-de-formacao-baseados-em-espaco-nulo?lang=pt-br>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ESTRABIS, T.; PELZL, M. .; CORDERO, R.; SUEMITSU, W. Aplicação do controlador preditivo generalizado para rastreamento de referência polinomial considerando perturbações. **Conjecturas**, [S. l.], v. 22, n. 16, p. 1146–1160, dez. 2022. Disponível em: <http://conjecturas.org/index.php/edicoes/article/view/2112>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ESTRABIS, T.; PELZL, M.; CORDERO, R.; SUEMITSU, W. Aplicação do controlador preditivo generalizado para rastreamento de referência polinomial considerando perturbações. **Conjecturas**, [S. l.], v. 22, n. 16, p. 1146-1160, dez. 2022. Disponível em: <https://www.conjecturas.org/index.php/edicoes/article/view/2112>. Acesso em: 19 jun. 2023.

FARHADI, F.; DEYMI-DASHTEBAYAZ, M.; TAYYEBAN, E. Studying a Multi-Stage Flash Brine Recirculation (MSF-BR) System Based on Energy, Exergy and Exergoeconomic Analysis. **Water**, [online], v. 14, n. 19, p. 3108 (1-18), out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w14193108>. Acesso em: 19 jun. 2023.

FERIA-DÍAZ, J. J.; CORREA-MAHECHA, FELIPE; LÓPEZ-MÉNDEZ, M. C.; RODRÍGUEZ-MIRANDA, J. P.; BARRERA-ROJAS, J. Recent Desalination Technologies by Hybridization and Integration with Reverse Osmosis: A Review. **Water**, [online], v. 13, n. 10, e1369, maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13101369>. Acesso em: 19 jun. 2023.

GAMBIER, A.; WELLENREUTHER, A.; BADREDDIN, E. Optimal control of a reverse

osmosis desalination plant using multi-objective optimization. *In: IEEE Conference on Computer Aided Control System Design; IEEE International Conference on Control Applications; IEEE International Symposium on Intelligent Control, Munique, 2006. Proceedings [...]. Munique, Alemanha: IEEE. p. 1368–1373. 2006. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4776841>. Acesso em: 19 jun. 2023.*

GOMES FILHO, H. R.; ROCHA, E. F. C.; OLIVEIRA, V. P. S. Produção e consumo de água dessalinizada em plataforma de petróleo. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 9–17, dez. 2015. Disponível em: <https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/boletim/article/view/2177-4560.v8n214-01>. Acesso em: 5 ago. 2023.

GOMES, A. C. C.; SÁ, E. A.; SILVA, J. L. B.; DINIZ, M. C. Prospecção tecnológica em sistemas de dessalinização da água salobra e salgada. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 48-61, set. 2022. Disponível em: <https://revistarebram.com/index.php/revistauniara/article/view/1235>. Acesso em: 5 ago. 2023.

GULLINKALA, T.; DIGMAN, B.; GOREY, C.; HAUSMAN, R.; ESCOBAR, I. C. Chapter 4 desalination: Reverse osmosis and membrane distillation. *In: ESCOBAR, I. C.; SCHÄFER, A. I. (Ed.). Sustainable Water for the Future: Water Recycling versus Desalination. Sustainability Science and Engineering*, Elsevier, v. 2. p. 65–93, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871271109002049>. Acesso em: 19 jun. 2023.

IHSANULLAH, I.; ATIEH, M. A.; SAJID, M.; NAZAL, M. K. Desalination and environment: A critical analysis of impacts, mitigation strategies, and greener desalination technologies. **Science of The Total Environment**, [online], v. 780, p. 146585. mar. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721016533>. Acesso em: 19 jun. 2023.

JAMIL, A. A.; TU, W.; ALI, S.W.; TERRICHE, Y.; GUERRERO, J. M. Fractional-Order PID Controllers for Temperature Control: A Review. **Energies**, [online], 2022. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Fractional-Order-PID-Controllers-for-Temperature-A-Jamil-Tu/8e6314458f76e410ed506cc8eca54e6caf3fc448>. Acesso em: 19 jun. 2023.

KILLINGSWORTH, N.J.; KRSTIĆ, M. Auto-tuning of PID controllers via extremum seeking. **Proceedings of the 2005, American Control Conference**, 2005., v. 4, p. 2251-2256, jan. 2005. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Auto-tuning-of-PID-controllers-via-extremum-seeking-Killingsworth-Krsti%C4%87/e23169665fd2f8f2ee0fe35841a057d1d8e3d022>. Acesso em: 19 jun. 2023.

LEE, M.; LEE, K.; KIM, C.; LEE, J. Analytical design of multiloop PID controllers for desired closedloop responses. **AIChE Journal**, [online], v. 50, n. 7, p. 1631–1635, jun. 2004. Disponível em: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aic.10166>. Acesso em: 5 ago. 2023.

LIGERO, E. L. **Estudo de processos de produção de etanol anidro através da destilação extrativa salina com recuperação do agente de separação**. 1999. 178 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP, 1999. Disponível em: <http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000188370>. Acesso em: 19 jun.

2023.

LIU, Y.; WANG, X.; LIU, X.; HUANG, S.; CHIU, C.; YE, N.; YANG, B. Transient Thermal Modeling of Die Bond Process in Multiple Die Stacked Flash Memory Package. **2022 IEEE 72nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)**, San Diego, CA, USA, , p. 513-518, 12 jul. 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9816394>. Acesso em: 19 jun. 2023.

MARQUES, W. P.; SANTOTÓRIO, R. Desenvolvimento de ferramenta didática para simulação de coluna de destilação por meio do método de MCCABE-THIELE. **Revista Ifes Ciência**, [online], v. 5, n. 1. p. 01-10, jun. 2019. Disponível em: <https://ojs.ifes.edu.br/index.php/ric/article/view/262>. Acesso em: 19 jun. 2023.

MATTOS, E.; BORIN, L. C.; VIARO, A. R.; HOLLWEG, G.V.; EVALD, P. J.; MONTAGNER, V. F. Controladores de corrente para inversores conectados à rede com filtro LCL por realimentação de estados com número reduzido de sensores. SEMINAR ON POWER ELECTRONICS AND CONTROL, 2014., Santa Maria, 2022. **Proceedings [...]**. Santa Maria, Brasil: SEPOC, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/27098>. Acesso em: 19 jun. 2023.

MAYYAH, A. A. Important approaches to enhance reverse osmosis (RO) thin film composite (TFC) membranes performance. **Membranes**, MDPI AG, [online], v. 8, n. 3, p. 68, ago. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/membranes8030068>. Acesso em: 19 jun. 2023.

MINDLER, A. B.; EPSTEIN, A. C. Chapter 2.6 measurements and control in reverse osmosis desalination. **Desalination**, [online], v. 59, p. 343–379, ago. 1986. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(86\)90036-6](https://doi.org/10.1016/0011-9164(86)90036-6). Acesso em: 5 ago. 2023.

MOCOCK, J. F.; PESSÔA, C. N.; MONTEIRO, ÂNGELA T. D. S.; CASEIRA GONÇALVES TORRES, A. S.; KOHLMAN RABBANI, E. R. Estudo comparativo entre os principais métodos de dessalinização de águas subterrâneas: revisão de literatura. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], set. 2021. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29287>. Acesso em: 6 ago. 2023.

MOHAMMADIFAKHR, M.; GROOTH, J.; ROESINK, H. D. W.; KEMPERMAN, A. J. B. Forward osmosis: a critical review. **Processes**, MDPI AG, [online], v. 8, n. 4, p. 404, mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr8040404>. Acesso em: 19 jun. 2023.

MONDAL, S.; DE, S. Reverse osmosis modeling, simulation, and optimization. In: **Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes**. Elsevier, [online], p. 187–206, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816777-9.00008-3>. Acesso em: 19 jun. 2023.

MOREIRA, D.; BRASIL, A. S.; NUNES, M. A. Utilização de Controladores de Corrente para Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Arranjo Fotovoltaico. **Sociedade Brasileira de Automática**, [online], v. 1, n. 1, p. 1-6, 13 fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2201>. Acesso em: 19 jun. 2023.

MOREIRA, J. F. **Análise exérgica do sistema de evaporadores de efeito múltiplo da etapa de recuperação da indústria Kraft de obtenção de celulose**. 2018. 91 f. Dissertação

(mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-B32PZQ>. Acesso em: 19 jun. 2023.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. **Nações Unidas Brasil**, Brasília, 15 set. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>. Acesso em: 5 ago. 2023.

QASIM, M.; BADRELZAMAN, M.; DARWISH, N. N.; DARWISH, N. A.; HILAL, N. Reverse osmosis desalination: a state-of-the-art review. **Desalination**, [online], v. 459, p. 59–104, jun. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916418325037>. Acesso em: 19 jun. 2023.

QI, Z.; SHI, Q.; ZHANG, H. Tuning of Digital PID Controllers Using Particle Swarm Optimization Algorithm for a CAN-Based DC Motor Subject to Stochastic Delays. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [online], v. 67, p. 5637-5646, jul. 2020. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Tuning-of-Digital-PID-Controllers-Using-Particle-a-Qi-Shi/218ce72de6cf8b730d0398cc0517b74ec5ff63d3>. Acesso em: 19 jun. 2023.

QUEIROZ, D. M. B. **Desenvolvimento e identificação experimental de planta piloto de dessalinização por osmose reversa**. 2021. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/70048>. Acesso em: 3 jun. 2023.

RAȚĂ, M.; RAȚĂ, G.; CHATZIATHANASIOU, V. A solution for the study and understanding of PID controllers. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXPOSITION ON ELECTRICAL AND POWER ENGINEERING, 2014., Romênia. **Proceedings** [...]. Iasi, Romênia: EPE, 2014. p. 182-185. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6969893>. Acesso em: 19 jun. 2023.

RATHORE, N.S.; CHAUHAN, D.; SINGH, V. Luusjaakola optimization procedure for pid controller tuning in reverse osmosis system. **International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication**, [online], v. 3, n. 6, p. 77–80, jun. 2015. Disponível em: https://ijeedc.iraj.in/paper_detail.php?paper_id=2270&name=Luus-Jaakola_Optimization_Procedure_For_PID_Controller_Tuning_In_Reverse_Osmosis_System. Acesso em: 5 ago. 2023.

RATHORE, N.S.; KUNDARIYA, N.; NARAIN, A. PID controller tuning in reverse osmosis system based on particle swarm optimization. **International Journal of Scientific and Research Publications**, [online], v. 3, n. 6, p. 1–5, jun. 2013. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/PID-Controller-Tuning-in-Reverse-Osmosis-System-on-Rathore-Kundariya/a771a0b22d1fe5bf7b137191e3204bd5cbd8f3d2>. Acesso em: 5 ago. 2023.

SANAYE, S.; ASGARI, S. Four e analysis and multi-objective optimization of combined cycle power plants integrated with Multi-stage Flash (MSF) desalination unit. **Desalination**, [online], v. 320, 105–117, jul. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916413001999>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SANDHYA, A. An overview of Fractional order PID Controllers and its Industrial applications. **International Journal of Innovations in Engineering and Technology** (IJJET), [online], v. 6 n. 4, p. 534-546, abr. 2016. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/An-overview-of-Fractional-order-PID-Controllers-and-Sandhya/3c8c036d5c12b0a2d10c32391ec33f110e165226>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SANTOS, J. C.; SILVA, F. L.; ZACHI, A. R.; GOUVÊA, J. Rastreamento de trajetória em veículos aéreos não tripulados utilizando um controlador com rejeitador ativo de distúrbio. **Sociedade Brasileira de Automática**, [online], v. 1, n. 1, p. 1-8, 9 set. 2020. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/881. Acesso em: 19 jun. 2023.

SANTOS, L. M. R. L. **Desenvolvimento de um evaporador de carcaça e tubos para um sistema de dessalinização por compressão térmica de vapor de pequena escala**. 2021. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto, Portugal, 2021. Disponível em: https://sigarra.up.pt/feup/pt/teses.tese?P_ALUNO_ID=124690&p_processo=26813. Acesso em: 19 jun. 2023.

SARAIVA, S. V.; CARVALHO, F. O.; SANTOS, J. S.; BARRETO, L. C.; COSTA, P. R. M.; avaliação do efeito da cristalização na etapa de evaporação de múltiplo efeito empregado na concentração de soda, p. 2171-2176. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, São Paulo v. 1, n. 4, jul. 2017. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/avaliacao-do-efeito-da-cristalizacao-na-etapa-de-evaporacao-de-multiplo-efeito-empregado-na-concentrao-de-soda-26197>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SEGUNDO, V. A.; CAVALCANTI, M. T.; SILVA, J. N. Estudo e Monitoramento Tecnológico de Dessalinização via Destilação por Recompressão Mecânica de Vapor. **Cadernos de Prospecção**, Salvador, v. 12, n. 1, p. 191-203, mar, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/nit/article/view/27274>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SHI, J.; KELKAR, A. G.; SOLOWAY, D. GPC-based stable reconfigurable control. **Dynamic Systems and Control**, [online], v. 72, p. 1-42, jan. 2003. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20040081114>. Acesso em: 5 ago. 2023.

SILVA, F. P.; QUIRINO, J. M. Dessalinização por osmose reversa. **Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 2, p. 16-32, jul./ dez. 2020. Disponível em: <http://revistas.icesp.br/index.php/TEC-USU/article/view/1453>. Acesso em: 5 ago. 2023.

SILVA, L. F.; MARTINS JÚNIOR, M. C.; RAMOS, W. B. Otimização do processo de destilação por mudança de pressão com corrente intermediária para separação da mistura azeotrópica Éter Diisopropílico/Álcool Isopropílico. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 7, e21711728138, maio 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i7.28138>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SILVEIRA, B. D.; COSTA JUNIOR, E. F.; COSTA, A. O. Modelagem Dinâmica de Evaporadores de Múltiplo Efeito de Fábrica de Celulose por Regressão Linear Múltipla. **Engevista**, [online], v. 19, n. 3, p. 590-, jul. 2017. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/9123>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SIQUEIRA, A. D.; MARTINS, A. L.; VIANA, E. E. Princípios de funcionamento de diferentes métodos de dessalinização de água do mar e análise paramétrica de um dessalinizador de efeito múltiplo (MED). **The Journal of Engineering and Exact Sciences – JCEC**, Viçosa/MG, BR, v. 8, n. 1, p. 13833–01e, jan. 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/13833>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. **Multivariable feedback control: analysis and design**. Wiley-Interscience: 2007. 2ª ed. .592 p.

SOUZA, J. W. M. **Análise térmica de uma planta de dessalinização de múltiplo efeito (MED) com alimentação paralela**. 2004. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/11796>. Acesso em: 5 ago. 2023.

SOUZA, L. F. Dessalinização como fonte alternativa de água potável. **Revista Norte Científico**, Boa Vista, RR, Brasil, v. 1, n. 1, p. 84-97, dez. 2006. Disponível em: https://periodicos.ifrr.edu.br/index.php/norte_cientifico/article/view/32. Acesso em: 19 jun. 2023.

TAKÁCS, G.; ROHAL’-ILKIV, B. **Model Predictive Vibration Control**. Springer London, 2012.

TEJADO, I.; VINAGRE, B.M.; TRAVER, J.E.; PRIETO-ARRANZ, J.; NUEVO-GALLARDO, C. Back to Basics: Meaning of the Parameters of Fractional Order PID Controllers. **Mathematics**, [online], v. 7, n. 6, p. 530, 11 jun. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-7390/7/6/530>. Acesso em: 19 jun. 2023.

THEODORE, L.; DUPONT, R.R. **New options for water desalination**. Imprensa CR: Boca Raton 2019. 1ª ed. .444 p.

TORRI, J. B. **Dessalinização de água salobra e/ou salgada: métodos, custos e aplicações**. 2015.

TORRICO, B.C.; ANDRADE, F.V.; PEREIRA, R.D.O.; NOGUEIRA, F.G. Anti-windup dead-time compensation based on generalized predictive control. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 2016., Boston. **Proceedings** [...]. Boston, EUA: IEEE, 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6969893>. Acesso em: 19 jun. 2023.

VALAVALA, R.; SOHN, J.-S.; HAN, J.-H.; HER, N.-G.; YOON, Y.-M. Pretreatment in reverse osmosis seawater desalination: A short review. **Environmental Engineering Research**, República da Coreia, v. 16, n. 4, p. 205–212, dez. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4491/eer.2011.16.4.205>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ZUBAIR, M. M.; SALEEM, H.; ZAIDI, S. J. Recent progress in reverse osmosis modeling: an overview. **Desalination**, [online], v. 564, p. 116705, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916423003375>. Acesso em: 19 jun. 2023.