



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

DAYSE MARIA BENEVIDES DE QUEIROZ

DESENVOLVIMENTO E IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE PLANTA
PILOTO DE DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA

FORTALEZA

2021

DAYSE MARIA BENEVIDES DE QUEIROZ

DESENVOLVIMENTO E IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE PLANTA
PILOTO DE DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energias Renováveis e Controle.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira

FORTALEZA

2021

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)

- Q43d Queiroz, Dayse Maria Benevides de.
Desenvolvimento e Identificação Experimental de Planta Piloto de Dessalinização por Osmose Reversa /
Dayse Maria Benevides de Queiroz. – 2021.
66 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.
Coorientação: Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira.
1. Dessalinização por Osmose Reversa. 2. Modelagem de sistemas reais. 3. Método mínimos quadrados
não recursivo. 4. Acionamento fotovoltaico. I. Título.

CDD 621.3

DAYSE MARIA BENEVIDES DE QUEIROZ

DESENVOLVIMENTO E IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE PLANTA
PILOTO DE DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Energias Renováveis e Controle.

Aprovado em ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Prof. Dr. Bismark Claire Torrico
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Thiago Damasceno Cordeiro
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

À minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e avó por me proporcionaram base, conforto e apoio durante minha trajetória acadêmica. À minha, minha irmã Lya e minha prima Isadora, por sempre acreditarem no meu potencial e inteligência.

Aos meus amigos, que me deram apoio emocional, em especial à Thainá, Breno, Felipe e Talita. Aos amigos que foram também meus professores e essenciais para meu desempenho e aprendizagem, Natasha, Guilherme, José Raimundo, René e Gabriel Freitas.

Aos professores do departamento, em especial ao meu orientador, professor Paulo C. M. de Carvalho, ao meu coorientador Fabrício G. Nogueira, e ao professor Bismark C. Torrico, pela colaboração com a instalação do projeto, pelo acolhimento recebido ao ingressar no programa, pelo direcionamento com a linha de pesquisa, pela orientação, alinhamento de ideias desenvolvidas no projeto e principalmente pelo conhecimento adquirido.

A necessidade é a melhor mestra e guia da natureza. A necessidade
é terna e inventora, o eterno freio e lei da natureza.

Leonardo da Vinci

RESUMO

A dessalinização por osmose reversa (OR) apresenta solução viável para regiões onde há pouca disponibilidade de água potável, com crescente aplicação em regiões semi-áridas, como o nordeste brasileiro. Diante deste contexto, a presente dissertação apresenta o desenvolvimento, instalação e identificação do modelo matemático de um sistema de dessalinização por osmose reversa. A estrutura da planta em alumínio modular possui dimensões de 1,45m x 1,00m x 0,48m, garantindo flexibilidade na instalação e facilidade de manuseio e configuração da mesma. Os dispositivos que compõem o sistema são; duas bombas hidráulicas do tipo diafragma, um conjunto de pré-filtragem, sensores de pressão e vazão, sistema de aquisição de dados de interface homem máquina (IHM), um par de membranas de dessalinização por osmose reversa posicionadas em série, realizando processador com e sem realimentação. Para verificar o desempenho do método de dessalinização, foi realizado três ensaios com diferentes níveis de sólidos totais dissolvidos (STD) para a água de alimentação, tanto para o sistema com e sem realimentação, mas em condições iguais de operação. O primeiro ensaio, com 2.300 mg/L, nível de água salobra, o segundo ensaio, também com água salobra, com 3.900 mg/L, e terceiro ensaio foi realizado com nível de STD de água salina, 5.130 mg/L. A configuração com realimentação apresentou melhor desempenho na redução de STD e na quantidade de permeado do que com realimentação, mas só foi possível obter água potável no processo com realimentação com 2.300mg/L de água de alimentação, os outros ensaios realizaram retirada de mais de 50% da quantidade inicial, mas ainda imprópria para consumo. À medida que a salinidade aumentou, a pressão nominal de 50 psi, apresentou-se deficiente para realizar a redução de STD. Com um único ensaio coletou-se um conjunto de dados para identificar, e outro conjunto de dados para validar o modelo estimado. Realizou-se a identificação através do método de mínimos quadrados não recursivo, obtendo-se quatro modelos ARX, de 1ª, 2ª, 3ª e 4ª ordem. Após identificação dos modelos, foi realizada a validação através de simulação e análise de ruídos, o modelo 1ª ordem apresentou desempenho de 68,92%, o de segunda ordem de 72,8%, o de 3ª ordem de 74,6% e o de 4ª ordem 73,3%. Dessa forma, nota-se que o modelo de 3ª ordem foi o que melhor descreveu o sistema de dessalinização OR desenvolvido.

Palavras chave: Dessalinização por Osmose Reversa; Modelagem de sistemas reais; Método mínimos quadrados não recursivo; Acionamento fotovoltaico.

ABSTRACT

The reverse osmosis desalination (OR) presents a viable solution for regions where there is little availability of potable water, with increasing application in semi-arid regions, such as northeastern Brazil. In this context, this dissertation presents the development, installation, and identification of the mathematical model of a reverse osmosis desalination system. The plant structure in modular aluminum has dimensions of 1.45m x 1.00m x 0.48m, ensuring flexibility in the installation and ease of handling and configuration. The devices that compose the system are; two hydraulic diaphragm pumps, a pre-filtration assembly, pressure and flow sensors, human-machine interface (HMI) data acquisition system, a pair of reverse osmosis desalination membranes positioned in series, performing processing with and without feedback. To verify the performance of the desalination method, three trials with different levels of total dissolved solids (TDS) for the feed water were conducted for both the system with and without recirculation, but under equal operating conditions. The first trial, with 2,300 mg/L, brackish water level, the second trial, also with brackish water, with 3,900 mg/L, and the third trial was performed with saline water STD level, 5,130 mg/L. The configuration with feedback showed better performance in reducing STD and in the amount of permeate than with feedback, but it was only possible to obtain potable water in the process with recirculation with 2,300mg/L of feed water, the other trials performed removal of more than 50% of the initial amount, but still unsuitable for consumption. As the salinity increased, the nominal pressure of 50 psi was insufficient to achieve STD reduction. A single trial collected one set of data to identify, and another set of data to validate the estimated model. The identification was performed through the non-recursive least squares method, obtaining four ARX models, of 1^a, 2^a, 3^a, and 4^a order. After identifying the models, validation was performed through simulation and noise analysis. The 1^a order model presented a performance of 68,92%, the 2^a order model 72,8%, the 3^a order model 74,6%, and the 4^a order model 73,3%. Thus, it is noted that the 3^a order model was the one that best described the developed RO desalination system.

Keywords: Reverse Osmosis Desalination; Real System Modeling; Non Recursive Least Squares Method; Photovoltaic Drive.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos de osmose, equilíbrio osmótico e osmose reversa.....	23
Figura 2 – Estrutura interna da membrana em espiral.....	25
Figura 3 – Estrutura interna da membrana em fibra oca	25
Figura 4 – Diagrama de bloco de realimentação único estágios	26
Figura 5 – Diagrama de bloco de realimentação com dois estágios.....	26
Figura 6 – Diagrama de blocos de realimentação com dois estágios 2:1	27
Figura 7 – Metodologia de identificação de sistemas.....	28
Figura 8 – Diagrama de blocos do modelo ARX	29
Figura 9 – Perfil de alumínio (A) Mesa de Corte (B).....	33
Figura 10 – Corte do acrílico (A) Peça de Acrílico (B).....	34
Figura 11 – Planta de Dessalinização por Osmose Reversa.....	35
Figura 12 – Diagrama simplificado do sistema	36
Figura 13 – Diagrama eletro eletrônico	37
Figura 14 - Bomba Schurflo 8000	38
Figura 15 – Sistema de Pré-filtragem	40
Figura 16 – Cartuchos com Membranas Dow Filmtec 100 GPD TW30-1812-100.....	42
Figura 17 – Sensor de vazão SU7000.....	43
Figura 18 – Sensor de pressão PN 2024	44
Figura 19 – Placa de aquisição de dados USB 6001	45
Figura 20 – Interface IHM – Labview	46
Figura 21 – Linguagem G.....	46
Figura 22 – Condutivímetro	47
Figura 23 – Sinal de onda quadrada para excitação do sistema	52
Figura 24 – Resultado do ensaio de aquisição de dados utilizados para fins de identificação.....	52
Figura 25 – Resultado dos dados processados para identificação e validação	53
Figura 26 – Mapa de polos e zeros.	55
Figura 27 – Validação do modelo de 4ª ordem	56
Figura 28 – Análise de resíduos do modelo de 4ª ordem	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1– Contribuição dos processos de dessalinização na produção mundial de água	16
Gráfico 2 – Desempenho das Membranas Dow Filmtec 100 GPD TW30-1812-100....	42
Gráfico 3 – Variação da vazão de acordo com índice de STD na água de alimentação	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação da água de acordo com STD.....	24
Tabela 2 – Parâmetros da Bomba Shurflo 8000	39
Tabela 3 – Desempenho da Bomba Schurflo 8000	39
Tabela 4 – Parâmetros de funcionamento Dow Filmtec 100 GPD Tw30-1812-100.....	41
Tabela 5 – Escala de medição do condutivímetro.	47
Tabela 6 – Valores médios das medições de tensão, corrente e pressão nas bombas. ...	48
Tabela 7 – Desempenho do sistema sem realimentação.....	49
Tabela 8 – Desempenho do sistema com realimentação	50
Tabela 9 – Polos do modelo de 1 ^a ordem.	54
Tabela 10 – Polos do modelo de 2 ^o ordem	54
Tabela 11 – Polos do modelo de 3 ^o ordem	55
Tabela 12 – Polos do modelo de 4 ^o ordem	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica;
AI	Analog input (entrada analógica);
ANA	Agência Nacional de Águas;
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica;
ANSI	<i>American National Standards Institute</i> ;
AO	<i>Analog output</i> (saída analógica);
ARX	<i>Autoregressive with exogenous input</i> (auto regressivos com entradas exógenas);
CC	Corrente Contínua;
DIO	<i>Digital input output</i> (saída e entrada digital);
DMC	<i>Dynamic Matrix Control</i> (controle de matriz dinâmica);
DMF	Múltiplos Estágios Flash
FV	Fotovoltaica
FVOR	Osmose Reversa Acionada por Energia Fotovoltaica;
GPAP	Grupo de Pesquisa em Automação e Robótica;
IDA	<i>International Desalination Association</i> ;
IHM	Interface Homem-Máquina;
LEA	Laboratório de Energias Alternativas;
DME	Destilação Múltiplos Efeitos;
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (rastreamento do ponto de máxima potência);
MEF	Múltiplos estágios flash;
NSF	<i>National Science Foundation</i> ;
OD	Osmose Direta;
OR	Osmose Reversa;
PI	Proporcional Integrativo;
PRBS	<i>Pseudo-Random Binary Signal</i> (sinal binário pseudo-aleatório);
SISO	<i>Single Input Single Output</i> (sistema com única entrada e única saída);
STD	Sólidos Totais Dissolvidos;

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
bit	Dígito binário
pH	Potencial Hidrogiônico
mg/L	Parte por milhão
Vcc	Tensão em corrente contínua
$\mu\text{s/cm}$	Micro-siemens por centímetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivo geral	17
1.3	Objetivos Específicos	17
1.4	Estrutura da dissertação	17
2	ESTADO DA ARTE DA DESSALINIZAÇÃO	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1	Osmose reversa	23
3.2	Identificação e validação de sistemas	27
3.3	Modelos ARX	28
3.4	Métodos dos mínimos quadrados não-recursivos	29
3.5	Validação de modelos	32
4	METODOLOGIA	33
4.1	Estrutura mecânica e tanques	33
4.2	Descrição geral da planta de dessalinização	35
4.3	Bombas	37
4.4	Filtros	39
4.5	Membranas	41
4.6	Sensores	43
4.7	Placa de aquisição de dados	44
4.8	Interface gráfica de operação e aquisição de dados	45
4.9	Conduvíméto	46
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	48
5.1	Ensaio de validação do funcionamento da planta	48
5.2	Identificação de modelos dinâmicos	51
5.2.1	<i>Aquisição de dados</i>	51
5.2.2	<i>Identificação de modelos da malha de pressão de entrada das membranas</i>	53
5.2.3	<i>Validação dos modelos</i>	56
6	CONCLUSÕES	58
	ARTIGOS PUBLICADOS DURANTE O MESTRADO	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O Brasil, apesar de ter disponibilidade de 12% da água doce do planeta, apresenta uma distribuição heterogênea. De acordo com Agência Nacional de Águas (ANA), 80% da quantidade de água encontra-se na região Norte do país, a qual abriga somente 5% da população (ANA, 2017). Por outro lado, na região semiárida, próxima ao Oceano Atlântico, estima-se que esteja 45% da população, com 3% da água disponível no país, dos quais o

O histórico de secas no semiárido é um fenômeno recorrente na região que independe da interferência do homem, apesar do desmatamento da vegetação original intensificá-lo. Têm-se que o primeiro relato de seca na região foi verificado em 1587 (PAD,2012). Longos períodos de secas foram observados a cada 100 anos, as mesmas com duração em torno de 18 e 20 anos, geralmente seguidos por períodos com alto índice pluviométrico. Mesmo em curto período de tempo, como em um ano, é possível observar que a distribuição de chuvas ocorre de forma irregular na região (MARENGO,2006).

Independente das singularidades regionais, como clima, litologia e solo, a intervenção humana com o desenvolvimento industrial, crescimento populacional e do setor agrícola têm causado grande demanda de água potável. Desta forma, faz-se necessária a intervenção de políticas públicas que proporcionem a adaptação da população, garantindo acesso à água potável, tal como ocorre em regiões com características similares ou em situação de escassez.

A dessalinização como forma de remediar a ausência de água potável, é um método que vem sendo utilizado em todo mundo. De acordo com a atualização da *International Desalination Association* (IDA), em 2019 um total de 174 países utilizam alguma tecnologia de dessalinização, com capacidade instalada acumulada de reutilização de 146 milhões de m³/dia. Ao todo, mais de 300 milhões de pessoas ao redor do mundo dependem de água dessalinizada para suprir suas necessidades diárias totais ou parciais.

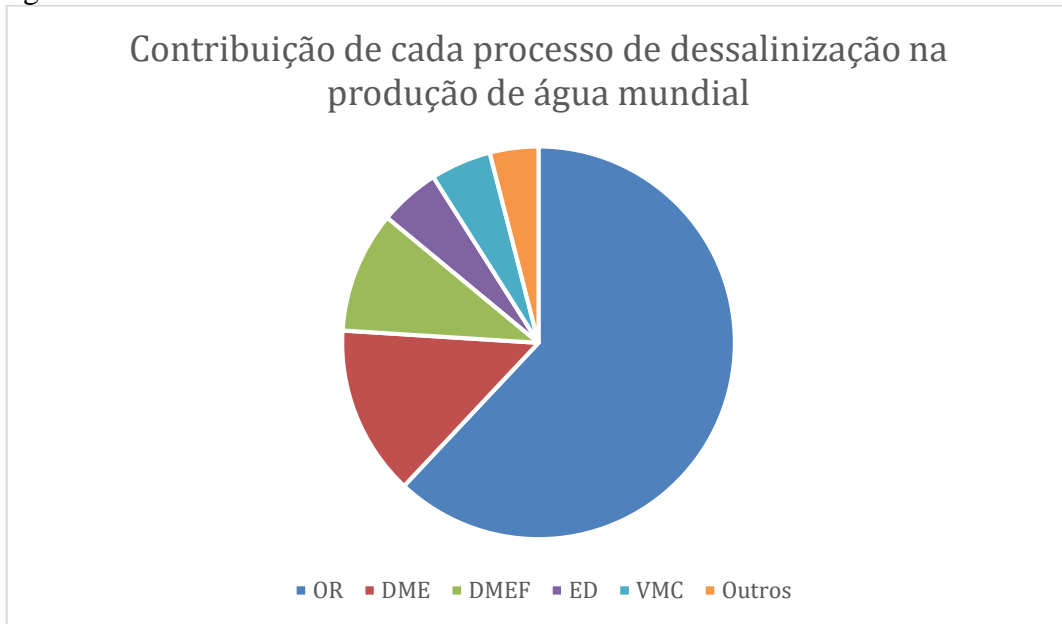
O Ministério do Meio Ambiente classifica a potabilidade da água através de diversos parâmetros, dentre eles, físicos (turbidez, cor, temperatura, condutividade), organolépticos (odor e sabor), químicos, microbiológicos e hidrobiológicos. Esta dissertação levará em consideração a condutibilidade da água, o que significa que o processo desenvolvido, trata-se da redução da quantidade de sólidos totais dissolvidos (STD). É considerada salina, a água com quantidade igual ou superior a 30% de STD geralmente em mares e oceanos, com valores superiores a 5.000 mg/L. Em águas de poços ou subterrâneas, pode-se encontrar água salobra,

assim classificada por possuir entre 0,5% e 30% de salinidade e valores entre 1500 mg/L e 5.000 mg/L. A água doce, que é considerada ideal para consumo humano, possui salinidade inferior a 0,5%, com valores iguais ou inferiores a 500 mg/L. (CONAMA- Resolução 357/2005).

Para realizar a retirada de sais e impurezas da água e torná-la potável, diversos métodos de dessalinização são aplicados atualmente. Tais métodos classificam-se em: evaporação/condensação podendo ser por processos mecânicos ou térmicos, filtração e cristalização. Os primeiros métodos foram desenvolvidos no século XVIII e a dessalinização era realizada por máquinas a vapor no setor militar dos navios reais, no Reino Unido, e só a partir do século XX iniciou-se o uso da dessalinização destinada ao uso civil. Atualmente a água dessalinizada é obtida de diversas formas, a escolha do método depende de diversos fatores, como local de instalação, qualidade da água utilizada, finalidade da água dessalinizada, disponibilidade energética no local, possibilidade de utilizar fontes renováveis para realizar o processo. (Curto, D et al. 2021)

Dentre os métodos mais utilizados no meio comercial, destacam-se a dessalinização por membranas de osmose reversa e a destilações térmicas, como múltiplos estágios flash (DMEF) e destilação múltiplos efeitos (DME), como pode-se ver no Gráfico 1. Há ainda, métodos em processo de desenvolvimento, dentre os quais destacam-se, congelamento, umidificação e desumidificação, dessalinização à base de hidrato de gás, destilação por membrana e deionização capacitiva. Apesar de singulares, todos os métodos necessitam de pré-filtragem, responsável pela maior eficiência do procedimento, e que depende tanto do nível de qualidade da água utilizada quanto do destino final da água processada pela dessalinização. Mesmo com a crescente inovação de técnicas, a osmose reversa domina o setor de dessalinização desde os anos 90, momento no qual ultrapassou a destilação de múltiplos estágios, e apesar de todas as propostas estarem em constante desenvolvimento, esta apresenta crescimento acelerado se comparada às demais, tanto em publicações quanto em instalações, até o presente momento, segundo Eke, et al. (2020).

Gráfico 1– Contribuição dos processos de dessalinização na produção mundial de água



Fonte: Alkaisi et al (2017)

A eficiência de processos de dessalinização baseados em OR tem forte dependência com as condições de temperatura e pressão de operação. A temperatura é determinada pelo meio ambiente, enquanto a pressão de operação pode ser controlada pelo uso de bombas e válvulas em conjunto com sistemas de controle automático. Os valores de pressão adequados dependem do tipo de membrana de OR utilizada, sendo estabelecidos em documentação disponibilizada pelo fabricante. Quando do uso de energias renováveis intermitentes para a alimentação de plantas de OR, os sistemas de controle para regulação de pressão se tornam ainda mais necessários.

Desta forma, estudos relacionados identificação e controle de sistemas de dessalinização são essenciais para uma operação segura e eficiente. Neste âmbito surgem vários desafios, dentre eles a dificuldade de se encontrar modelos matemáticos baseados em abordagem fenomenológica, na qual é necessário o conhecimento de valores de parâmetros físicos do sistema. Dentre as causas, pode-se listar a ocorrência de incertezas paramétricas e variação com o tempo dos componentes de uma planta de dessalinização por OR.

Uma alternativa interessante é o uso de técnicas de identificação de sistemas que permitem a obtenção de modelos através da coleta de dados de entrada e saída na planta real. Tais técnicas são definidas também como métodos caixa preta, onde parâmetros e equações físicas ficam implícitos no modelo. Um requisito para a obtenção de modelos é o uso de dados com significativa correlação entre entrada e saída.

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento e modelagem experimental de uma planta de dessalinização por OR piloto em escala de laboratório. A planta possui estrutura modular, com duas bombas de diafragma com acionamento CC, duas membranas OR, sistema de pré-filtragem e sistema de sensoriamento e instrumentação de pressão e vazão. Conta também com um sistema de aquisição de dados e interface IHM (interface homem-máquina) de operação.

A modelagem foi realizada através da abordagem de identificação experimental. Através dos modelos obtidos é realizada análise do comportamento dinâmico das diferentes malhas da planta de dessalinização OR desenvolvida.

1.2 Objetivo geral

O trabalho propõe o desenvolvimento, instalação e identificação de uma planta piloto de dessalinização por osmose reversa em escala de laboratório.

1.3 Objetivos Específicos

Este trabalho tem como principais objetivos específicos:

- Revisão e estudo sobre as tecnologias de dessalinização por osmose reversa;
- Instalação de estrutura mecânica de planta de dessalinização piloto, incluindo estrutura modular em alumínio e tanques em acrílico;
- Instalação de circuitos hidráulicos do sistema de dessalinização;
- Projeto de instalação de instalação elétrica e eletrônica da planta piloto;
- Realizar validação experimental de eficiência da planta;
- Realizar estudo e experimentos de modelagem da planta através de técnicas de identificação de sistemas;

1.4 Estrutura da dissertação

A introdução, no capítulo um, apresenta aspectos gerais e contextualização mundial e nacional sobre a necessidade da acessibilidade de água potável para toda população, direcionado à necessidade do estudo de métodos de dessalinização identificados matematicamente controlados a fim de otimizar o funcionamento da planta projetada. Seguido

dos objetivos, geral e específicos finalizando com a estrutura na qual a presente dissertação encontra-se dividida,

No capítulo dois, é apresentado o estado da arte da dessalinização, o surgimento da tecnologia, métodos de controle utilizados para otimizar o processo, e os projetos desenvolvidos na Universidade Federal do Ceará que foram motivação para o desenvolvimento da presente dissertação

O capítulo três, consiste no referencial teórico do método de dessalinização OR, onde são apresentadas nomenclaturas, métodos e descrição do funcionamento da dessalinização OR. Como também é apresentado a teoria do modelo ARX, utilizado para representação do modelo matemático. Em seguida, é explicado o método de mínimos quadrados não recursivo para obter os parâmetros do sistema e seu modelo matemático, o qual foi escolhido a fim de minimizar os erros de estimação. Por fim, o capítulo apresenta o método de validação do sistema, que consiste em simulações e análise de ruídos.

A metodologia do trabalho, no capítulo quatro, é explicado o processo de instalação da planta. É relatado desde o processo de corte das peças da estrutura de alumínio, da chapa de acrílico para os tanques e dos canos e mangueiras para a tubulação. Apresenta-se também a parte eletrônica, placa de aquisição de dados, sensores e bombas de acionamento, finalizando o capítulo com a instalação e apresentação do sistema e suas particularidades.

O capítulo cinco discorre sobre os resultados, apresenta-se primeiramente a validação do método de dessalinização, onde são apresentados os resultados dos ensaios sem realimentação e com realimentação, realizando um comparativo entre os resultados. Em seguida, expõe-se resultado dos ensaios de identificação e validação, apresenta-se o modelo matemático desenvolvido a partir dos experimentos realizados na planta. Após resultado da identificação, apresenta-se o resultado dos ensaios de validação, tanto em simulação como análise de ruídos.

O capítulo seis apresenta conclusão geral, principais dificuldades superadas para instalação e implementação dos métodos aqui desenvolvidos. Em seguida, apresenta-se os trabalhos publicados em congressos e revistas científicas durante a trajetória do mestrado, referências bibliográficas.

2 ESTADO DA ARTE DA DESSALINIZAÇÃO

Diversos pesquisadores ao redor do mundo desenvolveram e continuam desenvolvendo trabalhos que abordam a dessalinização de água, trabalhos estes que foram fonte de curiosidade e conhecimento para a criação da presente dissertação. O capítulo atual, apresenta um breve histórico do surgimento da tecnologia, os mecanismos de dessalinização mais utilizados atualmente, com destaque para osmose reversa, o sistema eleito para estudo e criação aqui exposto, trabalhos de identificação, e controle realizados para utilizá-los, finalizando com os trabalhos realizados na Universidade Federal do Ceará.

O primeiro processo de dessalinização foi realizado nos navios reais do Reino Unido por volta do século XVIII, com o propósito de otimizar as navegações reduzindo a quantidade de água potável carregada durante o percurso através da destilação flash simples, que posteriormente deu origem ao atual modelo aprimorado de destilação multiestágio flash. Curto et al. (2021). Segundo Weir (2008), ao longo dos anos a dessalinização foi sendo adaptada de acordo com as necessidades da humanidade, utilizadas tanto em momentos de guerra quanto em locais com pouca disponibilidade de água potável, utilizando principalmente separações térmicas.

A técnica de dessalinização por OR foi desenvolvida observando processo natural de osmose em membranas, os primeiros estudos ocorreram nos Estados Unidos no ano de 1959 na universidade da Califórnia e Universidade da Flórida pelos pesquisadores Sidney Loeb e Srinivasa Sourirajan. A planta piloto foi instalada em 1965 com capacidade de 19 m³/dia, posteriormente, em 1977 uma unidade municipal com capacidade de 11,350 m³/dia, segundo Rognoni et al (2010).

Alatiqi (1989) realizou identificação de um sistema de OR através de uma planta piloto conseguiu estabelecer um modelo dinâmico e relacionar entradas e saídas. Com ganho relativo e teste de controlabilidade para encontrar emparelhamentos e estrutura, e através das configurações de Zeigler-Nichols concebeu controladores para sistemas de uma entrada e uma saída (SISO) em malha aberta, e para o sistema multivariável, aplicou método de ajuste. Realizando assim o rastreamento do ponto de ajuste e controlando a pressão de alimentação e pH através de simulações.

A fim de manter estável a pressão nominal e tornar o processo mais eficiente e preservar as estruturas filtrantes, Abbas (2006), utilizou o *Dynamic Matrix Control* (DMC) em membranas de fibras ocas, através de dois casos, o primeiro, o fluxo de permeado foi controlado com manipulação da pressão de alimentação e o segundo caso, multivariável, tanto o fluxo de

permeado quanto a condutividade (uma medida de qualidade) foram controlados por ajuste de pressão de alimentação e pH, obtendo desempenho melhor que controladores proporcionais integrativos (PI), mantendo um bom controle mesmo para grandes mudanças, $\pm 30\%$, no ganho relativo ao fluxo do produto à pressão de alimentação.

Bartman (2009) propõe algoritmos de controle preditivo em plantas de OR de alta capacidade que utilizam o fluxo reverso para evitar acúmulo de resíduos na superfície da membrana. Para esse feito, a vazão inversa da unidade deve ser cuidadosamente reduzida para preservar as membranas. Com função de custo formulada para transição entre fluxo normal e alto em um ponto estacionário de operação. Foram realizadas simulações em malha aberta e fechada, nas quais demonstrou estratégias de controle não lineares de um modelo preditivo que induziram a transição dos estados de alto fluxo para os estados de baixo fluxo de uma forma otimizada.

Sobana (2014) implementou controle baseado em modelo de simulação do processo de dessalinização OR para controlar as entradas de pressão de alimentação e relação de realimentação. Foi adotado duas estratégias de controle, método do modelo interno e proporcional integrativo. Foi estimado as equações de continuidade do modelo, e ambos apresentaram resultados satisfatórios. Os dois controladores foram comparados usando o critério de índice de desempenho integral de erro absoluto. Os valores de permeado e fluxo de permeado aumentaram 10% mesmo para um aumento de 10% de STD.

Em Puch (2017) é apresentado um controlador robusto projetado para lidar com grandes paramétricas e incertezas dinâmicas não modeladas de uma planta de dessalinização OR, sujeitos a ruídos de medição e perturbações externas, como golpes de aríete. A validação é realizada através de resultados de simulação computacional. O resultado da simulação mostra que o controlador desenvolvido pôde lidar com as incertezas paramétricas e não modeladas, perturbações, ruídos de sensores em plantas reais, atenuando 58% das ondas de pico de pressão causadas pelo golpe de aríete, regulando o desempenho do sistema em curto período de tempo de 2 segundos.

Estudo mais recentes realizado, Eldin, et al (2019), buscou otimizar uma planta de dessalinização OR alimentada por energia híbrida, o trabalho investigou sob diferentes condições de trabalho, o consumo específico de energia e custo de operação de água. Para isto, a frequência do motor da bomba de alta pressão foi ajustada de 35 para 50 Hz, além disso, a também da variação de temperatura da água de alimentação e válvula de controle de concentrado eram ajustadas. Dessa forma, o consumo específico de energia e custo de operação

de água foram encontrados em valores ótimos em 45Hz, 40°C e 25% de abertura das válvulas de controle, resultando em 4,5kWh/m³ e 0,55\$/m³.

Em estudo mais direcionado ao cenário brasileiro, Silva (2018) realizou análises de custo relacionadas com a implementação da dessalinização por osmose reversa para quatro todos com diferentes taxas de importação, considerando três fontes de energia. Os resultados do estudo demonstraram maior viabilidade na implementação de osmose reversa quando se utiliza gás natural para gerar energia elétrica para acioná-la, dado que os custos de produção de fluxo para esta tecnologia estavam entre 0,88 e 1,97 USD/m³. No entanto, a análise do cenário de importação indicou uma grande necessidade de incentivos públicos para criar uma tecnologia nacional de dessalinização.

Além destes mencionados, os trabalhos desenvolvidos anteriormente na Universidade Federal do Ceará no Laboratório de Energias Alternativas (LEA), foram base para a elaboração da presente dissertação. A ideia a princípio idealizada por Montenegro (2004), realizou estudo pioneiro, onde combinou tecnologia OR e FV para abastecer uma comunidade rural no semi-árido brasileiro com água potável. Através de duas estratégias foi escolhida a melhor alternativa para cenário determinado, entre acionamento fotovoltaico equipada com motor DC, e equipado com motor trifásico, a análise de dados comprovou que o trifásico apresentou consumo elétrico específico (quantidade de energia para gerar 1 m³ de água potável) de 303 kW h m³, uma taxa de recuperação de 27% e um custo de água potável de US \$1276 por m³.

Riffel (2005) analisou a interação entre a tecnologia FV e a osmose reversa sem uso de baterias. Para isto, instalou uma planta de dessalinização por OR acionada por energia solar fotovoltaica sem uso de baterias, dessa forma, o projeto obtinha redução de custos da necessidade de manutenção, em contrapartida, a unidade estava sob as incertezas da radiação solar e temperatura ambiente. Dois sistemas foram modelados matematicamente, um com o motor bomba ligado direto a dois módulos e outro com três módulos e um conversor CC-CC abaixador com seguidor de potência máxima. Todas as simulações realizadas, comprovaram a vantagem do segundo modelo, destacou-se ainda que um com aumento da capacidade em geração de 50% melhorou mais que 90% a eficiência da unidade instalada,

Sampaio (2011), desenvolveu um estudo com e sem baterias de apoio, com opção de mudar a configuração energética por meio das conexões dos armazenadores de energia, com acréscimo ou diminuição na quantidade de placas FV, foi avaliado também a operação para diferentes níveis de salinidade. Com o comparativo realizado entre a unidade instalada e diversas outras instaladas pelo mundo, Sampaio concluiu que a configuração de melhor investimento é a sem conexão de banco de baterias e com ligação direta em três painéis FV,

obtendo assim 175 litros a 324,60 mg/L, consumindo 3,12kWh/m³ e um custo competitivo de 18,37 R\$/m³.

Posteriormente, Mendonça (2016) propôs que os módulos da planta possuíssem seguimento de potência máxima (MPPT) e válvula auto reguladora de pressão. A técnica foi simulada e apresentou uma eficiência de 86,8% no seguimento de potência máxima. A planta de OR foi testada com e sem válvula auto-reguladora de pressão, ambas com água de alimentação de 1000 e 1500 mg/L. Sem a válvula obteve-se taxa de recuperação de 8,03%, produzindo 151,7L/dia com STD de 130 mg/L e consumo de 2,68 kWh/m³. Com a válvula, obteve-se 175,3 L/dia, com 130 mg/L de STD consumindo 2,56kWh/m³.

Por fim, Araújo (2018) apresentou modelagem, linearização e controle do sistema FVOR, de um modelo não linear, o qual foi obtido na forma de espaço de estados, linearizado em torno de uma região de operação, e o controlado através de alocação de polos via espaço de estados. Com a aplicação da estratégia de controle, realizou testes de validação do modelo linear e não-linear, através disso, confirmou a rapidez, a amplitude do sinal de erro em estado estacionário nula e eficácia de resposta ao segmento de referência e rejeição de distúrbios. Obtendo assim resposta de controle com tempo de assentamento de 2 segundos.

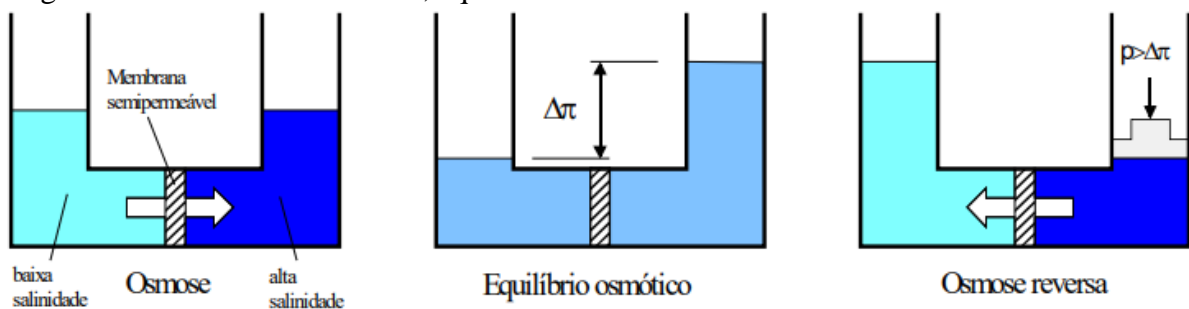
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Osmose reversa

A OR, como o próprio nome sugere, é o processo inverso ao que ocorre naturalmente em meios aquosos com níveis de salinidade distintos. Ao encontrarem-se separados por uma membrana semipermeável, ambientes com alta salinidade e baixa salinidade, chegam ao equilíbrio através da passagem da água até atingirem pressão osmótica estável ($\Delta\pi$), Riffel (2005), como pode ser visto na Figura 1.

Para realizar a dessalinização, é necessária uma pressão superior à pressão osmótica em equilíbrio que force o fluxo contrário, fazendo com que a água seja direcionada do meio mais concentrado para o menos concentrado, resultando em um lado com rejeito, com alto valor de sólidos totais dissolvidos (STD), e outra de permeado, com elevado grau de pureza, ambos de acordo com o grau de rejeição da membrana utilizada, Mendonça (2016).

Figura 1 – Processos de osmose, equilíbrio osmótico e osmose reversa



Fonte: Riffel (2005).

Para melhor compreensão do processo de dessalinização, é necessário apresentar a nomenclatura utilizada no presente trabalho;

- Água de alimentação: água utilizada na dessalinização antes de passar pelo sistema.
- Permeado: porção de água de alimentação, que após passar pelas membranas de OR, possuem concentração de STD.
- Concentrado: porção da água de alimentação, que após passar pelas membranas de OR, possuem maior concentração de STD.
- Taxa de recuperação: proporção do fluxo de permeado para fluxo de água de alimentação (eficiência).

- Sistemas em série: conjunto modulares, podendo ser interconectados em diversos estágios em série.

Dependendo da origem da água de alimentação, pode-se encontrar com diferentes graus de impurezas, desde sólidos suspensos, como também matéria orgânica, inorgânica. Dentre os mais comuns são, sódio, cálcio, potássio, fosfatos e nitratos, Stoughton (2013), é possível ver a classificação de STD na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação da água de acordo com STD.

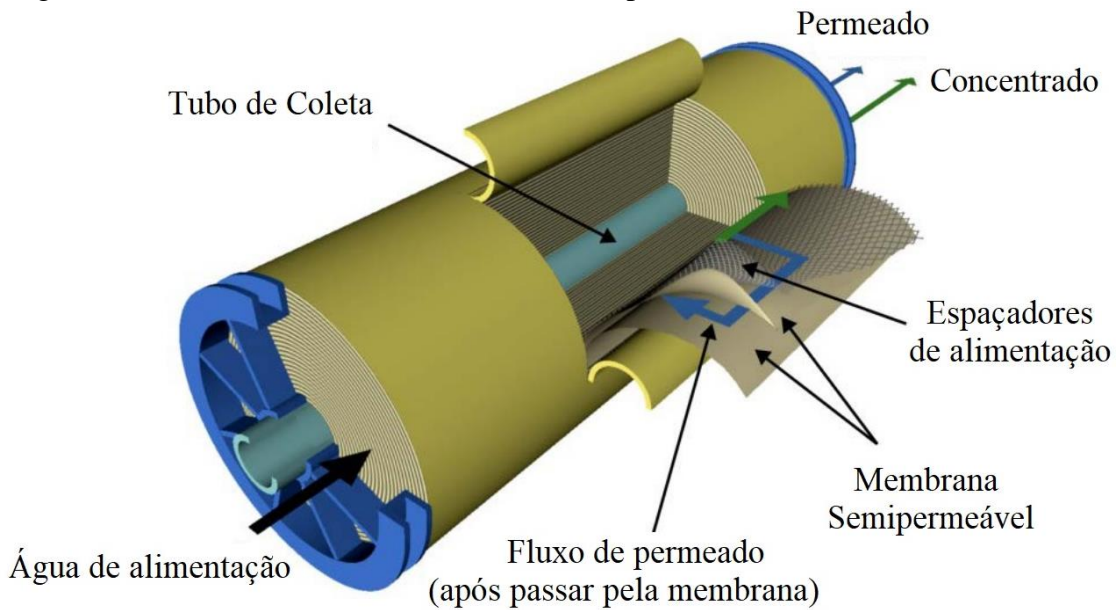
Classificação da água	STD (mg/L)
Água potável	< 500
Água doce (não tratada)	< 1.500
Água salobra	1.500 – 5.000
Água salina	> 5.000

Fonte: Stoughton (2013)

A literatura segundo Stoughton et al. (2013) apresenta duas constituições mais comuns de osmose reversa, são em acetato de celulose e em compósitos de filme fino, podem ser também em formato espiral ou fibra oca, o que influencia na eficácia do sistema. As membranas de acetato possuem grande tolerância aos produtos oxidantes, como cloro, mas podem ser vulneráveis à compactação, conseqüentemente não é recomendada para situações de alta pressão, o fluxo de água pode ser prejudicado. As membranas de filme fino não são tão tolerantes com cloro, mas suportam produtos químicos agressivos, amplas faixas de pH e são menos suscetíveis à compactação, sua vazão também é maior devido as finas espessuras.

As membranas em espiral, Figura 2, possui filmes enrolados em torno do tubo pelo qual coleta-se o permeado, deixando com que o concentrado seja forçado para fora do tubo central. Possuem densidade volumétrica de 700 a 1.000m²/m³, são os mais utilizados para aplicações de alta filtração Alfradique, et al (2018).

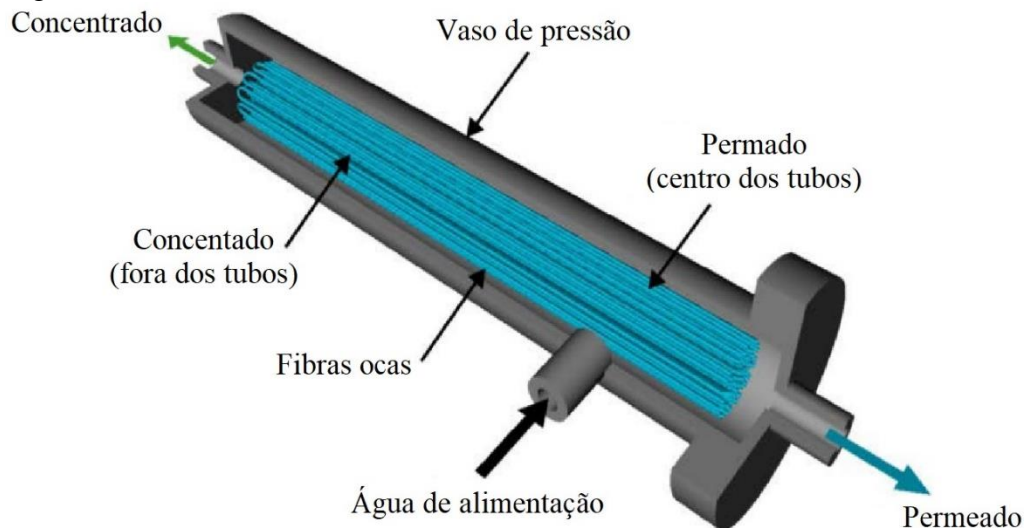
Figura 2 – Estrutura interna da membrana em espiral



Fonte: Stoughton, et al (2013)

As membranas em fibra oca, consistem em pequenos tubos de membranas semelhantes a cabos alocados em um vaso de pressão Stoughton, et al (2013). O permeado é coletado no centro oco das fibras e o concentrado na parte de externa das fibras contidas pelo invólucro do cartucho, como pode-se ver na Figura 3.

Figura 3 – Estrutura interna da membrana em fibra oca



Fonte: Stoughton, et al (2013)

Além da estrutura interna da membrana, outro fator de grande impacto na qualidade final da água permeada, é a configuração na qual as membranas e filtros encontram-se dispostos e se ocorre ou não a realimentação, seja do permeado ou do concentrado. Destaca-se as

conexões de único estágio, dois estágios, passagem única e de duas passagens, que são selecionadas a depender do grau de pureza requerido Stoughton et al. (2013). O processo de realimentação de estágio único, Figura 4, no qual parte da saída do concentrado retorna para água de alimentação reaproveitando parte do que seria descartado, esse método apresenta uma taxa de recuperação de até 50%.

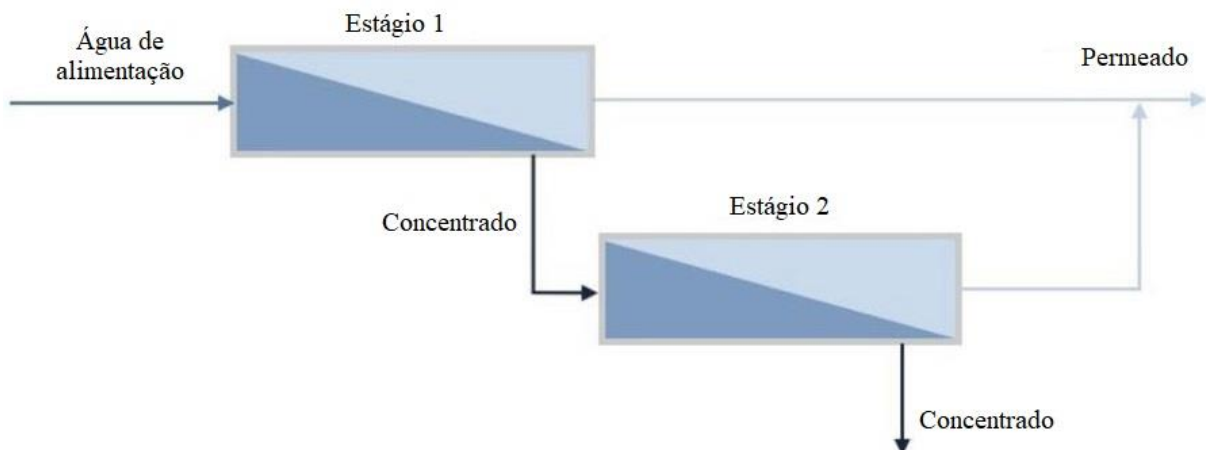
Figura 4 – Diagrama de bloco de realimentação único estágios



Fonte: Matten (2021)

De acordo com Matten (2021) o processo realimentação de dois estágios, como pode se ver na Figura 5, é utilizado para aumentar ainda mais a taxa de recuperação, dessa forma, o concentrado resultante do primeiro estágio, é utilizado como água de alimentação para o segundo estágio, essa configuração proporciona uma taxa de recuperação entre 75-80%.

Figura 5 – Diagrama de bloco de realimentação com dois estágios

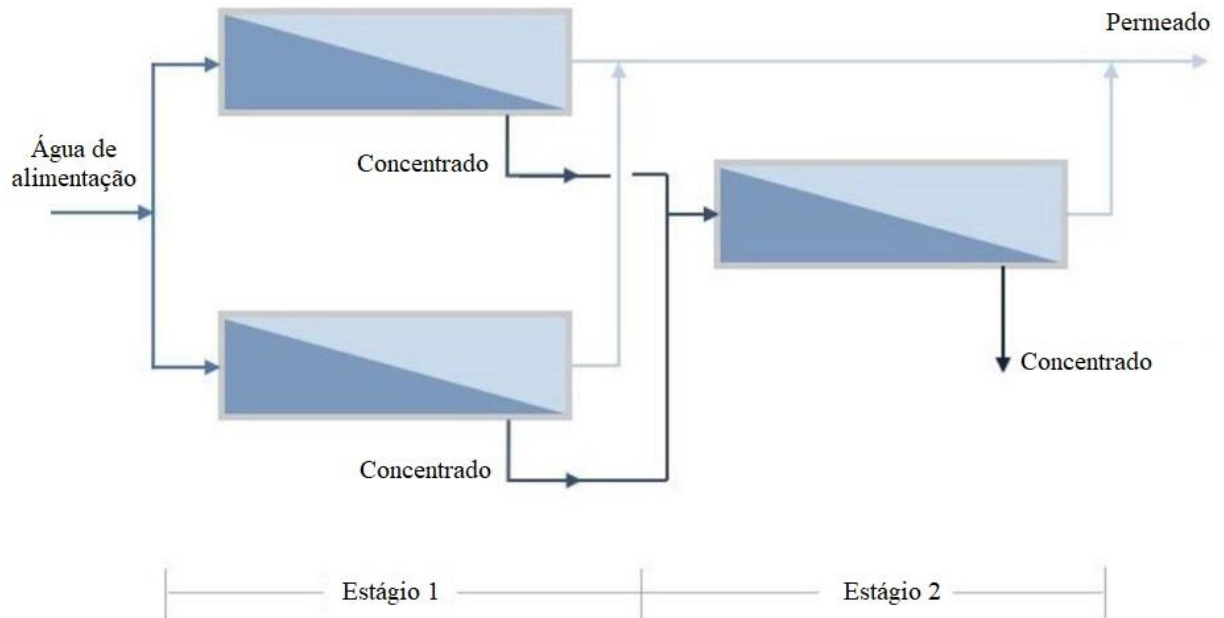


Fonte: Matten (2021)

Uma outra possibilidade com dois estágios, é a configuração 2:1, Figura 6 essa configuração reaproveita o concentrado de duas membranas, que inicialmente estão conectadas em paralelo e recebem a mesma água de alimentação inicial, e que a saída de concentrado de ambas, estão conectadas em série com uma terceira membrana, a qual utiliza o concentrado do

primeiro estágio como água de alimentação, esse método pode até ultrapassar os 90% da taxa de recuperação, Matten (2021).

Figura 6 – Diagrama de blocos de realimentação com dois estágios 2:1



Fonte: Matten (2021)

3.2 Identificação e validação de sistemas

A identificação de um modelo pode ser realizada por modelos paramétricos, que são formados por parâmetros tais como equações de estados, funções de transferência ou os coeficientes de uma equação de diferenças. Como também pode ser realizada pelo método não-paramétrico, que são representações gráficas que descrevem a dinâmica do sistema, como resposta ao impulso ou a resposta em frequência.

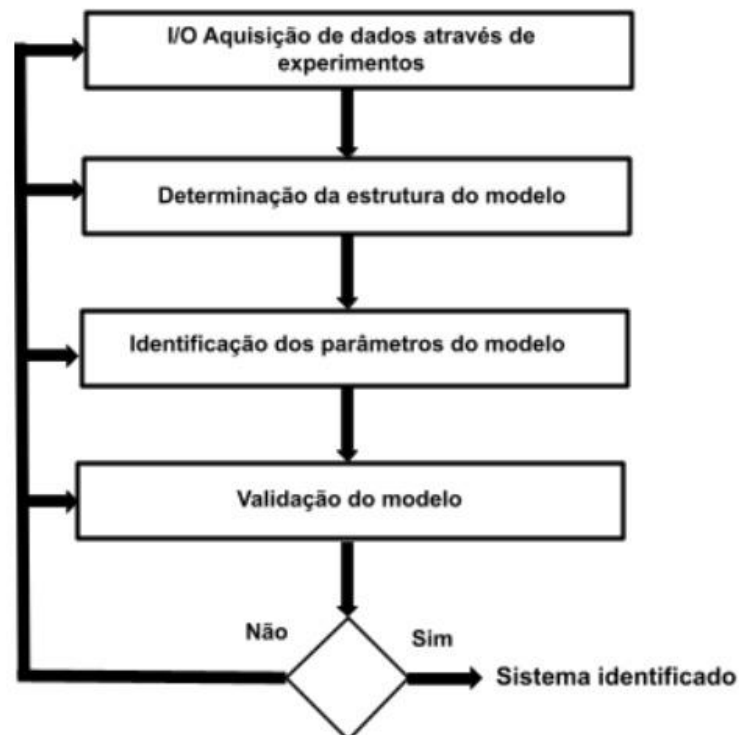
Para identificar um sistema paramétrico e garantir qualidade da estimação, realiza-se primeiramente a aquisição dos dados de entrada e saída, determinar variáveis a serem controladas, níveis de amplitude, tipo de aplicação, determinar sinal de excitação adequado para os níveis de funcionamento ideal da planta.

Aplicações práticas, como a desenvolvida na presente dissertação, habitualmente apresentam comportamentos não lineares, tais processos causam deslocamento do ponto de operação ideal, para isto, utilizou-se o estimador de mínimos quadrados com propósito de manipular as medidas de entrada e saída de forma não-interativa por meio de algoritmos não-recursivos.

Após a coleta de dados e determinadas as particularidades do sistema, realiza-se a escolha do modelo de ruído responsável pela excitação do sistema, para o tipo de modelagem realizado. O ruído é determinado a partir do tempo de amostragem do sistema, este por sua vez é estipulado através do teorema de Nyquist o qual diz que a taxa de amostragem deve ser pelo menos duas vezes a maior frequência contida no sinal a ser amostrado.

O sinal de excitação utilizado durante a aquisição de dados de entrada e saída deve ter potência espectral uniforme em uma determinada faixa de frequências entre o modo dominante de uma faixa finita de frequência do sistema. Para modelagem da planta de dessalinização, foi utilizado sinal PRBS, que possui características aleatórias com intensidades em diferentes frequências, garantindo-lhe uma densidade espectral de potência constante além da frequência, é importante que amplitude do sinal de entrada seja menor possível que resulte em uma relação sinal-ruído aceitável. A metodologia simplificada utilizada para identificação é apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Metodologia de identificação de sistemas



Fonte: O próprio autor

3.3 Modelos ARX

A identificação paramétrica consiste em ajustar os valores dos parâmetros de um modelo até que sua resposta se aproxime da resposta de um sistema real, quando esse modelo

é estimado em torno de um ponto de operação com dados amostrados. Pode-se utilizar um modelo linear discreto, tal como o modelo auto-regressivo com entradas externas (ARX) apresentado na equação (3.1) expresso no domínio do tempo discreto, segundo Aguirre (2014):

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + v(k) \quad (3.1)$$

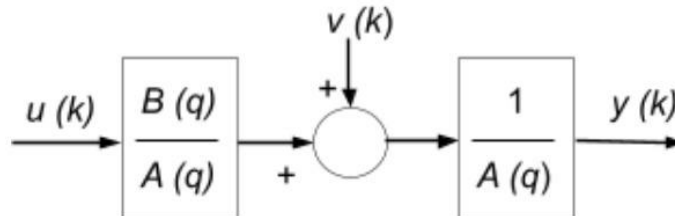
Onde q^{-1} é o operador de atraso, $A(q)y(k)$ é parte auto-regressiva, $B(q)u(k)$ a parte exógena, $y(k)$ a saída do sistema, $u(k)$ a entrada do sistema e $v(k)$ o ruído de caráter aleatório. Os polinômios $A(q)$ e $B(q)$ são apresentados nas equações (3.2) para $A(q)$ e (3.3):

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_n q^{-na} \quad (3.2)$$

$$B(q) = b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{nb} q^{-nb} \quad (3.3)$$

Onde a_1, \dots, a_{na} e b_1, \dots, b_{nb} são os parâmetros do modelo a serem identificados e n_a e n_b são as constantes que definem respectivamente a ordem dos polinômios $A(q)$ e $B(q)$. O modelo ARX por ser representado na forma de diagrama de blocos conforme a Figura 8.

Figura 8 – Diagrama de blocos do modelo ARX



Fonte: O próprio autor.

3.4 Métodos dos mínimos quadrados não-recursivos

Segundo Coelho (2014), o método dos mínimos quadrados é um dos mais utilizados no campo das ciências exatas, e tem sua origem nos trabalhos astronômicos de Gauss, no qual destaca-se a relevância do número de observações necessárias para determinação dos parâmetros desconhecidos a fim de garantir que a diferença entre observação e modelo estimado seja mínima. Através desse conjunto de dados medidos, é possível obter os valores de parâmetros ótimos através de uma função determinada utilizando o método de mínimos quadrados.

Sendo assim, admitindo um conjunto de dados (x_i, y_i) , onde i é número de aplicações $i = 1, 2, 3, \dots, n$, e pode ser representado por intermédio de uma função condicionada tal qual apresentado na equação (3.4), na qual os valores de entrada medidos x_i resultem em valores de saída y_i medidos, que se aproximem dos valores de saída calculados pelo modelo \hat{y} .

$$f(x_i) \approx y_i \Leftrightarrow \hat{y} \approx y_i \quad (3.4)$$

Dada a representação do modelo ARX, a função a ser estimada, pode ser descrita através de uma equação de diferenças como em (3.5), em que as variáveis dependentes são combinação das variáveis independentes ponderadas pelos parâmetros, que se aplicada aos dados disponíveis, onde os valores de $x(k-n)$ e $y(k-n)$ são referentes aos instantes das entradas e saídas respectivamente, a_n e b_n são os parâmetros a serem identificados cuja ordem são n_a e n_b .

$$\begin{aligned} y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_{n_a} y(k-n_a) \\ = b_1 u(k-1-d) + \dots + b_{n_b} u(k-d-n_b) + e(k) \end{aligned} \quad (3.5)$$

A equação de diferenças pode ser representada através de uma equação matricial dos regressores descrita de forma compacta, onde os valores de saída são calculados no instante k :

$$y(k) = \phi^T(k)\theta + e(k) \quad (3.6)$$

Onde:

$$\begin{aligned} \theta^T &:= [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{n_a} \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{n_b}]^T \\ \phi(k) &= [-y(k-1) \ -y(k-2) \ \dots \ -y(k-n_a) \\ &\quad u(k-d-1) \ u(k-d-2) \ \dots \ u(k-d-n_b)]^T \end{aligned}$$

Diante de uma família de N amostras, tem-se uma equação matricial não quadrada como em (4.6), onde $Y = \phi\theta$ é a saída de predição, e a predição de erro é dada por $E = Y - \phi\theta$ com os diversos parâmetros distintos θ , onde sendo conhecidos os valores dos conjuntos das i -ésimas observações de $y = \{y_1, \dots, y_N\}$ e de $x = \{x_{1i}, \dots, x_{ni}\}$ obtém-se um vetor de parâmetros θ , que é plausível erros de estimação E .

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi^T(0) \\ \phi^T(1) \\ \vdots \\ \phi^T(N-1) \end{bmatrix} \theta + \begin{bmatrix} e(0) \\ e(1) \\ \vdots \\ e(E-1) \end{bmatrix}$$

$$Y = \phi\theta + E \quad (3.7)$$

Que na forma de matriz de observação é escrita como:

$$\phi = \begin{bmatrix} -y(-1) & -y(-2) & \dots & -y(-n_a) & u(-d) & u(-d-1) & \dots & u(-d-n_b) \\ -y(0) & -y(-1) & \dots & -y(1-n_a) & u(1-d) & u(-d) & \dots & u(1-d-n_b) \\ -y(1) & -y(0) & \dots & -y(2-n_a) & u(2-d) & u(1-d) & \dots & u(2-d-n_b) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -y(N-2) & -y(N-3) & \dots & -y(N-n_a-1) & u(N-d-2) & u(N-d-2) & \dots & u(N-d-n_b-1) \end{bmatrix}$$

A estimativa dos parâmetros θ é obtida a fim de minimizar o erro quadrático, conforme o critério:

$$J_{MQ} = \|Y - \phi\theta\|^2. \quad (3.8)$$

O qual pode ser reescrito da seguinte forma:

$$J_{MQ} = (Y - \phi\theta)^T (Y - \phi\theta) \quad (3.9)$$

$$J_{MQ} = Y^T Y - Y^T \phi\theta - \theta^T \phi Y + \theta^T \phi^T \phi\theta \quad (3.10)$$

$$J_{MQ} = Y^T Y - 2Y^T \phi\theta + \theta^T \phi^T \phi\theta. \quad (3.11)$$

A fim de determinar o ponto de mínimo da função custo, verifica-se onde a função possui derivada nula, através do cálculo da derivada parcial em função do vetor de parâmetros:

$$\frac{\delta J_{MQ}}{\delta \theta} = 0, \quad (3.12)$$

$$\frac{\delta J_{MQ}}{\delta \theta} = -2\phi^T Y + 2\phi^T \phi\theta = 0. \quad (3.13)$$

Desta forma, é possível calcular os parâmetros do modelo a partir da equação (3.14):

$$\theta = [\phi^T \phi]^{-1} \phi Y. \quad (3.14)$$

Para a solução do problema existe a condição da matriz $\phi^T \phi$ ser uma matriz não singular para ser invertível. A fim de obter tal característica, o sistema é constantemente excitado para não haver linhas em comum na matriz.

3.5 Validação de modelos

A fim de verificar o desempenho do modelo estimado, a última etapa da identificação consiste em realizar a sua validação. Dentre os diversos métodos disponíveis, o mais usual realiza a comparação da simulação do modelo com os dados obtidos.

A validação por simulação, segundo Aguirre (2007) além de relativamente mais simples, permite observar se o modelo reproduz, ao longo do tempo, o comportamento realizado a princípio, dessa forma garantindo assim que ele tenha capacidade de explicar outra família de dados observados, ou seja, sua capacidade de generalização do modelo.

Para garantir a qualidade da identificação, segundo Coelho (2016) durante a validação é pertinente que não seja utilizado os mesmos dados da identificação para validação, como também é essencial que se realize sob condições de operação semelhantes às utilizadas para modelagem. Assim, será validada a dinâmica do sistema em torno de um ponto de operação e os resíduos serão mais facilmente identificados, sejam eles aleatórios ou não, e o sistema poderá ser utilizado para outro conjunto de dados.

Com os testes de simulação realizados, passa-se a avaliar então o vetor de resíduos, que nada mais são do que parte dos dados que o modelo não conseguiu estimar. Segundo Nogueira (2008). Se, ao verificar que o vetor de resíduos apresenta comportamento de ruído branco, ou seja, aleatório, pode-se desconsiderar que há qualquer informação relevante para identificação do sistema. Em contrapartida, na ocorrência de ruídos com um determinado padrão, é possível que haja alguma informação substancial para identificação do sistema.

Um vetor de erros é linearmente variante se sua função de autocorrelação for nula em todos os valores com atraso maior ou igual a um, sendo assim, $r_{\xi\xi}(k) = 0, \forall k \neq 0$. Os testes de resíduos estão mais voltados ao desempenho estatístico do que para desempenho dinâmico do modelo.

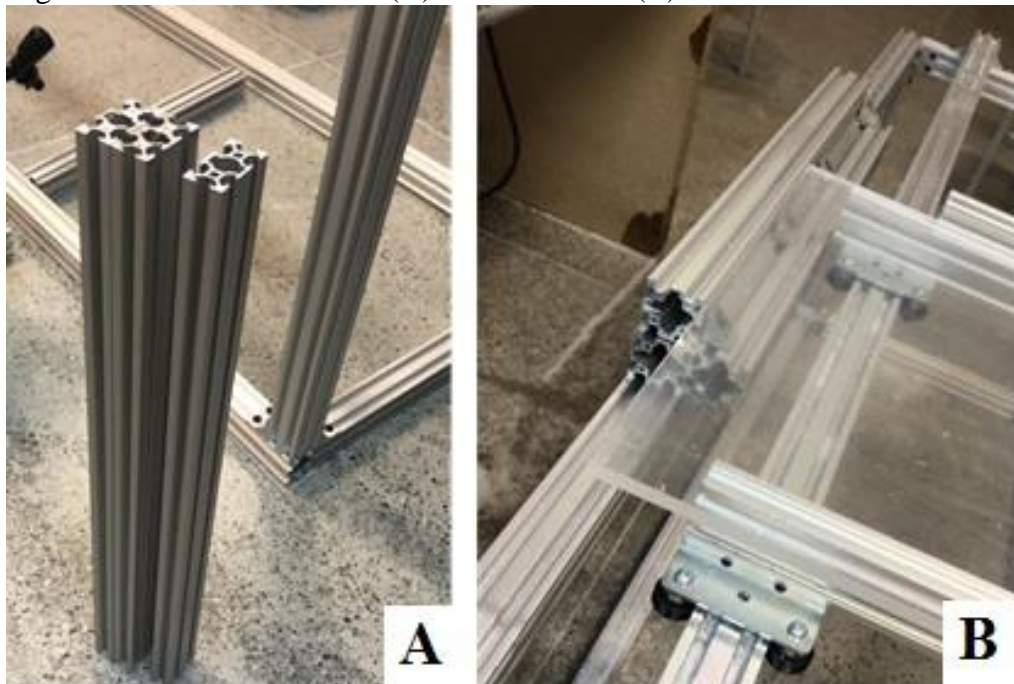
4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta detalhes do projeto e instalação da planta de dessalinização OR desenvolvida neste trabalho.

4.1 Estrutura mecânica e tanques

Todo o processo de corte e instalação, dos tanques e da estrutura foi realizado dentro do laboratório do Grupo de Pesquisa em Automação e Robótica (GPAR). Primeiramente realizou-se os cortes nas peças de alumínio, Figura 9 (A) com uma serra circular SCV2000, adequada para o tipo de material, parte dos componentes de alumínio cortados foram utilizados também como mesa de corte para o acrílico, Figura 9 (B).

Figura 9 – Perfil de alumínio (A) Mesa de Corte (B)



Fonte: O próprio autor

A chapa de acrílico, Figura 10 (B), encontrada inteira no mercado possuía dimensões de 2 x 1 m de área e 10 mm de espessura. O corte foi realizado utilizando mesa e uma serra circular profissional Skil 5402, Figura 10 (A). O acrílico destaca-se dos demais materiais, devido suas propriedades e versatilidade, se comparado ao vidro e ao policarbonato, ele possui maior resistência à impactos, mas com o peso menor. Sua propriedade química também garante resistência à água, álcalis e soluções aquosas de sais inorgânicos. A densidade de 1.19 g/cm³, e a resistência à abrasão é próxima a do alumínio com a vantagem de poder ser polido em caso

de riscos e arranhões, além da resistência à quebra, diferente do vidro, o acrílico não possui tendência a fragmentar-se. (BELMETAL).

Figura 10 – Corte do acrílico (A) Peça de Acrílico (B)

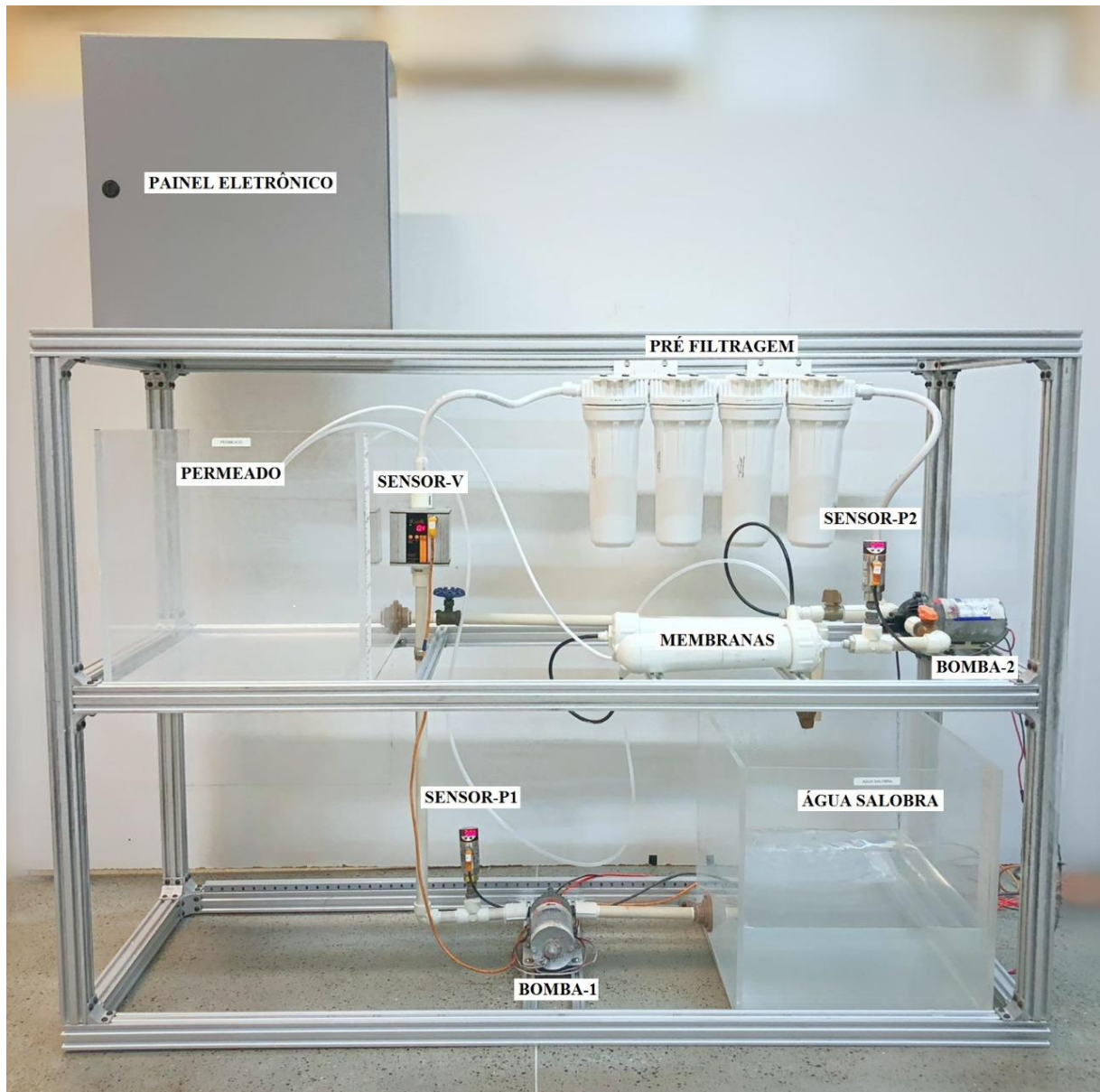


Fonte: O próprio autor

A planta foi elaborada em uma estrutura com as dimensões de 1,45 x 1,00 x 0,48 m de alumínio modular, escolhida devido à facilidade de instalação, transporte e resistência que proporciona à planta de dessalinização. Possui dois tanques feitos em acrílico com espessura de 10 mm e aproximadamente 60 L de capacidade, cada recipiente armazena uma etapa da dessalinização como é possível ver na Figura 11.

O primeiro tanque, é onde a água salobra fica armazenada, o segundo tanque armazena a água filtrada, as membranas estão instaladas em série, com a finalidade de realizar aproveitamento máximo do concentrado para que finalmente ele seja descartado, ou retorne para o tanque da água de alimentação e possa ser realizado outro ensaio. Os dois tanques estão constantemente interligados pela tubulação ou equipamentos.

Figura 11 – Planta de Dessalinização por Osmose Reversa



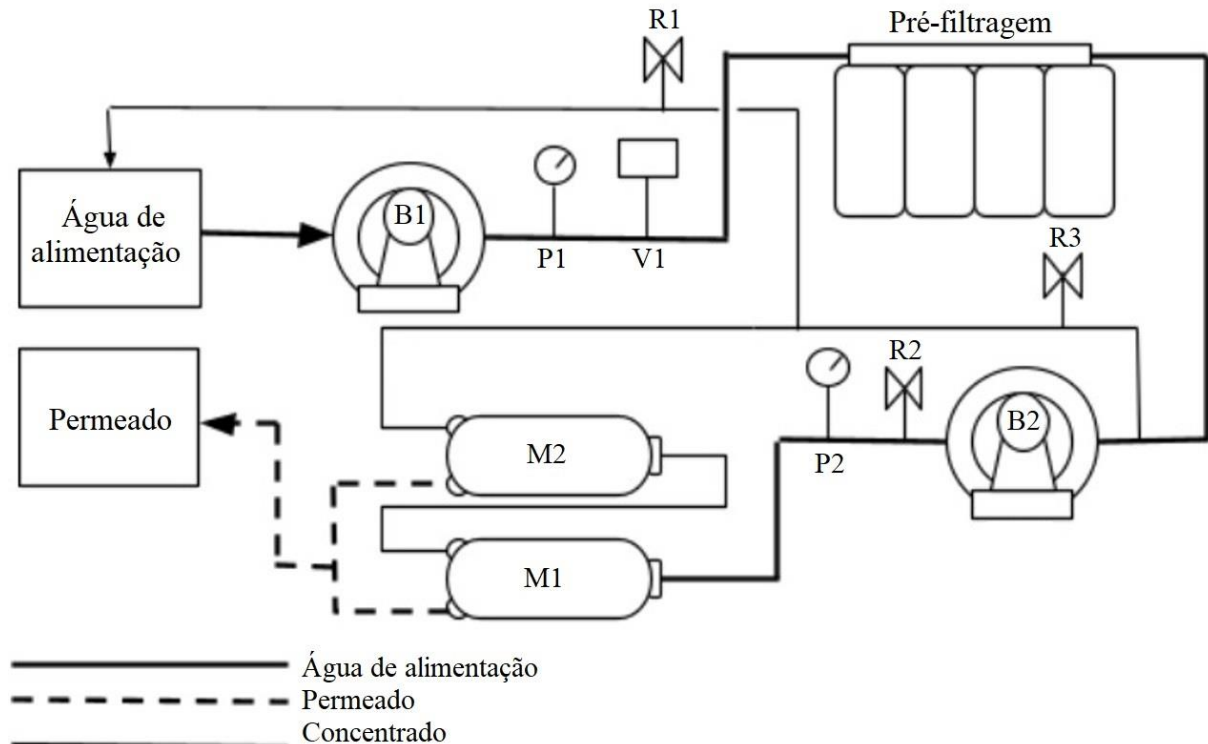
Fonte: O próprio autor

4.2 Descrição geral da planta de dessalinização

A instalação do sistema foi baseada na configuração de realimentação de dois estágios, como é possível ver na Figura 12. Essa disposição dos componentes, o concentrado que é expelido pelo primeiro estágio de membrana (M1), serve como água de alimentação para a segunda membrana (M2) no segundo estágio, a fim de ser aproveitado ao máximo. Como a água de alimentação mistura-se ao concentrado da água de alimentação. O sistema utiliza duas bombas para suprir a demanda do sistema, a primeira bomba (B1) é utilizada para acionar o sistema inicialmente, retirando a água de alimentação do primeiro tanque e impulsionando-a no

sistema de pré-filtragem, uma segunda bomba (B2) é utilizada para impulsionar a água de alimentação vinda dos filtros, nas membranas em serie, os registros (R1) e (R2) estão instaladas ao longo da tubulação para manter a pressão do sistema, são regulados manualmente para manter pressão nominal, o registro (R3) é responsável pelo acionamento da realimentação, o sistema pode funcionar com ou sem realimentação.

Figura 12 – Diagrama simplificado do sistema



Fonte: O próprio autor.

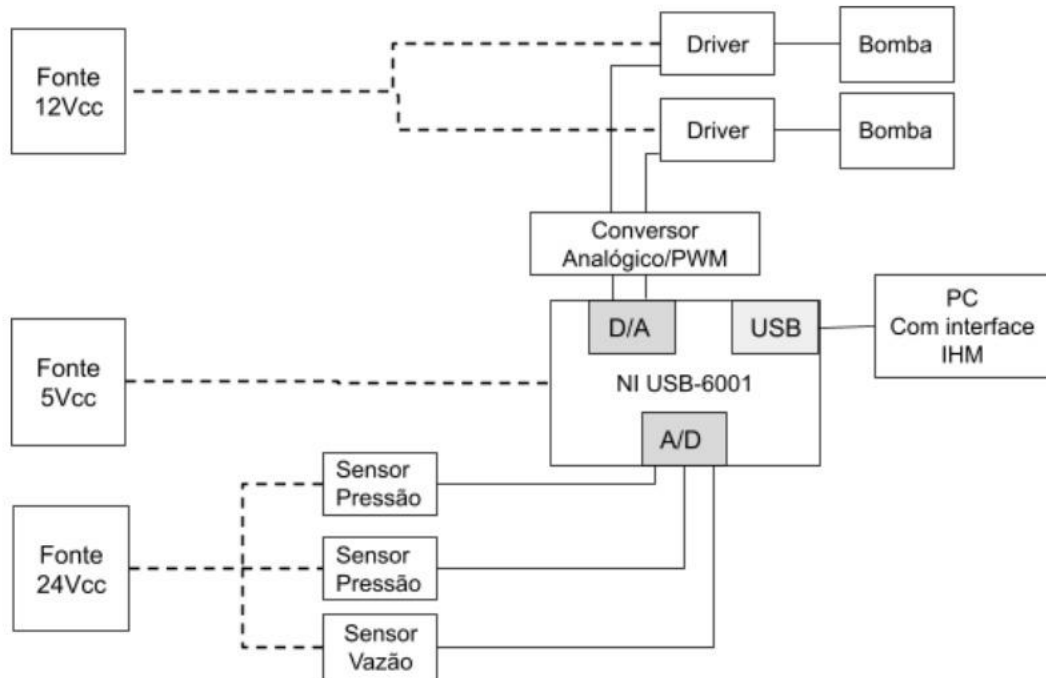
Ao longo da tubulação estão instalados um sensor de vazão (V1) e um par de sensores de pressão, que proporcionam informações necessárias para a operação e controle do sistema. O primeiro sensor de pressão (P1) encontra-se na saída da bomba (B1), o segundo sensor de pressão (P2) está instalado na saída da segunda bomba (B2). O sensor de vazão (V1) encontra-se antes da entrada dos filtros.

Para realizar a aquisição de dados de pressão e vazão gerados pelos sensores, é utilizado um dispositivo de aquisição de dados, a USB-6001. Segundo a National Instruments, (2020) ele possui 13 entradas e saídas digitais, 2 saídas analógicas (5 kS/s/canal), 8 entradas analógicas (14 bits, 20 kS/s).

Como pode-se ver na Figura 13, no esquema eletroeletrônico, a placa da USB-6001 que é alimentada por uma fonte 5 Vcc, recebe dados dos sensores, que por sua vez são

alimentados por uma fonte 24Vcc. O sinal analógico de entrada é convertido em digital e processado pelo sistema supervisorio da programado pela plataforma Labview.

Figura 13 – Diagrama eletro eletrônico



Fonte: O próprio autor

As saídas analógicas da USB-6001 são conectadas a um conversor analógico/pwm responsável por gerar o sinal PWM que é aplicado nos drivers de potência que acionam as bombas.

4.3 Bombas

Para realizar o processo de dessalinização é necessário o acionamento hidráulico do sistema através do bombeamento de água impulsionada nos filtros e membranas, o projeto aqui desenvolvido utiliza duas bombas hidráulicas do tipo diafragma, uma retira água salobra do tanque para o processo de pré-filtragem, e outra impulsiona a água pré-filtrada para a osmose reversa.

A bomba Shurflo 8000, Figura 14, com dimensões de 215 x 114 x 104 mm utilizada no sistema permite, segundo SHURFLOR (2020), uma vazão máxima diária de 2.940 L/dia considerando acionamento FV com 5 horas de sol pleno por dia, máxima altura manométrica de 42 m e máxima altura de sucção de 3,66 m.

Figura 14 - Bomba Schurflo 8000



Fonte: O próprio autor

As bombas são acionadas com tensão de alimentação de 12Vcc e permitem ligação direta com painel FV sem necessidade de regulador de tensão ou bateria estacionária. Suas especificações detalhadas são fornecidas pelo SHURFLOR (2020) como é possível ver na Tabela 2, o próprio fabricante também disponibiliza as curvas de desempenho da bomba catálogo, é possível ver o comportamento de forma resumida na Tabela 3.

A SHUFLO 8000 é uma bomba de deslocamento positivo do tipo diafragma, devido à mecânica de funcionamento, também pode ser reconhecida como bomba volumétrica, pois para realizar o trabalho sob o líquido ela o impulsiona através um órgão propulsor (podendo ser um diafragma, paleta, pistão ou membranas), essa energia de pressão gera movimentação do fluido transferindo-o para interior das câmaras da bomba (uma ou mais) ocupando e desocupando-a constantemente a cada ciclo. A sua instalação de superfície descarta a necessidade de submersão, podendo ser alojada próximo ao local de sucção, o ideal é que esteja de lado ou com a parte superior (onde o acoplamento dos tubos é feito) para baixo. É amplamente indicada em casos nos quais há necessidade de vazão constante.

Tabela 2 – Parâmetros da Bomba Shurflo 8000

Parâmetro	SHURFLO 8000
Número do Modelo	8000-443-136
Tipo de Bomba	volumétrica 3 diafragmas
Válvula de Segurança	1 via - previne fluxo reverso
Pressostato	Desligamento ajustável
Motor	Ímã permanente
Tensão Nominal	12 Vcc
Pressão nominal	60 psi
Consumo para recalque em aberto	2,9 A/h
Vazão para recalque em aberto	490 L/h
Consumo para recalque máximo (42,25 m)	7,2 A/h
Vazão para recalque máximo (42,25 m)	340 L/h
Temperatura Máxima do Líquido	77° C
Material dos Plásticos	Polipropileno
Material das Válvulas	EPDM
Material dos Diafragmas	Santoprene
Material da Base	Aço Zincado
Peso	2,07 kg

Fonte: SHURFLOR, 2020.

Tabela 3 – Desempenho da Bomba Schurflo 8000

Pressão(Psi)	Vazão (L/min)	Rotação (RPM min/máx)	Corrente (A)	Tensão (v)
Aberto	5,6	2290/2315	3,1	12 VCC
10	6,3	2225/2255	3,4	12VCC
20	5,9	2170/2205	4,2	12 VCC
30	5,6	2130/2155	4,9	12 VCC
40	5,2	2045/2085	5,6	12 VCC
50	4,9	2020/2045	6,9	12 VCC
60	4,6	1893/1970	7,2	12 VCC

Fonte: SHURFLOR, 2020.

4.4 Filtros

O processo de pré-filtragem é essencial para preservar a vida útil do sistema, são quatro etapas, como é apresentado na Figura 15, que são responsáveis pela retirada parcial das impurezas tais como, odores, coloração, sólidos suspensos e possíveis componentes químicos presentes na água. Sem a presença dessa etapa essas partículas acumulariam nos poros das membranas exigindo maiores valores de pressão e vazão para que funcionassem, prejudicando-as permanentemente. Hidrofiltros (2020).

Figura 15 – Sistema de Pré-filtragem



Fonte: O próprio autor.

Os dois primeiros são de polipropileno, sendo um de 10 micra e outro de 5 micra, a unidade de micra equivale a 0,001 mm, então todas partículas maiores que o grau de retenção dos cartuchos não permearão ao longo do sistema. Os filtros de polipropileno, são de material atóxico, com dimensões de 25,4 cm de altura por 5,3 cm de diâmetro, segundo o fabricante Emtec, suportam uma pressão máxima de 72,6 psi e temperatura máxima de 52°C Hidrofiltros, (2020).

Em seguida, a água atravessa o filtro de carvão ativado que devido sua porosidade e capacidade de absorção, filtra impurezas causadoras de odores, sabores, pigmentações, bem como retirada do cloro presente na água. Segundo Hidrofiltros (2020), o modelo Clor 9.¾ HydroCarbon o filtro com dimensões de 24,8 x 70 x 26 cm e 348,5 g bruto, é feito pela compactação do carvão com mais duas mantas internas e externas que retém partículas de sujeiras que evitam a passagem para o carvão, também garante que quanto maior tempo de contato com carvão melhor os resultados de decoloração. O refil possui vida útil indeterminada desde que seja conservado em sua embalagem original, após instalação é garantido três meses de uso, sua faixa de pressão de operação é entre 2,84 psi à 56,85 psi e temperatura entre 5°C à 50°C Hidrofiltros (2020).

Por fim o filtro de resina deionizadora responsável pela desmineralização, é composta por 50% de resina catiônica e 50% de resina aniônica, amplamente utilizada para tratamento de água para fins industriais e de laboratórios. O processo é realizado pela troca iônica entre a resina que ocorre por íons H⁺, OH⁻ ou Na⁺. Essa troca retém cátions como cálcio, magnésio,

ferro e manganês que passariam pelas membranas OR. Catálogo Técnico – Hidrofiltros, Resina Cationica, (2020).

4.5 Membranas

Após o processo de pré-filtragem, inicia-se a etapa final da purificação de água, onde a água passa pelas membranas de osmose reversa a fim de ser dessalinizada. Para esse processo foi utilizado o dispositivo Dow Filmtec 100 GPD Tw30-1812-100, segundo FILMTEC Membranes (2010), a membrana possui configuração espiralada formada com camada extra fina poliamida-polissulfonada que garante a dessalinização e tratamento de água industrial em pequena escala. As membranas possuem certificação NSF/ANSI, vida útil de doze a trinta e seis meses, a depender da qualidade da água utilizada para no processo, os demais parâmetros de funcionamento por unidade de dispositivo são apresentados na Tabela 4.

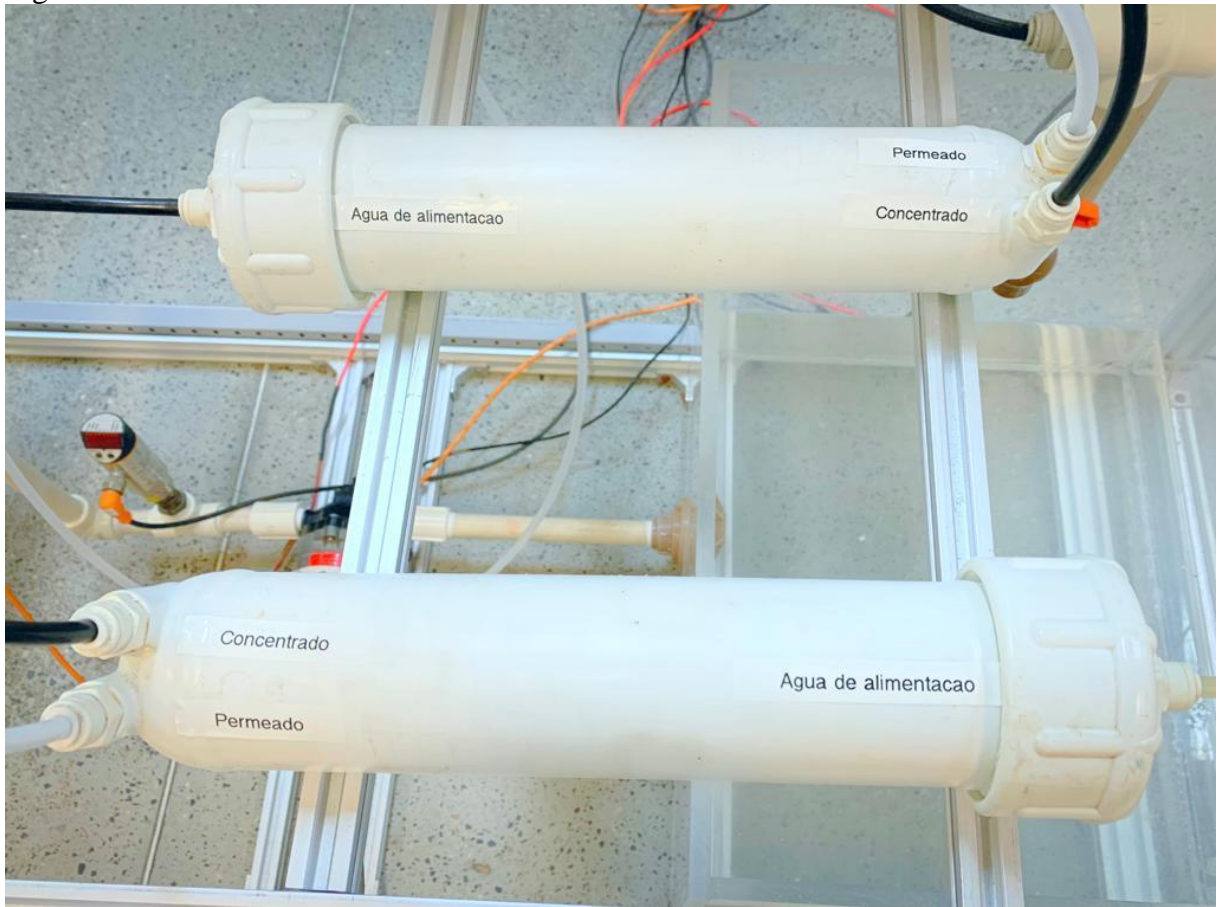
Tabela 4 – Parâmetros de funcionamento Dow Filmtec 100 GPD Tw30-1812-100

Parâmetro	SHURFLO 8000
Largura com conectores	298mm
Largura dos conectores	22mm
Diâmetro dos conectores	17mm
Diâmetro da membrana	44,5mm
Largura da membrana sem conectores	254mm
Pressão nominal de aplicação	50 psi
Pressão máxima de operação	300 psi
Taxa de fluxo de permeado	16L/h (0,3L/min)
Taxa máxima de fluxo de alimentação	456 L/h (7,6L/min)
Rejeição estabilizada de sais	90%
Taxa de recuperação	15%
Tipo de membrana	filme fino de poliamida
Temperatura máxima de operação	45 °C
Tolerância de cloro livre	< 0,1 mg/L

Fonte: FILMTEC Membranes (2010).

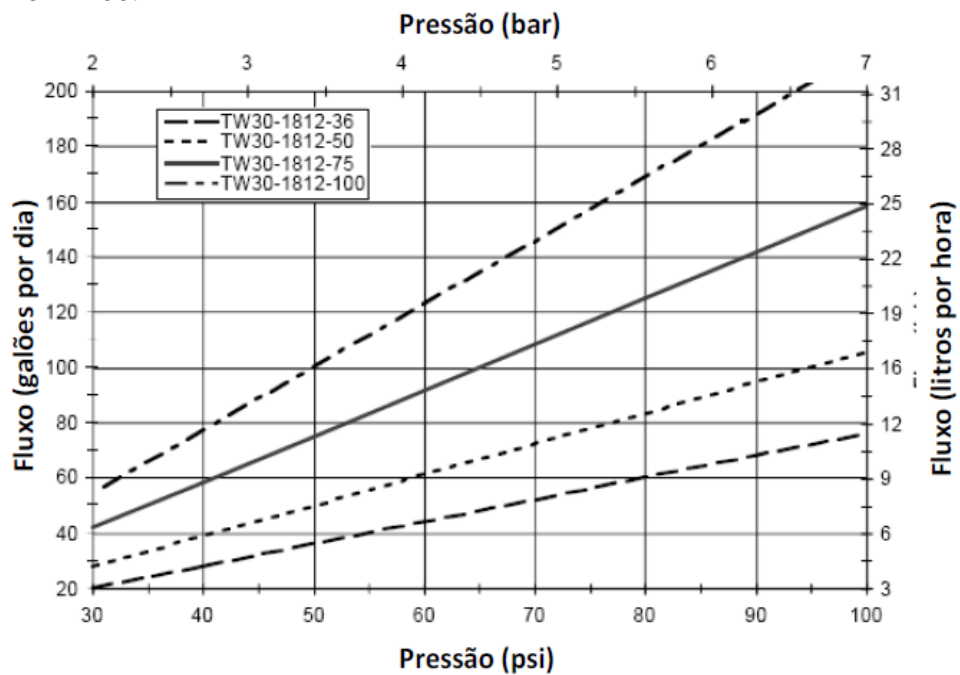
A planta foi idealizada com a instalação de dois dispositivos dessalinizadores em série, como é possível ver na Figura 16, essa configuração, a água de alimentação permeia por uma membrana seguida da segunda. As membranas possuem uma entrada e duas saídas, pela saída obtém-se água dessalinizada e pela saída o rejeito. Como um dos objetivos principais é controlar pressão e vazão otimizando a geração de água purificada e dessalinizada, os ensaios foram realizados variando essas duas grandezas. É possível avaliar o desempenho das membranas de acordo com a pressão que lhes é aplicada, o que pode ser observado no Gráfico 2.

Figura 16 – Cartuchos com Membranas Dow Filmtec 100 GPD TW30-1812-100



Fonte: O próprio autor

Gráfico 2 – Desempenho das Membranas Dow Filmtec 100 GPD TW30-1812-100.



Fonte: FILMTEC Membranes (2010).

As membranas de osmose reversa, possuem uma relação direta com a pressão que lhes é aplicada, a ponto de que são projetadas para operarem com pressão mínima superior a pressão osmótica natural presente na água, o que irá variar de acordo com os índices de salinidade trabalhados. Devido a isso o próprio fabricante disponibiliza o impacto da pressão no resultado do permeado.

4.6 Sensores

Para realizar o monitoramento do sistema foram instalados dois pares de sensores de pressão e um de vazão, os quais são responsáveis por fornecer os dados necessários para identificação e modelagem dos parâmetros.

O sensor ultra-som de vazão SU7000, Figura 17, possui sinal de saída de comutação, analógica e de impulso, todas configuráveis, um alcance de medição de 0 a 50 L/min ou 0 a 3 m³/h, suporta até 232,06 Psi de pressão, sua tensão de operação é de 19 a 30 Vcc. A corrente de saída analógica tem alcance de 4 a 20 mA com a tensão de saída analógica de 0 a 10 V, ambos de escala ajustável e seu alcance de medição é de 0 a 50 L/min. Suporta temperatura ambiente de -10 a 60 °C e de fluído de -10 a 80°C. Instruction Manual IFM (2004)

Seu uso é direcionado para aplicações industriais, capaz de medir vazão de diversas substâncias como, água, soluções de glicol, refrigerantes lubrificantes e óleos, como também é capaz de medir grau de viscosidade e temperatura dos fluidos.

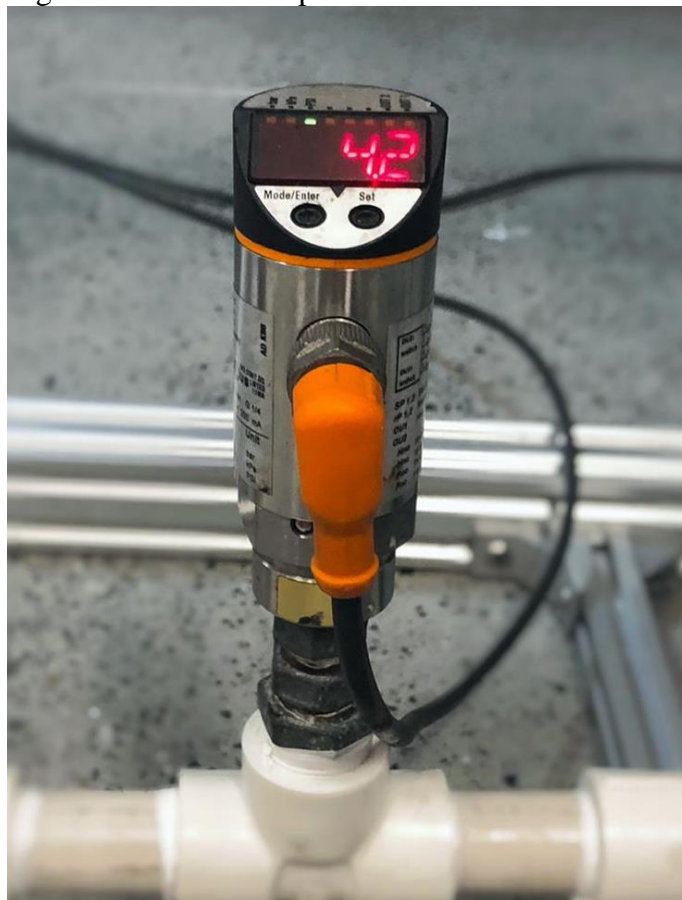
Figura 17 – Sensor de vazão SU7000



Fonte: o próprio autor

O sensor de pressão PN 2024, Figura 18, possui sinal de saída de comutação, analógica e dIO-Link, todas configuráveis, um alcance de medição de -14,5 a 145 Psi ou -1 a 10 bar, sua tensão de operação é de 18 a 32 Vcc. A corrente de saída analógica tem alcance de 4 a 20 mA com a tensão de saída analógica de 0 a 10 V, ambos de escala ajustável e seu alcance de medição é de -14,5 a 145 Psi. Suporta temperatura ambiente de -25 a 80 °C e de fluído de -40 a 100°C. Seu uso é direcionado para aplicações industriais, pode ser utilizado em fluidos líquidos e gasosos. Instruction Manual IFM (2004).

Figura 18 – Sensor de pressão PN 2024



Fonte: O próprio autor

4.7 Placa de aquisição de dados

Para realizar coleta dos valores de pressão e vazão do sistema, utilizou-se a placa de aquisição de dados NI USB-6001 (Figura 19). Um dispositivo USB de alta velocidade e multifuncional, que oferece oito terminais simples de canais de entrada analógica (AI), que também podem ser configurados como quatro canais diferenciais. Isso também inclui dois canais de saída analógica (AO), 13 canais de entrada / saída digital (DIO) e um contador de 32

bits. Um dispositivo leve e portátil, com alimentação pelo barramento. National Instruments, (2020).

Figura 19 – Placa de aquisição de dados USB 6001



Fonte: o próprio autor

4.8 Interface gráfica de operação e aquisição de dados

Foi desenvolvida uma interface gráfica para operação e aquisição de dados utilizando a plataforma Labview, ilustrada na Figura 20. A programação é realizada em linguagem G (programação gráfica), Figura 21, a qual dispõe de diversas estruturas de diagrama de blocos pré-definidas, tornando a programação mais visual e facilitando a instalação e entendimento dos sistemas.

A interface possui comunicação com a placa NI-USB6001 e permite a visualização em tempo real de valores de pressão e vazão na planta. A operação pode ser realizada em 2 modos: malha-aberta e malha-fechada. O primeiro é utilizado prioritariamente para fins de modelagem, enquanto o segundo para ajustar e testar sistemas de controle para regulação de pressão na bomba ou na entrada do conjunto de membranas.

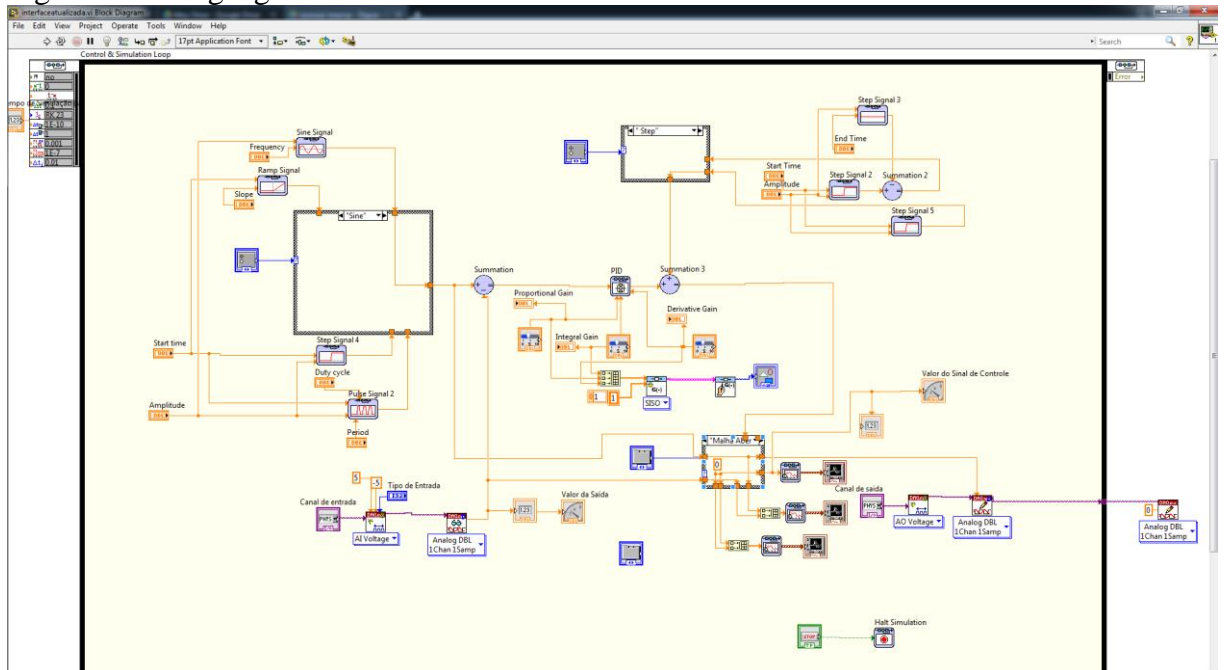
Sinais de teste do tipo degrau, rampa e onda quadrada podem ser parametrizados e utilizados para aplicação na planta durante testes de identificação e de controle.

Figura 20 – Interface IHM – Labview



Fonte: O próprio autor.

Figura 21 – Linguagem G



Fonte: O próprio autor

4.9 Condutivimetro

Para realizar a verificação da eficiência do sistema de dessalinização utilizou-se condutivímetro portátil E-1 portable TED EC Meter, Figura 22, um equipamento profissional capaz de realizar três tipos de medições. É possível avaliar o total de STD podendo ser medido

em mg/L ou mg/L, condutividade em $\mu\text{s}/\text{cm}$ e temperatura em Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ou Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$). PHTEK (2021).

Figura 22 – Condutivímetro



Fonte: PHTEK, 2021

De acordo com PHTEK (2021), o instrumento vem calibrado de fábrica, mas em caso de descalibragem, pode ser facilmente regulado com uso de uma solução calibradora. Para realizar as medições basta ligá-lo e inserir o medidor até a linha de imersão e apertar o botão HOLD para manter o valor da medição no display após retirado da solução. As características do condutivímetro são oferecidas pelo fabricante, como é possível ver na Tabela 5.

Tabela 5 – Escala de medição do condutivímetro.

Condutividade	0-9999 $\mu\text{s}/\text{cm}$
STD	0-9999 mg/L
Celsius	0,1 - 80,0 $^{\circ}\text{C}$
Fahrenheit	32,0 - 176,0 $^{\circ}\text{F}$

Fonte: PHTEK, 2021

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados de testes experimentais de validação do funcionamento da planta e a identificação de modelos paramétricos para análise do comportamento do sistema desenvolvido.

5.1 Ensaios de validação do funcionamento da planta

Foram realizados 6 experimentos, 3 primeiros sem realimentação e outros 3 com realimentação, todos sob as mesmas condições de operação, acionamento das bombas, quantidade de água e os 3 níveis de STD. O primeiro teste de redução de STD foi realizado com água de alimentação água salobra, 2.300mg/L de STD. O segundo ensaio foi realizado com água de alimentação com 3.900 mg/L de STD. Por fim, o terceiro ensaio foi realizado com 5.130 mg/L de STD na água de alimentação.

Durante os ensaios iniciais, constatou-se que valores que inferiores a 50 psi, valor nominal de operação, não são suficientes para reduzir o nível de concentração da água de alimentação. Desta forma, a pressão mínima de operação é um fator que é determinado pelo do conjunto de membranas, enquanto o valor máximo é definido pela máxima pressão suportada pelas bombas, valor limite 60 psi, foi determinado pelo sistema de proteção de desarmamento da bomba.

A fim de evitar atuação da proteção, os três ensaios foram realizados com tensões constantes nas 2 bombas do sistema a fim de gerar 55 psi na entrada do conjunto de membranas. Também foram mantidas constantes as aberturas dos registros (R1), (R2). A Tabela 6 apresenta as condições de tensão nas bombas e as pressões médias resultantes iniciais em que os três ensaios foram realizados.

Tabela 6 – Valores médios das medições de tensão, corrente e pressão nas bombas.

	Bomba 1	Bomba 2
Tensão (V)	3,6	3,28
Corrente (A)	3,45	1,1
Pressão Média (psi)	45	50,4
Potência (W)	9	3

Fonte: O próprio autor

Inicialmente o experimento sem realimentação, teve como resultados os dados apresentados na Tabela 7, com duração de 180 minutos, reduziu 1.534 mg/L de STD da

quantidade inicial de 2.300 mg/L, quantidade significativa, mas não suficiente para tornar potável a água de alimentação, finalizando com 766 mg/L de STD, esse modo de operação gera 55,87L diários.

O segundo nível de STD 3.900mg/L sem realimentação teve duração de 634 minutos com vazão diária de 15,84 L, resultando em permeado com 2.200 mg/L, foi possível reduzir 1.700 mg/L de STD da quantidade inicial.

O último ensaio sem realimentação, foi realizado com 5.130 mg/L de STD dissolvidos na água de alimentação, após 935 minutos houve redução de 1.980 mg/L gerando em torno de 10,8 L diário de permeado a 3.150 mg/L.

Tabela 7 – Desempenho do sistema sem realimentação

Salinidade da água de alimentação (mg/L)	Salinidade do permeado (mg/L)	Varição de STD (mg/L)	Varição (Litro)	Tempo (minuto)	Vazão (L/min)	Vazão Diária
2.300	766	1.534	7,0	180	0,0388	55,87
3.900	2.200	1.700	7,2	634	0,0011	15,84
5.130	3.150	1.980	7,4	935	0,0075	10,8

Fonte: O próprio autor

Os resultados dos ensaios com realimentação estão expostos na Tabela 8. O primeiro com 2300 mg/L de STD, teve duração de 126 min, resultando em 7,21 L de permeado com 340 mg/L, sendo assim, houve redução de 1960 mg/L de STD na primeira amostra. O primeiro ensaio obteve-se redução de concentrado suficiente para tornar a água de alimentação potável, com uma vazão diária de 80,1 L.

O com valor intermediário entre água salina e salobra, iniciou-se com a água de alimentação a 3900 mg/L de STD, ao final do ensaio, após 444 minutos obteve-se 7,32 L de permeado, com concentração de 964 mg/L de STD, uma redução de 2.936 mg/L da água de alimentação original, e vazão diária de 23,6 L.

O ensaio com 5130 mg/L de STD na água de alimentação, encerrou após 825 minutos, foi obtido uma redução de 3.707 mg/L, totalizando em 1.423 mg/L de STD, com uma vazão diária de 12,24 L. Houve redução no índice de STD, mas não foi capaz de tornar a água de alimentação potável.

Com os dados apresentados na Tabela 8 foi possível observar que ao aumentar o nível de salinidade na água de alimentação, a pressão aplicada não apresentou a mesma eficiência,

mesmo com considerável redução de sais, o tempo necessário para obter mesmo valor em litros de permeado.

Tabela 8 – Desempenho do sistema com realimentação

Salinidade da água de alimentação (mg/L)	Salinidade do permeado (mg/L)	Varição de STD (mg/L)	Varição (Litro)	Tempo (minuto)	Vazão (L/min)	Vazão Diária
2.300	340	1.960	7,21	126	0,0556	80,1
3.900	964	2.936	7,32	444	0,0164	23,6
5.130	1.423	3.707	7,12	825	0,0085	12,24

Fonte: O próprio autor

Em trabalhos anteriores como em Mendonça (2016), onde ele utilizou água de alimentação com índices de STD de 1.017mg/L, obteve uma vazão de 160,79 L com concentração de 105mg/L ao final da operação, em outra operação do mesmo autor, com 1561 mg/L foi obtido 142,6 L de permeado com nível de salinidade de 155 mg/L.

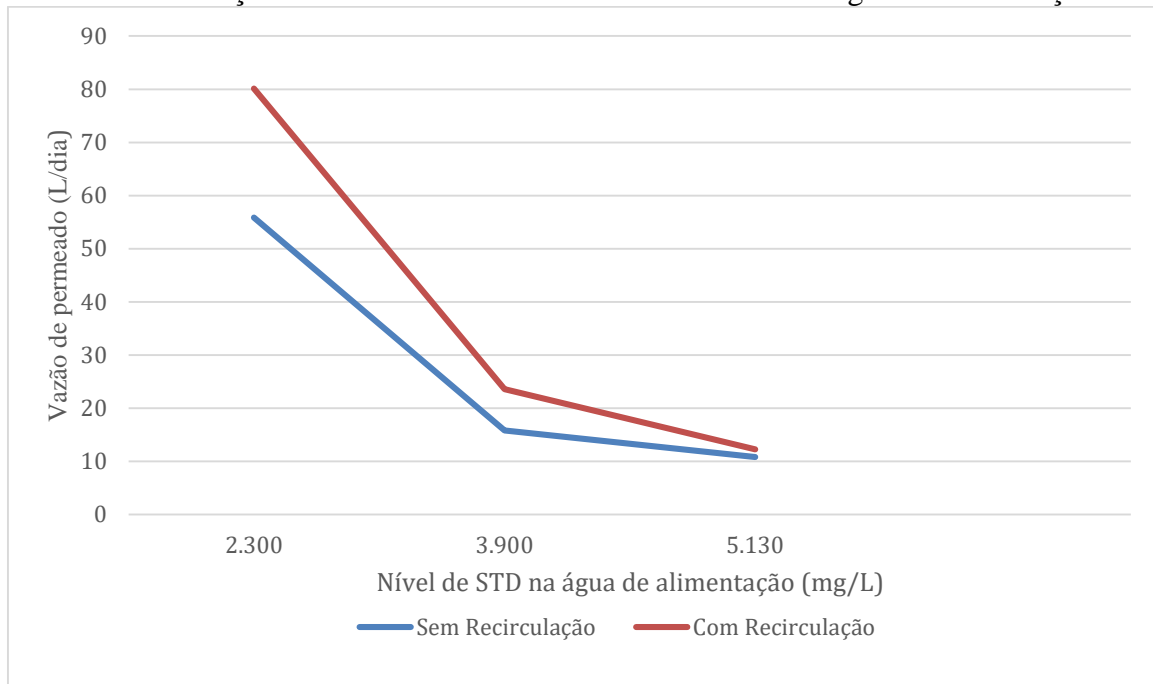
Sampaio (2011), realizou ensaio com as membranas em paralelo com água de alimentação de 5.247,03 mg/L a 63,87 psi, resultando em um permeado com 1.091,38 mg/L e outro com 61,55 psi, obtendo 949,50mg/L

Dessa forma, acredita-se que para obter maior vazão diária e melhor desempenho na redução de STD, é necessário regular a pressão da água de alimentação na entrada das membranas de acordo com o índice de STD medido na água de alimentação.

Segundo FILMTEC Membranes, 2010, as membranas podem chegar a uma vazão de 0,3 L/min e suportam até 300 psi, o que gera em torno de 432 L por dia. Para o nível de pressão utilizado nos ensaios realizados, houve variação em torno de 44,8 psi à 57 psi, e como é possível ver no Gráfico 3, a medida que os índices de STD aumentaram a vazão do permeado decaiu.

Além disso, baseados nos dados coletados nas Tabela 7 e Tabela 8 e no comparativo do Gráfico 3, nota-se que as membranas conectadas em série apresentam melhor desempenho na qualidade de água de permeado e na quantidade de vazão, quando é realizada a realimentação do sistema. Para os dois casos, à medida que o nível de STD da água de alimentação foi aumentado, houve redução na vazão de água de permeado, como também não apresentou a mesma eficiência na redução do concentrado.

Gráfico 3 – Variação da vazão de acordo com índice de STD na água de alimentação



Fonte: O próprio autor

5.2 Identificação de modelos dinâmicos

Nesta seção são apresentados os resultados de identificação experimental de modelos dinâmicos para a malha de pressão de entrada do conjunto de filtros e de membranas. Vale-se destacar que tais modelos são essenciais para o projeto de sistemas para uma análise de controle da planta desenvolvida.

5.2.1 Aquisição de dados

Para realizar a identificação de modelos foram realizados ensaios de aquisição de dados na planta desenvolvida. A fim de obter dados com significativa correlação entre entrada e saída, foi aplicada um sinal de onda quadrada, Figura 23, foi somada a um valor constante, que manteve a pressão na entrada do conjunto de membranas em torno de 50 psi.

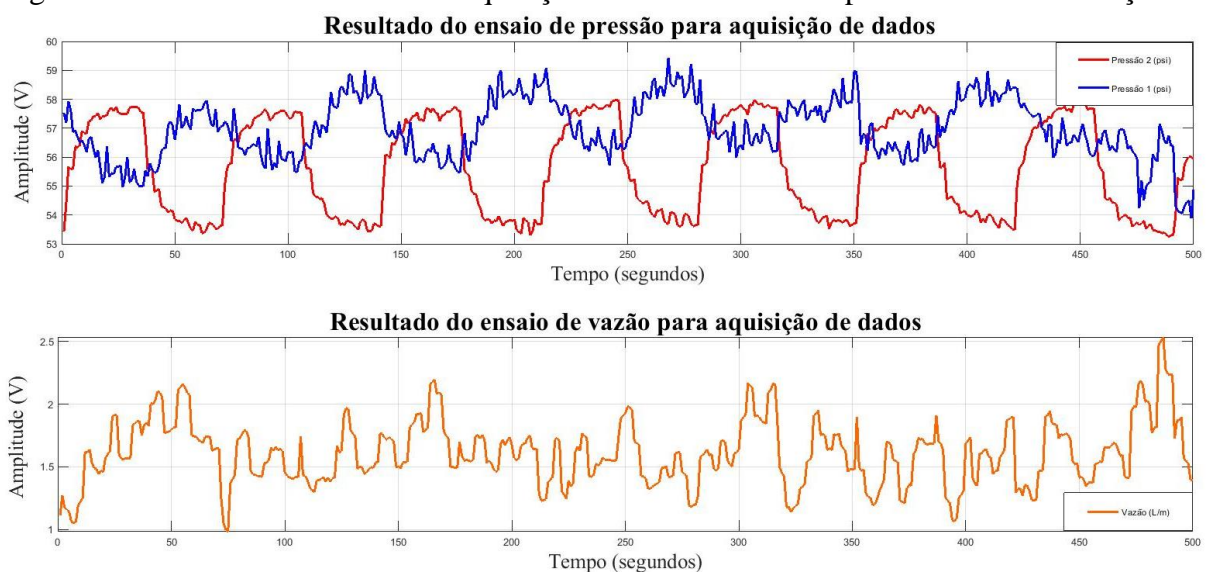
Figura 23 – Sinal de onda quadrada para excitação do sistema



Fonte: O próprio autor

Os ensaios foram realizados com o intervalo de amostragem de $T_s = 10\text{ms}$, sob as mesmas condições. Na Figura 24, são apresentados os resultados das variações das pressões e da vazão ao longo do tempo, os sinais foram coletados através da interface IHM, as pressões em psi, e vazão em L/m. Após o sinal de onda quadrada ser aplicado, nota-se que a pressão 1, correspondente à pressão no início do sistema, apresenta menores variações de pressão (55 psi- 58 psi), e uma maior quantidade de ruídos se comparada à pressão 2, isto deve-se à proximidade do sensor P1 da bomba B1. O sinal de pressão 2, apresenta maior variação de pressão (54,8 psi – 57,8 psi) e menores ruídos, devido à queda de pressão que a unidade OR sofre após a passagem pela etapa de pré-filtragem. Os valores da aquisição de P2 é o parâmetro essencial para o funcionamento e eficiência do sistema OR, desta forma, foi o sinal utilizado para identificação do modelo matemático.

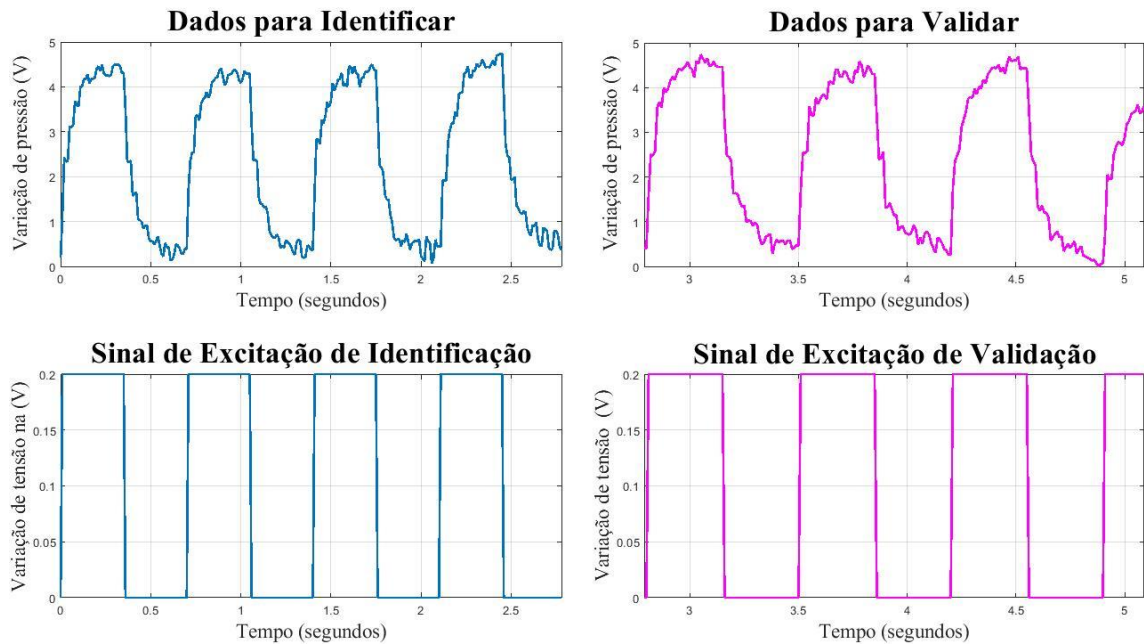
Figura 24 – Resultado do ensaio de aquisição de dados utilizados para fins de identificação.



Fonte: O próprio autor

Os dados coletados foram processados a fim de remover valores de regime que não possuem correlação entre entrada e saída. Desta forma, os valores resultantes de saída são apenas os desvios devido à onda quadrada de entrada. A sequência de dados processados foi dividida em 2 subconjuntos, sendo um utilizado para identificação e outro para validação, conforme a Figura 25.

Figura 25 – Resultado dos dados processados para identificação e validação



Fonte: o próprio autor

5.2.2 Identificação de modelos da malha de pressão de entrada das membranas

Através do algoritmo dos mínimos quadrados não recursivo e do conjunto de dados coletados apresentados na Figura 26, foram identificados 4 modelos ARX, modelos esses de 1^a, 2^a, 3^a e 4^a ordem. A equação (5.1) corresponde ao modelo de 1^o ordem, a equação (5.2) ao modelo de 2^a ordem, a equação (5.3) de 3^a ordem e por fim a equação (5.4) do modelo de 4^a ordem. O termo n_k é referente ao atraso de transporte discreto, que para o intervalo de amostragem utilizado na identificação considerou-se 1 amostra.

Modelo de 1^a ordem

FPE: 0,07487 MSE: 0,07328

($n_a = 1, n_b = 1, n_k = 1 Ts = 10ms$):

$$\frac{B(z)}{A(z)} = \frac{3,711 z^{-1}}{1 - 0,825 z^{-1}} \quad (5.1)$$

Modelo de 2ª ordem

($n_a = 2, n_b = 2, n_k = 1$ e $Ts = 10ms$):

FPE: 0,05877 MSE: 0,0563

$$\frac{B(z)}{A(z)} = \frac{7,094 z^{-1} - 4,126 z^{-2}}{1 - 0,6719 z^{-1} - 0,1912 z^{-2}} \quad (4.2)$$

Modelo de 3ª ordem

($n_a = 3, n_b = 3, n_k = 1$ e $Ts = 10ms$):

FPE: 0,05657 MSE: 0,05303

$$\frac{B(z)}{A(z)} = \frac{7,26 z^{-1} - 2,927 z^{-2} - 0,4331 z^{-3}}{1 - 0,6148 z^{-1} + 0,0158 z^{-2} - 0,4331 z^{-3}} \quad (4.3)$$

Modelo de 4ª ordem

($n_a = 4, n_b = 4, n_k = 1$ e $Ts = 10ms$):

FPE: 0,05659 MSE: 0,05192

$$\frac{B(z)}{A(z)} = \frac{7,091 z^{-1} - 3,401 z^{-2} - 1,436 z^{-3} + 1,39 z^{-4}}{1 - 0,6432 z^{-1} - 0,06431 z^{-2} - 0,2016 z^{-3} + 0,07693 z^{-4}} \quad (4.4)$$

O amortecimento e frequência natural dos polos dos modelos de 1ª, 2ª, 3ª e 4ª são apresentados nas Tabelas 9 a 12.

Tabela 9 – Polos do modelo de 1ª ordem.

Polos	Amortecimento	Frequência (rad/s)
$8,25 e^{-01}$	1,0	19,2

Fonte: o próprio autor

Tabela 10 – Polos do modelo de 2º ordem

Polos	Amortecimento	Frequência (rad/s)
$8,87 e^{-01}$	1,0	12,0
$-2,1 e^{-01}$	4,39	350,0

Fonte: o próprio autor

Tabela 11 – Polos do modelo de 3º ordem

Polos	Amortecimento	Frequência (rad/s)
$8,83 e^{-01}$	1,0	12,4
$-1,34 e^{-01} + 4,85 e^{-01} i$	$3,50 e^{-01}$	197,0
$-1,34 e^{-01} - 4,85 e^{-01} i$	$3,50 e^{-01}$	197,0

Fonte: o próprio autor

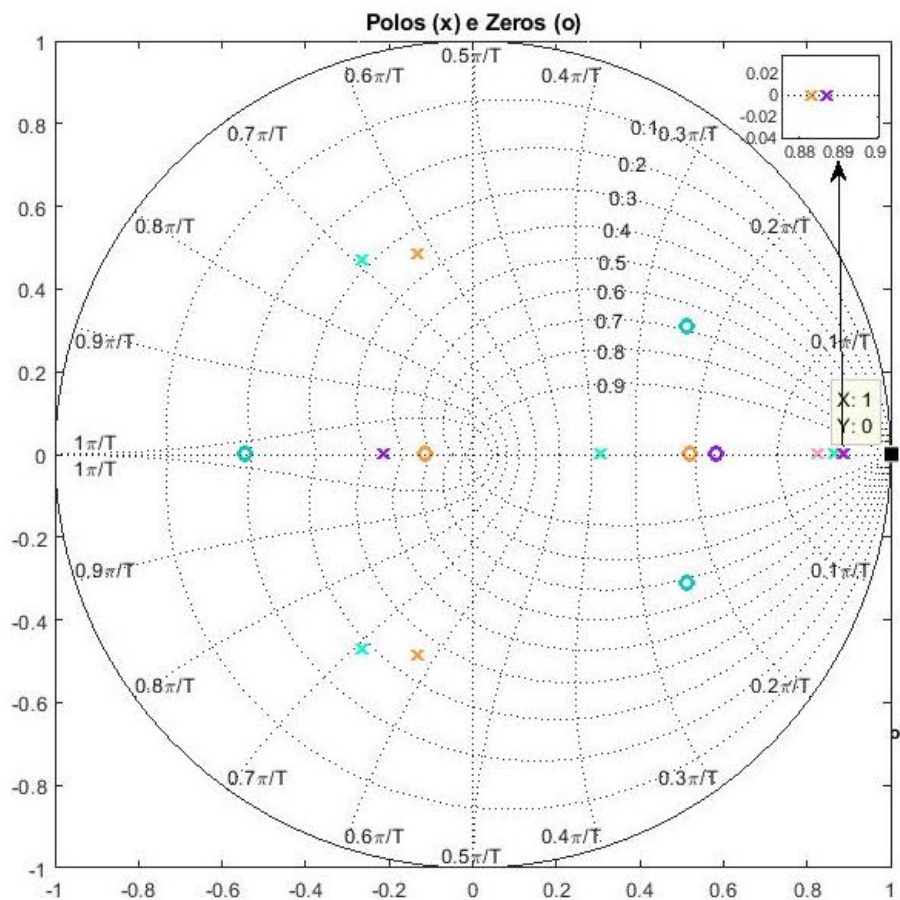
Tabela 12 – Polos do modelo de 4º ordem

Polos	Amortecimento	Frequência (rad/s)
$8,67 e^{-01}$	1,0	14,2
$-2,64 e^{-01} + 4,70 e^{-01} i$	$2,84 e^{-01}$	217,0
$-2,64 e^{-01} - 4,70 e^{-01} i$	$2,84 e^{-01}$	217,0
$3,05 e^{-01}$	1,0	119,0

Fonte: o próprio autor

É possível observar na Figura 26 os polos e zeros dos modelos identificados, em rosa modelo de 1ª ordem, em roxo do modelo de 2ª ordem, em laranja de 3ª ordem e em azul modelo de 4ª ordem.

Figura 26 – Mapa de polos e zeros.



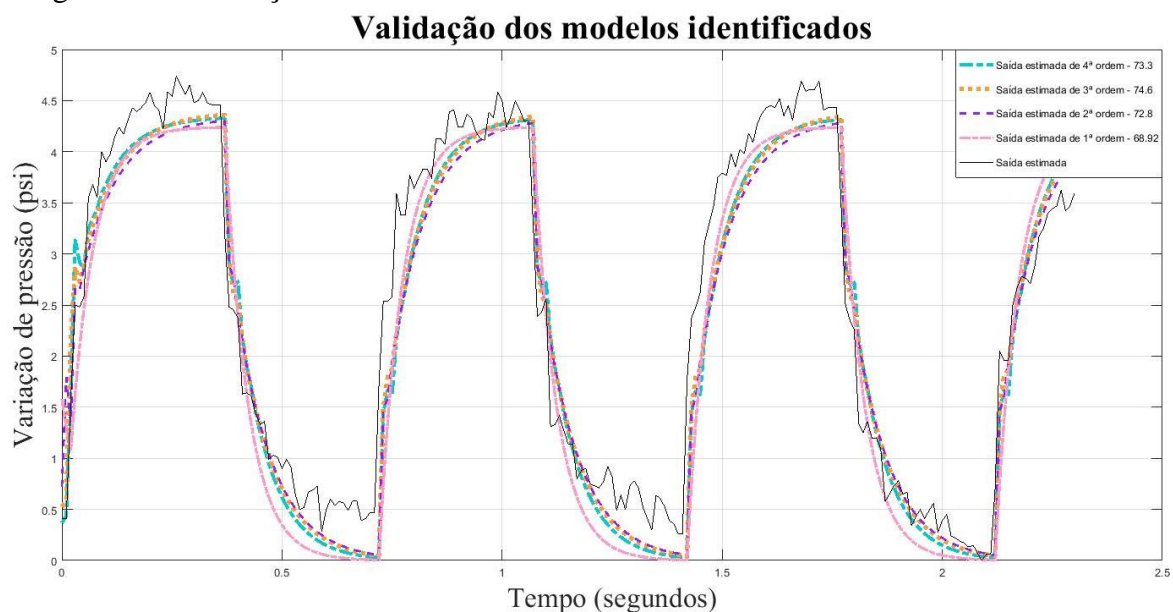
Fonte: O próprio autor.

5.2.3 Validação dos modelos

Os modelos identificados foram validados através de simulação com um conjunto de dados diferente dos dados utilizados para identificação, mas coletado no mesmo ensaio que gerou os dados para identificação, para que fosse possível observar se o modelo reproduz, ao longo do tempo, o comportamento realizado a princípio, confirmando a capacidade de generalização do modelo.

Conforme a Figura 27 apresenta, o modelo de 1ª ordem apresentou desempenho de 68,92%, o de segunda ordem de 72,8%, o de 3ª ordem de 74,6% e o de 4ª ordem 73,3%. Desta forma, nota-se que o modelo de 3ª ordem obteve um melhor desempenho e capacidade de generalização. No índice de desempenho utilizado 100% é equivalente a um erro de estimação nulo.

Figura 27 – Validação do modelo de 4ª ordem



Fonte: O próprio autor

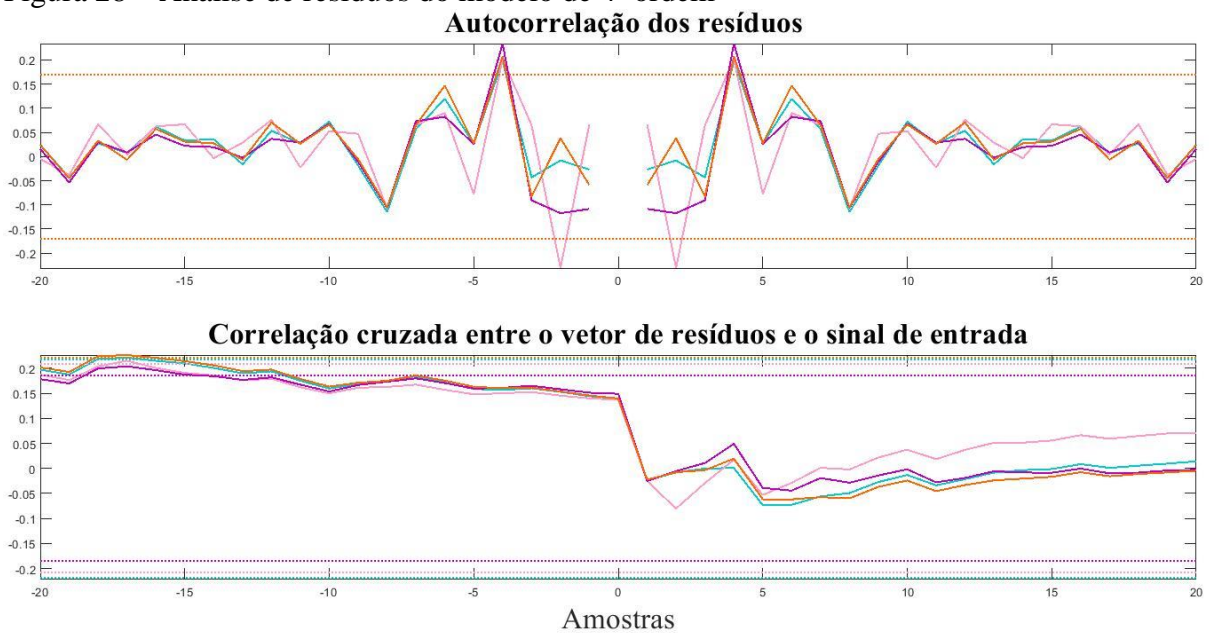
Os modelos identificados também foram validados através da análise de resíduos, abordagem que permite avaliar o desempenho e a generalidade do modelo estimado. O vetor de resíduos é definido como a diferença entre o vetor de saídas estimadas e as saídas medidas.

Na Figura 28, são apresentados os gráficos de autocorrelação dos resíduos para os quatro modelos. Conforme o resultado, percebe-se que os modelos capturaram a informação da dinâmica da planta contida nos dados de entrada, pois ao sobrepor os sinais de ruídos percebe-

se que não há relação entre eles, são independentes, desta forma, o vetor de resíduos apresenta um comportamento predominantemente aleatório.

De forma complementar, ainda na Figura 28, é apresentada a correlação cruzada entre o vetor de resíduos e o sinal de entrada. Como o gráfico apresenta um padrão próximo de zero para diversos valores, confirma que o modelo possui generalidade para um novo conjunto de dados.

Figura 28 – Análise de resíduos do modelo de 4ª ordem



Fonte: O próprio autor

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento, instalação e funcionamento de uma planta piloto de dessalinização por osmose reversa. O modelo concebido propôs o diferencial de possuir configuração e estrutura modulares, oferecendo ampla possibilidades de instalação, essa singularidade proporciona diversas abordagens para o método de osmose reversa e amplas aplicações de práticas de controle. Além do processo de desenvolvimento criativo e mecânico do sistema, apresentou-se também a modelagem matemática do sistema, processo essencial para aplicação de métodos de controle e análise de eficiência do projeto.

O sistema mostrou-se efetivo no procedimento redução de STD, tanto para água salobra quanto água salina, nas duas configurações, com e sem realimentação, apesar de, o procedimento com realimentação apresentar um desempenho um pouco melhor. Para água de alimentação de 2.300mg/L o sistema sem realimentação reduziu 1.534mg/L, enquanto com realimentação reduziu 1.960 mg/L. Para água de alimentação de 3.900mg/L, o sistema sem realimentação obteve redução de 1.700 mg/L e com realimentação obteve 2.936, por fim, com água de alimentação de 5.130 mg/L, sem realimentação obteve redução de 1.980 mg/L e com realimentação reduziu 3.707 mg/L. De toda forma, se comparado aos trabalhos anteriores, confirma-se que há a necessidade de aumentar a pressão da água de alimentação na entrada das membranas, somente o ensaio com 2.300mg/L de STD inicial com realimentação obteve valor final de STD próprio para consumo humano, com 340 mg/L.

A identificação e validação foram realizadas através de um ensaio de aquisição de realizado com aplicação de sinal de onda quadrada somada a um valor constante, que relaciona entrada e saída do sistema mantendo a pressão no valor nominal de 50 psi, e tempo de amostragem de 10 ms. Dentre os quatro modelos identificados, o de melhor desempenho e que melhor descreve o sistema de dessalinização OR, foi o modelo de 3ª ordem, que com a validação de simulação demonstrou capacidade de generalização. Além disso, com a validação de autocorrelação de ruídos, pode-se concluir que o vetor de resíduos dos modelos paramétricos estimados, apresentaram um comportamento predominantemente aleatório, o que significa que não há informação relevante no vetor de ruídos e o modelo foi eficiente na identificação do sistema.

A partir disso, pretende-se otimizar as características do sistema, a princípio realizar a aplicação de sistemas de controle em malha fechada a fim de evitar flutuações nos valores da pressão de entrada das membranas, realizar a mudança no equipamento de bombeamento para que seja possível aplicar uma maior variação de pressão nas membranas. Além de montar

diferentes formas de configurações para as membranas avaliar e comparar suas singularidades, para que também seja possível aplicar diferentes métodos de controle.

ARTIGOS PUBLICADOS DURANTE O MESTRADO

Queiroz, D. M. B de; Araújo, J. P; Nogueira, F. G; Torrico, B. C; Carvalho, P. C. M. de.. Controle de uma planta de dessalinização por osmose reversa acionada por sistema fotovoltaico e banco de baterias. XXIII Congresso Brasileiro de Automática, Santa Maria/Online, 2020.

Queiroz, D. M. B. de; Freitas, B. B.; Carvalho, P. C. M. de; Nogueira, F. G.. Análise de Irradiação Solar Para Acionamento de Unidades de Dessalinização por Osmose Reversa. XII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Foz do Iguaçu/Online, 2020.

REFERÊNCIAS

- A. Abderrahim, “Model predictive control of a reverse osmosis desalination unit”, *Desalination*, vol.194, pp.268–280, 2006.
- ALFRADIQUE, R. P., JESUS, T. T., SOUZA, T. K., “Estudo De Viabilidade De Construção De Estação De Tratamento De Esgoto Em Shopping Center Em Ênfase Em Reutilização De Água Tratada”, *TEC-USO*. Vol. 1, pp. 69-83, Rio de Janeiro, 2018.
- ACKERMANN, T., ANDERSSON, G., SÖDER, L., "Distributed generation: a definition", 2001.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS., “ANA: Conjuntura dos Recursos Hídricos Brasil”, 2017. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2017_rel-1.pdf/view (acesso em outubro de 2019).
- AGUIRRE, A. L. Introdução à identificação de sistemas: Técnicas Lineares e Não Lineares: Teoria e Aplicação. 4ª Edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.
- ALKAISI, A., MOSSAD, R., BARFOROUSH, A.S., “A review of water desalination systems integrated with renewable energy”. *Energy Procedia - Elsevier*, vol. 110, pp. 268-274, 2017.
- ARAÚJO, J. P. Modelagem e controle de uma planta de dessalinização por osmose reversa. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018
- A. R. Bartman, C. W. McFall, P. D. Christofides and Y. Cohen, Model-predictive control of feed flow reversal in a reverse osmo-sis desalination process”, *Journal of Process Control*, pp-433–442, Elsevier Ltd, vol. 19, 2009.
- B.D.H. Phuc, S. S. Y. Tae and H. S. Hwan, “Dynamical analysis and control synthesis of RO desalination process against waterhammering”, *Desalination*, pp. 133–142, vol. 402, 2017.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA nº 357, 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2005
- CABRERA, P., CARTA, J. A., GONZÁLEZ, J., MELIÁN, G., “Wind-driven SWRO desalination prototype with and without batteries: a performance simulation using machine learning models. *Desalination*, vol. 435, pp. 97-113, 2018.
- CARVALHO, P., MESQUITA, S., OLIVEIRA, R., OLIVEIRA JR., D., PONTES, R., RIFFEL, D., “Ministério de Minas e Energia. 2003. Projeto Cadastro da Infra-estrutura
- CARVALHO, P. C. M., “The Brazilian Experience With A Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2004, 12:373–385 (DOI: 10.1002/pip.543).
- Catálogo Técnico – Bombas de Diafragma, SHURFLOR, 2020.

Catálogo Técnico - Condutivímetro Portátil, TED EC Meter, PHTEK, 2021

Catálogo Técnico – Hidrofiltros, Refil Carbon Block Big, 2020.

Catálogo Técnico – Hidrofiltros, Refil Polipropileno 5, 2020.

Catálogo Técnico – Hidrofiltros, Refil Polipropileno 10, 2020.

Catálogo Técnico – Hidrofiltros, Resina Cationica, 2020.

Catálogo Técnico – USB-6001 National Instruments, 2020.

COELHO, A. A. R. Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares. 2ª Edição. Santa Catarina: Editora UFSC, 2016.

CURTO, D., FRANZITTA, V., GUERCIO., “A Review of the Water Desalination Technologies”. Applied Sciences. App. Sci. 2021, 11, 670. <https://doi.org/10.3390/app1120670>.

CIPOLINA, A., TEZEN, E., SUBIELA, V., PAPAPETROU, M., KOSCHIKOWSKI, J., SCHWANTES, R., WIEGHAUS, M., ZARAGOZA, G., “Renewable energy desalination: performance analysis and operating data of existing RES desalination plants”, Desalination and Water Treatment – Taylor & Francis Group, pp. 1-21, 2014, doi: 10.1080/194439954.2014.959734.

EKE, J., YUSUF, A., DIWA, A., SODIQ, A., “The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity”, Desalination, col 495, pp. 114-633, 2020.

ELDIN, A. H., ABED, K., YOUSSEF, K., KOTB, H., “Experimental Investigation of Energy Consumption and Model Identification of Reverse Osmosis Desalination System Fed by Hybrid Renewable Energy Source under Different Operating Conditions”, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, vol. 14, pp. 1409-1415, 2019.

FUNCEME., “Calendário das Chuvas no Estado do Ceará – Governo do Estado de Ceará”, 2016. Disponível em: <http://funceme.br/app/calendario/produto/regioes/media/anual?data=2003-1-1> (acesso em novembro de 2019).

FUNCEME., “Calendário das Chuvas no Estado do Ceará – Governo do Estado de Ceará”, 2016. Disponível em: <http://funceme.br/app/calendario/produto/regioes/media/anual?data=2004-1-1> (acesso em novembro de 2019).

FUNCEME., “Calendário das Chuvas no Estado do Ceará – Governo do Estado de Ceará”, 2019. Disponível em: <http://funceme.br/app/calendario/produto/regioes/media/anual?data=2017-1-1> (acesso em novembro de 2019).

FUNCEME., “Calendário das Chuvas no Estado do Ceará – Governo do Estado de Ceará”, 2019. Disponível em:
<http://funceme.br/app/calendario/produto/regioes/media/anual?data=2018-1-1> (acesso em novembro de 2019).

HAGUENAUER, G. M., SILVA, G. D. P., SHARQAWY, M. H., NETO, S. A., VIANA, D. B., FREITAS, M. A. V., “Current and Future Oportunities for Renewable Integrated Desalination Systems in Brazilian Semiarid Region. Desalination and Water Treatment”, 2019.

Hídrica do Nordeste: Estudo Estatístico de radiação solar visando o projeto de unidades de dessalinização acionadas por painéis fotovoltaicos sem baterias; 5o Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída – Campina”, 2004. (2019) 1343-1356. 2019.

Instruction Manual IFM - Flow Sensors, I. E. Sensor de fluxo SU7000, 2015

Instruction Manual IFM - Pressure Sensors, I. E. Sensor de pressão PN2024, 2015.

JONES, E., QADIR, M., VLIET, M. T. H. V., SMAKHTIN, V., KANG, S. M., “The state of desalination and brine production: A global outlook”. Science of the Total Environment. 657

MATTEN. More from less. By investing in good systems’ designs, 2021. Disponível em:
<https://www.mattenplant.com/reverse-osmosis-ro/ro-overview/process-designs/>. Acessado em: 17 out. 2021.

M. Alatiqi, A. H. Ghabris and S. Ebrahim, “System Identification and Control of Reverse Osmosis Desalination”, Desalination, pp. 119–140, vol.75, 1989.

MENDONÇA, D. E., Planta de Osmose Reversa Acionada por Módulos Fotovoltaicos com MPPT e Válvula Autoreguladora de Pressão, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL., “ONU: 4,5 Bilhões de Pessoas Não Dispõe de Saneamento Seguro no Mundo.”, 2017. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/onu-45-bilhoes-de-pessoas-nao-dispoem-de-saneamento-seguro-no-mundo/> (acesso em outubro de 2019).

NOGUEIRA, F. G., JUNIOR. C. T. C., FILHO, P. S. N., GOMES, M. C., JUNIOR. W. B., BARREIROS, J. A. L., MORAES, A. R. B., LANA, J. J., “ESTABILIZADOR DE SISTEMAS DE POTÊNCIA DIGITAL APLICADO A UMA UNIDADE GERADORA DA UHE DE TUCURUI”, Revista Controle & Automação, vol. 22 no. 5/ Setembro e Outubro, 2011.

NOGUEIRA, F. G, Desenvolvimento De Um Estabilizador De Sistemas De Potência Via Malha De Velocidade Aplicado À Uma Unidade Geradora De Ute De Santana. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Energia) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

OLIVEIRA, R. S. H., Planta Laboratorial de Dessalinização Via Osmose Reversa Alimentada por Energia Solar Fotovoltaica com ou sem Baterias, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011

Owner's Manual - High Flow 100 Gallons Per Day Drinking Water Element TW30- 1812-100, FILMTEC Membranes, 2010.

PHUC, B. D.H., YOU, S. S., LIM, T. W., KIM, H. S., “Dynamical analysis and control synthesis of RO desalination process against water hammering”, *Desalination* 402 (2017) 133-142, 2017.

RIFFEL, D. B., 2018. Unidade de Osmose Reversa acionada por Energia Solar Fotovoltaica sem Baterias, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005

ROGNONI, M. “La Dissalazione Dell’ acqua di Mare. Descrizione, Analisi e Valutazione Delle Principali Tecnologie” st ed, Dario Flaccovio Editore s.r.l Palermo, Italy, 2010, ISBN 9788857900308.

SUBRAMANI, A., JACANGELO, J. G., “Emerging desalination technologies for water treatment: A critical review”, Elsevier – Science Direct, vol. 75, pp. 164-187, 2015.

SILVA, W. F., SANTOS, I. F. S., BOTAN, M. C. C. O., SILVA, A. P. M., BARROS, R. M., “Reverse osmosis desalination plants in Brazil: A cost analysis using three different energy sources”, *Sustainable Cities and Society*, vol. 43, pp. 134-143, 2018.

STOUGHTON, K. L. M. M., DUAN, X., WENDEL, E. M., “Reverse Osmosis Optimization”, Federal Energy Management Program – U.S. Department of Energy, Washington, DC, 2013.

SOBANA, S., PANDA, R. C., “Modeling and control os reverse osmosis desalination process using centralized and decentralized techniques”, *Desalination*, vol. 344, pp. 243-251, 2014.

UN GENERAL ASSEMBLY., “Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development., A/RES/70/1”, 2015. Disponível em: <https://www.refworld.org/docid/57b6e3e44.html> (acesso em novembro de 2019).

WEIR, W. V., “The History of a Scottish Engineering Legend”, Profile Books: London, UK, 2008, ISBN 978-1861978868.