

# INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS

Fábio Rodrigo Freitas Mendes

# COMPARAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE ACIONAMENTO DE UNIDADE DE OSMOSE REVERSA ACIONADA POR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SEM BATERIAS

Fortaleza, Ceará

#### Fábio Rodrigo Freitas Mendes

# COMPARAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE ACIONAMENTO DE UNIDADE DE OSMOSE REVERSA ACIONADA POR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SEM BATERIAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pósgraduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em energias renováveis. Área de concentração: Energias Renováveis.

Prof. Dr. José Renato de Brito Sousa Orientador

#### Catalogação na Fonte

M538 Mendes, Fábio Rodrigo Freitas.

Comparação de estratégias de acionamento de unidade de osmose reversa acionada por módulos fotovoltaicos sem baterias / Fábio Rodrigo Freitas Mendes -- 2017.

92 f.

Dissertação (Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis) -- Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, campus Maracanaú, 2017.

Orientador: Prof. Dr. José Renato de B. Sousa.

1.BOMBEAMENTO DE ÁGUA. 2.DESSALINIZAÇÃO. 3.OSMOSE REVERSA. 4.ENERGIA - GERAÇÃO FOTOVOLTAICA I. Título.

621.252

Sistema AutoCata(Desenvolvido por Cledson Oliveira)
SIBI/PROEN - Biblioteca Rachel de Queiroz - IFCE-Maracanaú

#### FÁBIO RODRIGO FREITAS MENDES

# COMPARAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE ACIONAMENTO DE UNIDADE DE OSMOSE REVERSA ACIONADA POR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SEM BATERIAS

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

Aprovada em 30 / 0/ / 2017.

#### BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Renato de Brito Sousa (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Cláudio Marques de Sá Medeiros
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Auzuir Ripardo de Alexandria Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

irrestrito e a Fernanda Karoline	ancivalda minha mãe, pelo amor e minha esposa, pelo amor, compree momentos difíceis.	
irrestrito e a Fernanda Karoline	minha esposa, pelo amor, compree	
irrestrito e a Fernanda Karoline	minha esposa, pelo amor, compree	
irrestrito e a Fernanda Karoline	minha esposa, pelo amor, compree	
irrestrito e a Fernanda Karoline	minha esposa, pelo amor, compree	
irrestrito e a Fernanda Karoline	minha esposa, pelo amor, compree	
irrestrito e a Fernanda Karoline	minha esposa, pelo amor, compree	
irrestrito e a Fernanda Karoline	minha esposa, pelo amor, compree	

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela graça de conceder-me este momento muito importante na minha vida.

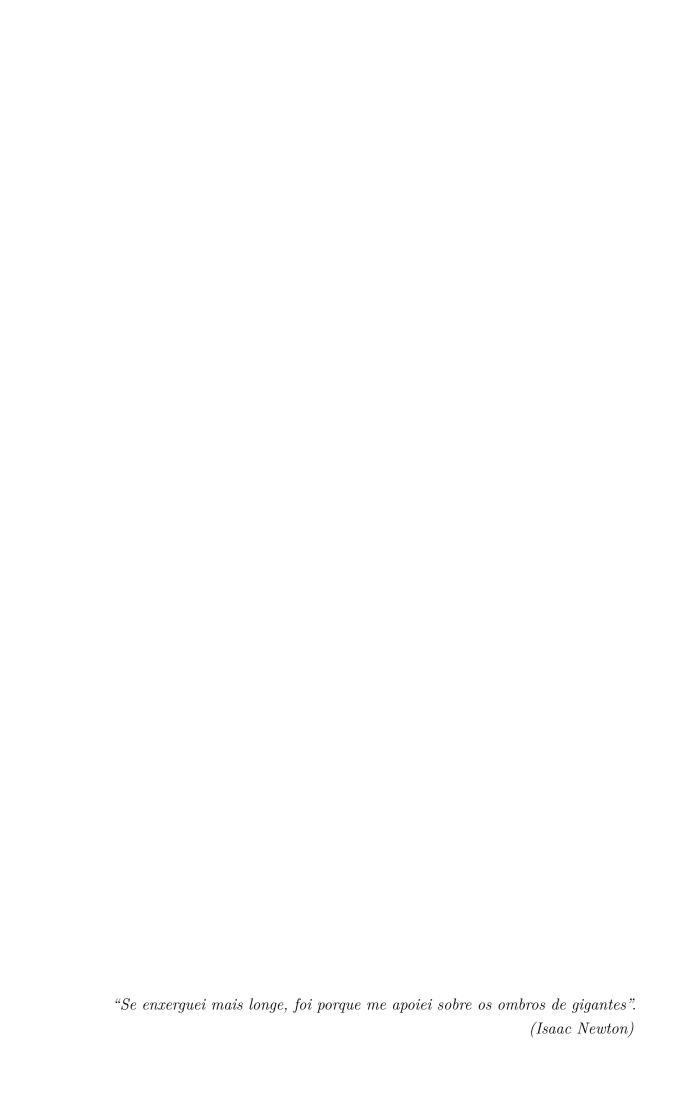
Ao meu orientador, professor José Renato de Brito Sousa, pela orientação no decorrer da dissertação, dedicação e amizade.

Ao meu coorientador, professor Cláudio Marques de Sá Medeiros, pelas importantes sugestões que contribuíram para a elaboração da dissertação.

Aos colegas de laboratório José Rogério Maciel, Igor Sousa, Rogério Segundo e todos os amigos e colegas que direta e indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

Agradecer a empresa Dancor, na figura de seu gerente comercial regional Wildemar Junior Moraes.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, pela infraestrutura oferecida.



# Resumo

O Semiárido brasileiro é uma região onde a água potável tem se tornado um recurso escasso, por conta dos baixos índices de precipitações. A exploração de água subterrânea, por meio de conjuntos de bombeamento, é uma solução. Porém, uma fração importante dos aquíferos dessa região apresenta uma salinidade elevada (acima de  $3.000 \ mq/L$ ), sendo que, de acordo com o Ministério da Saúde, o limite máximo permitido para sólidos totais dissolvidos é de 1.000 mg/L. Neste contexto, a tecnologia de Osmose Reversa (OR) surge como uma possível solução, visto que é a mais empregada no processo de dessalinização de água do mar e salobra, ou seja, que possuem níveis de salinidade acima daqueles permitidos. Em relação à energia elétrica para alimentar o sistema de bombeamento, para dessalinização, pode-se utilizar a tecnologia fotovoltaica (FV) para geração de energia elétrica, aproveitando dessa forma o vasto potencial de exploração encontrado na região. Neste trabalho foram comparadas estratégias de acionamento de um sistema de bombeamento para dessalinização de água por OR, com capacidade de produção de 15 a 20 L/h de água purificada, acionada por módulos FV e sem baterias. Nesse sistema são utilizados componentes comerciais como conversor de frequência de aplicação industrial, motor de indução trifásico, bomba centrífuga e membrana filtradora. O mesmo pode representar uma alternativa de suprimento de água potável à populações com problemas de salinização de reservatórios de água. O conversor de frequência foi conectado entre o arranjo FV e o grupo motobomba. Para controlar a operação do sistema, foi implementado um controlador Proporcional Integrador (PI) para atuar na frequência comandada. Os resultados obtidos confirmaram a eficácia do sistema, mesmo em condições críticas de irradiância solar, tanto para dessalinização como para bombeamento. Para uma salinidade de aproximadamente 1.030 mq/L a produção de água foi de 15 L/h com um fator de recuperação (FR) de 20,57 %, uma taxa de 93 % de retirada de sais e um consumo específico de  $4.4 \text{ kWh/m}^3$  de água dessalinizada, sendo esse último coerente com os valores obtidos tanto em experiências mundiais quanto nacionais.

Palavras-chaves: Bombeamento de Água; Dessalinização; Geração Fotovoltaica; Osmose Reversa.

# Abstract

The Brazilian semi-arid region is a region where drinking water has become a scarce resource due to the low rainfall rates. Exploration of groundwater by means of pumping sets is a solution. However, a significant fraction of aquifers in this region have a high salinity (above 3.000 mg / L), and according to the Ministry of Health, the maximum limit for total dissolved solids is 1,000 mq/L. In this context, Reverse Osmosis (RO) technology emerges as a possible solution, since it is the most used in the process of desalination of seawater and brackish, that is, they have levels of salinity above those allowed. In relation to the electric power to feed the pumping system, for desalination, photovoltaic (PV) technology can be used to generate electricity, taking advantage of the vast exploration potential found in the region. In this work, we compared the strategies for the activation of a pumping system for water desalination by RO, with a capacity of 15 to 20 L/h of purified water, driven by PV modules and without batteries. In this system are used commercial components such as industrial frequency inverter, three-phase induction motor, centrifugal pump and filtering membrane are used. The same can represent an alternative of supply of potable water to populations with problems of salinization of water reservoirs. The drive has been connected between the PV array and the motor pump unit. To control the operation of the system, an Integrative Proportional Controller (IP) was implemented to act on the controlled frequency. The results confirmed the effectiveness of the system, even under critical conditions of solar irradiance, both for desalination and for pumping. At a salinity of approximately 1,030 mg / L the water production was 15 L/h with a recovery factor (RF) of 20.57 %, a rate of 93 % of salt withdrawal and a specific consumption of  $4.4 \ KWh/m^3$  of desalinated water, the latter being consistent with the values obtained in both world and national experiments.

**Key-words**: Desalination; Photovoltaics; Water Pumping; Reverse Osmosis.

# Lista de ilustrações

Figura 1 –	Configuração básica de um dessalinizador
Figura 2 –	Localização do escudo cristalino na região do Semiárido brasileiro $\dots$ 26
Figura 3 –	Concentrações de STD em poços localizados na região do Semiárido
	brasileiro
Figura 4 –	Destilação convencional
Figura 5 –	Princípio da eletrodiálise
Figura 6 –	Diagrama esquemático do processo de OR
Figura 7 –	Capacidade instalada de purificação de água por meio de membranas e
	processos térmicos
Figura 8 –	Representação de um tipo de membrana de OR
Figura 9 –	Representação de um grupo motobomba
Figura 10 –	Curva $P/Q$ de um grupo motobomba
Figura 11 –	Sistema de bombeamento com grupo motobomba submerso 34
Figura 12 –	Estrutura de bandas de energia em (a) condutores, (b) semicondutores
	e (c) isolantes
Figura 13 –	Efeito FV
Figura 14 –	Curva I-V de um módulo de silício
Figura 15 –	Modelo elétrico de uma fotocélula real
Figura 16 –	Potência elétrica em função da tensão elétrica de uma célula FV de
	silício cristalino de 156 mm sob condições-padrão de ensaio 39 $$
Figura 17 –	Módulo FV comercial
Figura 18 –	Associação de células FV em série
Figura 19 –	Associação de células FV em paralelo
Figura 20 –	Influência da irradiância solar na curva I-V de uma célula de silício
	cristalino com temperatura de $25^{\circ}$ C
Figura 21 –	Influência da temperatura na curva I-V de célula de silício cristalino
	com irradiância solar de 1.000 $W/m^2$
Figura 22 –	Diagrama de blocos de um conversor de frequência
Figura 23 –	Ilustração do acoplamento entre o arranjo FV e o grupo motobomba $$ . $$ 43
Figura 24 –	Ilustração da topologia do conversor $boost$ clássico
Figura 25 –	Ilustração do acoplamento entre o arranjo FV e o grupo motobomba
	com conversor $boost$
Figura 26 –	Diagrama de blocos do sistema proposto
Figura 27 –	Curva de performance do grupo motobomba
Figura 28 –	Interface do sistema de aquisição de dados desenvolvido 50
Figura 29 –	Curva I-V do módulo FV SunEdson modelo SE-P265NPB-A4 52

Figura 30 –	Efeito da temperatura na curva I-V	53
Figura 31 –	Efeito da temperatura na curva P-V de potência	53
Figura 32 –	Sistema de dessalinização conectado à rede com tensão e frequência fixas	55
Figura 33 –	Variação de VC	56
Figura 34 –	Gráfico do Fator de Recuperação (FR) em função da posição de VC	56
Figura 35 –	Pressão em função da frequência	58
Figura 36 –	Fator de Recuperação (FR) em função da pressão	59
Figura 37 –	Potência aparente em função da frequência	59
Figura 38 –	Circuito de religamento do inversor de frequência	60
Figura 39 –	Sistema de bombeamento conectado ao arranjo FV	61
Figura 40 –	Avaliação do sistema de bombeamento conectado ao arranjo FV: (a)	
	Irradiância solar; (b) Vazão de entrada e tensão no barramento CC do	
	arranjo FV; (c) corrente do arranjo FV	62
Figura 41 –	Controlador PI do inversor de frequência	64
Figura 42 –	Divisor de tensão para obtenção do sinal de realimentação	65
Figura 43 –	Curva $V/f$ de controle escalar quadrático $\dots \dots \dots \dots \dots$	65
Figura 44 –	Exemplo de curva de reação	66
Figura 45 –	Tensão de entrada do inversor no momento da partida	67
Figura 46 –	Avaliação do sistema de bombeamento conectado ao arranjo FV com controlador PI: (a) Irradiância solar; (b) Vazão de entrada e tensão no	
	barramento CC do arranjo FV	68
Figura 47 –	Avaliação do sistema de bombeamento com 8 módulos FV: (a) Irradiância solar aquisitada; (b) Vazão de entrada e tensão no barramento CC	
	do arranjo FV	70
Figura 48 –	Bombeamento FV com inversor de frequência e conversor $boost$	71
Figura 49 –	Configuração do arranjo FV para ligar no conversor $boost$	72
Figura 50 –	Sinal de realimentação com conversor $boost$	73
Figura 51 –	Avaliação do sistema de bombeamento com conversor <i>boost</i> mais inversor de frequência: (a) Irradiância solar aquisitada; (b) Vazão de entrada e	
	tensão no barramento CC do inversor	74
Figura 52 –	Sistema de dessalinização FV com inversor de frequência	75
Figura 53 –	Avaliação do sistema de dessalinização FV com inversor de frequência: (a)	
	Irradiância solar aquisitada; (b) Tensão no barramento CC do inversor	-0
D: F4	e (c) Pressão na entrada do sistema	76
_	Local de instalação do sistema - IFCE - Campus Fortaleza	84
	Reservatório de água com o grupo motobomba	85
	Sensor de vazão e pressão	85
	Unidade de dessalinização	86
rıgura 58 –	Inversor de frequência	86

Figura 59 – Resultado da análise de água dessalinizada	87
Figura 60 – Circuito para medição de vazão e pressão	88
Figura 61 – Circuito para medição de tensão e corrente	89
Figura 62 – Trecho do manual da membrana de OR	90
Figura 63 – Trecho do manual do grupo motobomba Dancor	91
Figura 64 – Trecho do manual do inversor de frequência CFW-08	91
Figura 65 – Trecho do manual do módulo FV SunEdison - Modelo SE-P265NPB-A4	92

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores de pressão osmótica para vários níveis de salinidade	30
Tabela 2 – Consumo específico para diversos níveis de salinidade	31
Tabela 3 – Especificações do dessalinizador	47
Tabela 4 – Especificações do grupo motobomba	47
Tabela 5 – Especificações do inversor de frequência	48
Tabela 6 – Especificações do módulo FV	49
Tabela 7 – Especificações de módulos FV disponíveis no mercado	49
Tabela 8 – Sensores do sistema de aquisição de dados	51
Tabela 9 – Rendimentos do módulo FV para temperaturas diferentes	53
Tabela 10 – Fator de Recuperação (FR) em função da posição de VC	57
Tabela 11 – Comportamento do dessalinizador para frequência variável	58
Tabela 12 – Regra de determinação dos parâmetros de Ziegler-Nichols baseada na	
curva de reação	66
Tabela 13 – Rendimento sistema de bombeamento (inversor + grupo motobomba) .	69
Tabela 14 – Validação do sistema de dessalinização FV	77

# Lista de abreviaturas e siglas

MMA Ministério do Meio Ambiente

PRODEM Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios

SEINFRA Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará

PAD Programa Água Doce

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

CONAMA Concelho Nacional do Meio Ambiente

MPPT (Maximum Power Point Tracker) Rastreamento do Ponto de Máxima

Potência

CC Corrente contínua

CA Corrente alternada

CC/CA Corrente contínua para corrente alternada

CC/CC Corrente contínua para corrente contínua

OR Osmose reversa

MCC Modo de condução contínua

STD Sólidos totais dissolvidos

CV Cavalo vapor

STC (Standard Test Conditions) Condições Padrão de Teste

AM (Air mass) Massa de ar

DAQ (Data Acquisition) Sistema de aquisição de dados

VC Válvula de controle

FV Fotovoltaico

LPE Laboratório de Processamento de Energia

# Lista de símbolos

 $CE_e$  Consumo específico elétrico

 $CE_h$  Consumo específico hidráulico

 $CE_{id}$  Consumo específico ideal

 $C_a$  Concentração da água de alimentação

 $C_c$  Concentração da água do concentrado

 $C_p$  Concentração da água de permeado

 $C_s$  Concentração molar do sal

 $P_a$  Pressão de alimentação

 $P_p$  Pressão do permeado

 $P_c$  Pressão do concentrado

 $P_{sc}$  Pressão osmótica na saída do concentrado

 $Q_a$  Vazão de alimentação

 $Q_c$  Vazão do concentrado

 $Q_p$  Vazão do permeado

 $v_s$  Número de íons formados na dissolução do sal

 $\delta_m$  Espessura efetiva da membrana

 $\eta_{bomba}$  Rendimento da bomba

 $\eta_{motor}$  Rendimento do motor

 $\Delta P$  Pressão osmótica da água através da membrana

Π Pressão osmótica

 $I_{SC}$  Corrente de curto-circuito

 $I_{CC}$  Corrente contínua

 $I_{MP}$  Corrente de máxima potência

 $P_{MP}$  Potência máxima

 $V_{MP}$  Tensão de máxima potência

 $V_{OC}$  Tensão de circuito aberto

FR Fator de recuperação

 $P_f$  Pressão de filtração

R Constante universal dos gases

 $R_S$  Resistência em série

 $R_P$  Resistência em paralelo

Silício Silício

 $V_{CA}$  Tensão corrente alternada

 $V_{CC}$  Tensão corrente contínua

mca Metro de água

D Razão cíclica

G Ganho do conversor boost

# Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Justificativa	19
1.2	Objetivos	20
1.2.1	Objetivos específicos	20
1.3	Revisão da literatura	21
1.4	Publicações produzidas	<b>2</b> 3
1.5	Organização do texto	<b>2</b> 3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	Princípio básico de um dessalinizador	<b>2</b> 4
2.1.1	Água de entrada	24
2.1.2	Processos de Dessalinização	25
2.1.3	Fonte de energia	28
2.2	Dessalinização por OR	29
2.2.1	Equipamento de dessalinização	31
2.3	Tecnologia FV	35
2.3.1	Radiação solar	35
2.3.2	Efeito FV	35
2.3.3	Modelo elétrico de uma célula FV	37
2.3.4	Módulo solar FV	39
2.3.5	Associações de células e módulos FV	40
2.3.6	Parâmetros que influenciam a curva característica das células FV	41
2.4	Equipamentos de condicionamento de potência	42
2.4.1	Conversor de frequência	42
2.4.2	Conversor boost	44
3	DESCRIÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO	46
3.1	Materiais empregados no sistema proposto	46
3.2	Sistema de aquisição de dados	<b>5</b> 0
3.3	Ensaio do módulo FV	<b>5</b> 1
4	METODOLOGIA E RESULTADOS	55
4.1	Ensaio do sistema de dessalinização conectado à rede com ten-	
	são e frequência fixas	<b>5</b> 5
4.2	Ensaio do sistema de dessalinização conectado à rede com frequên-	-
	cia variável	57

4.3	Circuito de religamento do conversor de frequência	60
4.4	Avaliação do comportamento do sistema de bombeamento co-	
	nectado ao arranjo FV	60
4.5	Implementação do controlador	63
4.5.1	Parametrização do inversor de frequência	63
4.5.2	Rendimento do sistema de bombeamento	68
4.6	Avaliação do comportamento do sistema de bombeamento com	
	falhas nos módulos FV	69
4.7	Ensaio do sistema conectado ao arranjo FV com inversor de	
	frequência e conversor $boost$	<b>7</b> 1
4.8	Validação do sistema de dessalinização FV com inversor de	
	frequência	74
5	CONCLUSÕES	78
5.1	Trabalhos futuros	<b>7</b> 9
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICES	83
	APÊNDICE A-FOTOS	84
	APÊNDICE B – RESULTADO DA ANÁLISE DE ÁGUA DES- SALINIZADA	
	APÊNDICE C-CIRCUITOS AUXILIARES	88
	ANEXO A – TRECHOS DE MANUAIS	90

# 1 Introdução

O Brasil é um país privilegiado em relação à quantidade de água doce disponível, pois possui aproximadamente 13,7 % de toda a água do planeta. Porém, esse manancial não é distribuído de maneira uniforme em seu território nacional, sendo a região do Semiárido uma das áreas mais carentes desse recurso (MMA, 2017).

Nos últimos anos o semiárido brasileiro tem enfrentado uma grave situação, a escassez de água potável. Este contexto torna-se mais acentuado quando não existem políticas de preservação dos recursos naturais hídricos. Além da baixa dos grandes reservatórios ocasionada pelo baixo índice pluviométrico nos últimos cinco anos, ainda há contaminação dos rios e das fontes de captação de água potável.

Para amenizar estes problemas são utilizadas soluções tradicionais, tais como, construções de reservatórios (açudes, tanques, pequenas cisternas, caixas d'água, entre outros), carros pipas e a perfuração de poços artesianos para captar água subterrânea (LIMA, 2006).

Segundo Rosa (2013), o nordeste brasileiro possui um grande potencial de aproveitamento de mananciais subterrâneos, os quais representam uma alternativa para o fornecimento de água para a população do Semiárido, possuindo como características as vazões de poços individuais na média de 3  $m^3/h$ , em profundidades entre 40 e 80 m com reservas exploráveis de 43,1  $m^3/s$ , ou seja, cerca de 155.000  $m^3/h$ . Por conta disso, existe uma grande quantidade de poços tubulares perfurados na região. Porém, a maioria desses encontram-se fora de operação, por conta de diversos problemas, sendo que a qualidade da água em termos de salinidade é um dos principais.

Em termos geológicos, aproximadamente 70 % da região do Semiárido encontra-se sobre um escudo cristalino e os aquíferos nessa região caracterizam-se por uma baixa qualidade de suas águas para consumo humano, devido os altos teores de sais dissolvidos (ROSA, 2013).

As pesquisas na área de energias renováveis revelam que o estado do Ceará possui condições favoráveis à implantação de sistemas FV. Segundo a Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA), o interior cearense apresenta uma condição favorável como céu claro com mais de 3.000 horas de sol por ano, com índices de irradiação solar estimados entre 1.825 e  $2.230~kWh/m^2/ano$  (ROCHA, 2010).

Este cenário impulsiona a geração de eletricidade por meio de recursos renováveis, através de incentivos como: a baixa taxa de juros para financiamento a longo prazo e um conjunto de leis e regulamentos para implementação tanto de sistemas FV isolados como

de sistemas FV conectados à rede pública de distribuição (MITSCHER; RüTHER, 2012).

Como o interior do estado do Ceará é bastante rico em potencial energético para geração FV, o estudo da utilização da tecnologia de OR aliada à integração de energias renováveis torna-se bastante relevante.

Neste contexto, a tecnologia de OR torna-se uma possível solução, visto que, é a mais empregada no processo de dessalinização de água do mar e salobra, ou seja, que possuem níveis de salinidade acima daqueles permitidos pelo Ministério da Saúde (ARAúJO, 2013). Conforme Ghaffour et al. (2015), em uma escala global 68 % da água dessalinizada é produzida por processos de membrana (majoritariamente por OR) e 30 % por processos térmicos.

No Brasil a tecnologia de OR acoplada à fonte renovável de energia já é uma realidade. O que se observa nestes sistemas é que eles possuem equipamentos dedicados à tecnologia solar, como grupo motobomba CC e condicionadores de potência específicos e dedicados. De acordo com Melendez (2009), essa característica dificulta a troca ou a manutenção desses dispositivos, sendo uma saída para esse problema à utilização de componentes que já possuem tecnologia e mercado bastante consolidado no Brasil, que é o caso dos conversores de frequência de aplicação industrial e os motores de indução trifásicos, junto com bombas de múltiplos estágios.

Por tudo que foi exposto acredita-se que o interior do nordeste brasileiro, mais especificamente o estado do Ceará, possui extenso potencial a ser explorado na busca pela solução do problema de abastecimento de água potável às populações carentes desse recurso.

Neste trabalho é efetuada integração da tecnologia de filtração de sais da água, por meio de OR, com a tecnologia de geração de energia elétrica por módulos FV. Buscando dessa maneira uma solução alternativa para o problema do abastecimento de água potável.

#### 1.1 Justificativa

No Brasil já foram instalados diversos sistemas de bombeamento FV, sendo grande parte fruto de iniciativas isoladas, tendo como maior iniciativa o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEM), responsável pela implantação de 3.291 sistemas de bombeamento entre 1994 e 2002 (BRITO, 2006).

Outro programa destinado a auxiliar as comunidades carentes com problemas de salinidade na água foi o Programa Água Doce (PAD), consolidado em 2009, e responsável por instalar e recuperar diversos sistemas de dessalinização (ROSA, 2013).

Porém, uma análise da situação real dos projetos no campo mostra que muitos estão sem funcionar. Um exemplo dessa situação é um levantamento feito em 801 sistemas

de bombeamento instalados pelo PRODEM, onde foram registradas 337 ocorrências, sendo que 57 % dos problemas ocorreram no grupo motobomba, 41 % nos dispositivos de condicionamento de potência e apenas 2 % no módulo FV (ROSA, 2013).

O problema é que esses defeitos de natureza técnica levam muito tempo para serem solucionados. Em consequência estes equipamentos acabam por serem abandonados. Uma das possíveis causas para essa demora é que geralmente esses equipamentos são obtidos na forma de *kits* no mercado internacional, isso faz com que a reposição de peças seja um trabalho árduo e oneroso.

O potencial de exploração de água subterrânea e o uso da tecnologia FV para solucionar o problema de abastecimento de água, foram os elementos motivadores para o desenvolvimento deste trabalho.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é comparar diversas estratégias de acionamento de um sistema de bombeamento para dessalinização de água salobra proveniente de poços artesianos utilizando geração FV e sem baterias.

#### 1.2.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Construção do protótipo de um sistema de bombeamento para dessalinização de água por OR, com capacidade de produção de 15 a 20 L/h de água purificada, composto por arranjo FV, bomba centrífuga e motor de indução trifásico acionado por conversor de frequência de aplicação industrial.
- Determinação de parâmetros operacionais do sistema de OR, como pressão de trabalho, produção de água dessalinizada, fator de recuperação (FR) e consumo específico elétrico, por meio de ensaios em laboratório.
- Parametrização do conversor de frequência de aplicação industrial para que este atue na frequência comandada, com objetivo de manter o sistema operando o de máximo tempo possível.
- Validação experimental do controle do conversor de frequência e do sistema de dessalinização.

#### 1.3 Revisão da literatura

O estudo da tecnologia da filtragem de água por OR associada ao uso de energia renovável não é novo. Na literatura são encontrados diversos trabalhos relacionados a esse tema, com abordagens diferentes.

Em Montenegro (2001), é estudada uma unidade de dessalinização, por meio de OR, utilizando um motor CC para aplicar a pressão hidráulica na membrana. No entanto, após três meses em operação o mesmo veio a apresentar falhas, sendo necessária a substituição por um motor de indução trifásico. Com a substituição do motor de corrente contínua pelo de corrente alternada o consumo específico de energia por metro cúbico de água dessalinizada caiu em 84 %, trabalhando com FR de 25 %.

Esse tipo de motor é defendido também por Melendez (2009), que compara três sistemas de bombeamento FV, sendo dois dedicados a geração FV e um com motor de indução trifásico e inversor de frequência. Os resultados obtidos demonstram que o custo do volume bombeado para 30 m de altura manométrica total do sistema alternativo (composto por motor de indução trifásico e inversor de frequência) é 22 % menor do que o sistema dedicado Grandfos e 51 % mais econômico do que o sistema dedicado Solarjack.

Segundo Rosa (2013), os processos de dessalinização por meio de membranas vêm encontrando cada vez mais competitividade em relação ao outros processos de dessalinização, como a eletrodiálise e processos térmicos, visto que são cada vez maiores as aplicações desse método de tratamento.

A utilização dessa técnica de tratamento de água também é defendida por Riffel (2005), que estudou dois sistemas de alimentação de um dessalinizador sendo um composto por motobomba acoplado diretamente a 2 módulos FV de 55 Wp cada (Sistema 1) e outro com os mesmos componentes do sistema 1 acrescido de 1 módulo FV de mesma potência e um conversor CC-CC abaixador com seguidor de máxima potência entre o arranjo FV e a carga (Sistema 2). Os resultados obtidos expressam que o rendimento do sistema 2 é superior ao sistema 1, tendo em vista que o consumo específico de energia do sistema 2 foi de  $1,53~kWh/m^3$  enquanto que no sistema 1 o consumo específico foi de  $14,6~kWh/m^3$ .

Em Lima (2006), são estudadas as condições operacionais de um sistema de OR com capacidade de produção de 250 L/h de água dessalinizada alimentado por módulos FV. Para as salinidades de 2.000 e 5.000 mg/L foram obtidos valores de consumo específico entre 3,7 e 6,1  $kWh/m^3$ .

Araújo (2013) faz uma comparação entre a OR e destilação por MSF ("Multi-Stage Flash"). A conclusão é que a OR é a técnica, onde os impactes ambientais, os custos e o dispêndio energético são menores.

No estudo publicado por Ghaffour et al. (2015) é feita uma revisão sobre as

potencialidades e desafios na utilização de energias renováveis para dessalinizar água salobra. Um levantamento feito até 2014 mostra que em uma escala global 68 % da água dessalinizada é produzida por processos com membranas, dos quais a maioria é por OR, e 30 % por processos térmicos. O restante, cerca de 2 % é produzido por outras tecnologias.

A escolha pela tecnologia FV, para alimentar o sistema, se deu principalmente pelo vasto potencial de geração de energia por módulos FV existente na região. No entanto, outra fonte que também pode ser utilizada é a eólica. Em Latorre, Báez e Gotor (2015), é estudado o desempenho energético de uma usina de dessalinização, por meio de OR, operando com pressão e fluxo variável e alimentada por energia eólica. O consumo específico de energia obtido foi de 4,1 a 4,8  $kWh/m^3$  com um rendimento do sistema de 80 %.

Outra alternativa, pode ser a integração de mais de uma fonte de energia, ou seja, uma geração híbrida. Um estudo de caso de um sistema de geração híbrida, composto por energia solar e eólica, junto a tecnologia de OR, para provimento de água dessalinizada na Jordânia é descrito em Novosel et al. (2015). De acordo com os resultados obtidos a utilização da alternativa proposta pode aumentar a participação das fontes renováveis intermitentes em até 76 % até 2050.

Com a opção pela utilização do motor de indução, se faz necessária a introdução de um dispositivo que transforme a tensão CC disponibilizada pelos módulos em tensões alternadas e trifásicas. Em Brito (2006), é estudada a otimização do acoplamento entre os módulos FV e o motor de indução trifásico por meio de um conversor de frequência de uso industrial. Nesse estudo, são aplicadas técnicas de controle de forma a obter o melhor rendimento do conjunto.

Em Vitorino (2008), é apresentado um estudo sobre um sistema de bombeamento FV com motor de indução trifásico e sem baterias. Já em Vitorino (2012), é apresentada a otimização do processamento da energia em sistemas FV com dispositivo de condicionamento de potência monofásico.

Um estudo publicado por Khlifi (2015), defende que o sistema de bombeamento solar FV é um dos mais importantes na área de energia renovável, especialmente em áreas rurais, com dificuldade de acesso a rede elétrica. Por essa razão ele propõe um algoritmo para atuar no controle do grupo motobomba visando extrair o máximo de potência do arranjo FV.

Seguindo essa linha de estudo, em Ramech, Vasavi e Sirisha (2014), os autores estudam a aplicação do algoritmo de Maximum Power Point Tracker (MPPT) (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência) no dispositivo de acionamento do motor de indução trifásico, sendo que este pode ser usado para compor um grupo motobomba de um sistema de bombeamento FV. Em Rebei et al. (2015), os autores discutem a implementação de um MPPT em sistemas de bombeamento FV.

## 1.4 Publicações produzidas

Os estudos realizados para concepção desse trabalho também deram origem a dois artigos, sendo:

- Application of Industrial Frequency Converter in Water Pumping Systems Using Photovoltaic Solar Energy. Submetido a revista Latin America IEEE. Situação atual: Submetido.
- Photovoltaic Panels Based Pumping System: A Solution Without Batteries. Submetido a revista Latin America IEEE. Situação atual: Submetido.

## 1.5 Organização do texto

O trabalho é composto por cinco capítulos. O Capítulo 2 é dedicado a fundamentação teórica a respeito do processo de dessalinização de água aliada ao uso de tecnologia FV, bem como os dispositivos de condicionamento de potência que podem ser utilizados. O objetivo deste capítulo é preparar o leitor, com assuntos específicos, para compreender a metodologia de trabalho. Já no Capítulo 3 é apresentada a descrição do sistema de bombeamento proposto. No Capítulo 4 são apresentados a metodologia e os resultados obtidos na avaliação do sistema proposto. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

# 2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo são apresentados conceitos com intuito de preparar o leitor para compreender os métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Nas seções seguintes é apresentada a fundamentação teórica sobre o processo de dessalinização da água, tecnologia de geração de energia elétrica por meio de módulos FV e equipamentos de condicionamento de potência.

## 2.1 Princípio básico de um dessalinizador

Na Figura 1, pode-se observar os elementos que compõem a configuração básica de um dessalinizador. O dessalinizador basicamente é usado para separar a água salgada (do mar ou salobra) em dois fluxos de água: o primeiro é de água potável com baixa concentração de sal, também chamada de permeado; e o segundo chamado de rejeito ou concentrado que possui alta concentração de sal.

Fonte de energia

Agua de entrada

Dessalinização

Concentrado

Fonte: Autor, 2016

Figura 1 – Configuração básica de um dessalinizador

A seguir, cada um dos elementos destacados na Figura 1, como água de entrada,

## 2.1.1 Água de entrada

fonte de energia e dessalinização, são apresentados.

Quando se pretende usar água proveniente de poços, uma questão que deve ser analisada é o grau de salinidade da água, principalmente se estes poços forem perfurados em áreas costeiras ou em embasamento cristalino. A água consumida pelo ser humano deve conter sais minerais para cumprir corretamente seu importante papel fisiológico. No entanto, quando a concentração desses sais ultrapassa certo limite, a água passa a ser considerada imprópria para o consumo e sua ingestão pode causar sérios riscos à saúde (ROSA, 2013).

A Resolução do Concelho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), de número 357, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água, traz as seguintes classificações em relação à salinidade da água (CONAMA, 2005):

- 1. Água doce: Água com salinidade igual ou inferior a 0,5 % (500 mg/L).
- 2. Água salobra: Água com salinidade superior a 0,5 % (500 mg/L) e inferior a 30 % (30.000 mg/L).
- 3. Água salina: Água com salinidade igual ou superior a 30 % (30.000 mg/L).

Já em relação aos Sólidos Totais Dissolvidos (STD), o Ministério da Saúde estabelece como padrão de aceitação para consumo humano um limite máximo de  $1.000\ mg/L$  (BRASIL, 2011).

A região do Semiárido brasileiro encontra-se em grande parte sobre o escudo cristalino, que mesmo contendo baixo potencial hidrogeológico e com problemas de salinização, tem um papel muito importante no abastecimento de sua população rural.

A água captada é usada para consumo e uso nas atividades de pecuária, principalmente nas áreas mais afastadas dos sistemas de abastecimento e dos grandes reservatórios superficiais existentes na região (ROSA, 2013).

Na Figura 2, as áreas assinaladas com as cores rosa e laranja, que abrangem estados como CE, PI, BA, norte de MG, SE, AL, PE, PB E RN, compõem o domínio do escudo cristalino. A região destacada com a cor rosa representa a área desse domínio onde se encontram os maiores problemas de salinização das águas. A região do Semiárido que se sobrepõe ao escudo cristalino é de 701.000  $km^2$ , possuindo como características as vazões de poços individuais na média de 3  $m^3/h$ , em profundidades entre 40 e 80 m com reservas exploráveis de 43,1  $m^3/s$ , ou seja, cerca de 155.000  $m^3/h$  (ROSA, 2013).

Em Rosa (2013), é apresentado um levantamento da qualidade da água, em relação a salinidade encontrada em poços perfurados em terrenos cristalinos do Semiárido brasileiro. Neste levantamento foram cadastrados cerca de 15.338 poços dos quais apenas 25 % apresentam água considerada doce (com concentrações de SDT abaixo de 500 mg/L). Na Figura 3, pode-se observar que 75 % dos poços apresentam águas com teores de SDT acima do limite admitido pelos Ministério da Saúde. Portanto o estudo de um sistema que possa tratar essas águas para que se tornem apropriadas ao consumo humano é de suma importância.

## 2.1.2 Processos de Dessalinização

Dentre as principais formas utilizadas para dessalinizar a água, estão os processos térmicos e por membrana.

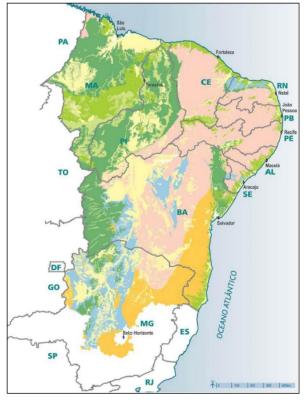
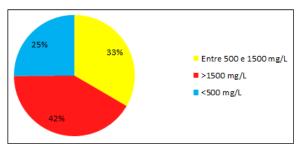


Figura 2 – Localização do escudo cristalino na região do Semiárido brasileiro

Fonte: Rosa (2013)

Figura 3 – Concentrações de STD em poços localizados na região do Semiárido brasileiro



Fonte: Adaptado de Rosa (2013)

De acordo com Araújo (2013), os processos térmicos são baseados na mudança de estado da água e, entre eles, pode-se destacar a destilação convencional, que baseia-se no aquecimento da água a ser dessalinizada que está em um reservatório coberto por uma cobertura transparente (vide Figura 4). A radiação solar aquece a água a uma temperatura superior a da cobertura e esse gradiente térmico, que somado com o gradiente associado à pressão do vapor dentro do destilador, provocam a evaporação da água e posterior condensação do vapor que escorre por canaletas até a coleta. Uma das desvantagens desse método é a necessidade de grandes áreas de exposição ao sol por litro de água dessalinizada.

Entre os processos de separação por membranas, segundo Araújo (2013), destacamse a eletrodiálise e a OR. O primeiro método se fundamenta na passagem da água por um

Condensação

Agua dessalinizada

Água salgada

Figura 4 – Destilação convencional

Fonte: Adaptado de Fonseca (2013)

recipiente contendo dois polos elétricos, além de sucessivas membranas semipermeáveis. Por meio da influência do campo elétrico, os íons positivos e negativos das moléculas de sal dissociadas migram para os respectivos polos sendo retirados da água pela ação das membranas. Segundo Levy (2008), esse processo só faz sentido para águas com concentrações de cloretos inferiores a  $2.000 \ mg/L$ , caso contrário, este processo torna-se dispendioso devido a quantidade de energia requerida. Uma ilustração desse processo pode ser visualizada na Figura 5.

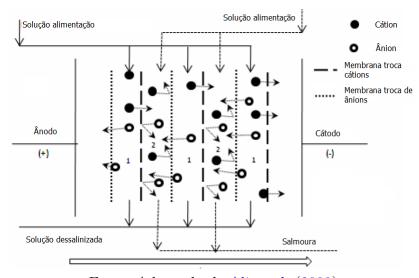


Figura 5 – Princípio da eletrodiálise

Fonte: Adaptado de Ali et al. (2009)

Já na OR, o processo consiste em extrair, por meio do uso de membranas semipermeáveis, a água potável da água salobra. De acordo com Lima (2006), na osmose direta, a água pura atravessa a membrana e dilui a salobra. Se não existir uma ação externa, a tendência é que ocorra um equilíbrio de concentrações (potencial químico) entre os dois

lados da membrana. Na Figura 6, é mostrado que o fluxo através da membrana gera uma diferença de altura entre os dois compartimentos. Esta diferença entre as alturas de cada lado, nos dá uma diferença de pressão que é denominada pressão osmótica. Para dessalinizar a água salobra, é necessário inverter esse processo por meios artificiais, neste caso com o uso de uma bomba submetendo uma pressão superior à pressão osmótica na água salobra que deseja-se dessalinizar.

Membrana
Semipermeável

= fluxo de soluto
= solução mais concentrada (hipertônica)
= solução menos concentrada (hipotônica)

Figura 6 – Diagrama esquemático do processo de OR

Fonte: Rosa (2013)

Segundo Rosa (2013), os processos de dessalinização por meio de membranas vêm encontrando cada vez mais competitividade em relação a outros processos de dessalinização, como a eletrodiálise e processos térmicos, visto que são cada vez maiores as aplicações desse método de tratamento. Isso implica na consequente redução contínua de custos causada pela maior escala de produção das membranas e pelo crescente desenvolvimento tecnológico.

Ghaffour et al. (2015), confirmam esta ideia quando mostram que em uma escala global até 2014, 68 % da água dessalinizada é produzida por processos com membranas, dos quais a maioria é por OR, e 30 % por processos térmicos. O restante, cerca de aproximadamente 2 % é produzido por outras tecnologias. A água produzida por dessalinização é dividida em 59 % de água do mar e 22 % a partir de fontes de águas subterrâneas salobras, e o restante a partir da água de superfície e águas residuais salinas.

O crescimento da capacidade de dessalinização em todo o mundo pode ser observado na Figura 7, onde a dessalinização térmica foi amplamente utilizada antes da década de 1990. A partir daí, a tecnologia usando membrana começou a ganhar popularidade.

#### 2.1.3 Fonte de energia

Com relação as fontes de energia têm-se diversas alternativas que podem ser utilizadas para produzí-la a fim de aplicá-la em sistemas de dessalinização. De acordo com Lima (2006), as fontes primárias usadas na produção de energia elétrica podem ser classificadas em renováveis e não renováveis. As não renováveis são aquelas passíveis de se esgotar por serem utilizadas com velocidade superior aos milhões de anos necessários

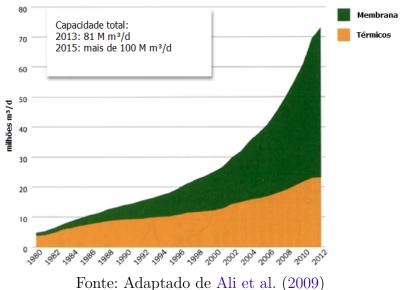


Figura 7 — Capacidade instalada de purificação de água por meio de membranas e processos térmicos

Polite. Adaptado de Ali et al. (2009)

para sua formação, como exemplo tem-se o petróleo, os combustíveis radioativos e o gás natural.

Por outro lado, as fontes renováveis são aquelas com reposição bem mais rápida que sua utilização energética, como a água dos rios, marés, sol e ventos, ou que o manejo pelo homem pode ser efetuado de forma compatível com as necessidades de sua utilização energética. Tais fontes podem ser usadas para produzir energia elétrica, principalmente através de usinas hidrelétricas, eólicas, centrais térmicas e solar FV.

Nas seções seguintes são apresentados de forma mais específica assuntos referentes ao processo de dessalinização da água, por meio da OR, aliada à energia obtida por módulos FV, visto que esse é o tema central do trabalho.

## 2.2 Dessalinização por OR

Como discutido na Seção 2.1.2, o processo de OR consiste em extrair, por meio do uso de membranas semipermeáveis, a água potável da água salobra, através da aplicação de uma pressão superior à pressão osmótica, sob a membrana semipermeável.

A pressão externa deve superar, além da pressão osmótica, a resistência da membrana, a resistência da zona de concentração-polarização e as resistências internas do equipamento (o termo concentração-polarização refere-se ao gradiente de concentração de materiais rejeitados pela membrana perpendicular ao fluxo transmembrânico, aumentando a resistência à passagem de água pelo aumento da pressão osmótica). As pressões reais de operação são, portanto, bastante elevadas em relação à pressão osmótica da solução (LIMA, 2006).

Com a equação de Van't Hoff (Equação 2.1) pode-se calcular a pressão osmótica ( $\Pi$ ) de um sal em águas doces e salobras.

$$\Pi = v_S.C_S.RT \tag{2.1}$$

Onde:

- $v_S$  representa o número de íons formados na dissolução do sal  $(N_aCl=2)$ ;
- $C_S$  é a concentração molar do sal (mg/L);
- R é a constante universal dos gases (J/mol.K);
- T é a temperatura absoluta (°C).

Na Tabela 1, são mostrados os valores assumidos de pressão osmótica para alguns índices de concentração molar do sal a partir da Equação 2.1.

Tabela 1 – Valores de pressão osmótica para vários níveis de salinidade

Concentração molar do sal - $C_S$ $(mg/L)$	Pressão osmótica - $\Pi$ (MPa)
1.000	0,085
2.000	0,171
3.000	0,256
4.000	0,341
5.000	0,426

Fonte: Adaptado de Lima (2006)

O Fator de Recuperação (FR) do sistema de OR, que é a relação entre a vazão do permeado  $(Q_p)$  e a vazão de alimentação (Qa), é determinado utilizando a Equação 2.2. Este pode variar entre 0 e 1.

$$FR = \frac{Q_p}{Q_a} = \frac{Q_p}{Q_p + Q_c} \tag{2.2}$$

O consumo específico de energia  $(CE_e)$  pode ser calculado a partir do consumo específico hidráulico (CEh), já que, este calcula o trabalho hidráulico na entrada da unidade de OR (vide Equação 2.3).

$$CE_e = \frac{CE_h}{\eta_{motor} \cdot \eta_{homba}} \tag{2.3}$$

Sendo  $\eta_{motor}$  e  $\eta_{bomba}$  os rendimentos do motor e da bomba, respectivamente.

Na Tabela 2, são apresentados os valores de consumo específico hidráulico  $(CE_h)$  consumo específico ideal  $(CE_{id})$  para diversas concentrações de sais na água de alimentação.

Salinidade de entrada $(mg/L)$	$CE_h (kWh/m^3)$	$CE_{id} (kWh/m^3)$
1.000	0,33	0,0166
2.000	0,66	0,0332
3.000	0,99	0,0497
4.000	1,32	0,0663
5.000	1,65	0,0829

Tabela 2 – Consumo específico para diversos níveis de salinidade

Fonte: Adaptado de Lima (2006)

### 2.2.1 Equipamento de dessalinização

A seguir são apresentados conceitos referentes ao conjunto responsável por dessalinizar a água por meio de OR.

#### Membranas

Uma membrana de OR consiste, basicamente, de um filme que separa duas soluções de diferentes concentrações de sólidos dissolvidos. No entanto, para iniciar o transporte do líquido, é necessário uma pressão externa superior à pressão osmótica, gerada naturalmente pela diferença de concentração entre as soluções. O processo não requer nenhuma transformação química ou biológica, dependendo somente do tamanho dos poros para alterar a seletividade (RIFFEL, 2005).

De acordo com Riffel (2005), a tecnologia utilizada na síntese de filmes de porosidade controlada é dominada pelos polímeros orgânicos, podendo-se destacar três gerações distintas de membranas.

- Membranas sintéticas com poros regulares que atravessam toda a espessura da membrana: A baixa resistência mecânica e a baixa produtividade são os seus principais problemas;
- 2. Membranas assimétricas ou anisotrópicas: caracterizam-se por possuir uma fina película filtrante sobre um único tipo de polímero sobre uma estrutura mais grossa e porosa, sendo responsável pela estabilidade mecânica do conjunto. Essas membranas têm como vantagem a redução do consumo de energia se comparada com a primeira, isso devido à redução na espessura da película filtrante e consequente diminuição da resistência à filtração;
- 3. Membranas com diferentes polímeros, na qual possibilita a diminuição da espessura da película filtrante, entre 0,1  $\mu$ m a 0,5  $\mu$ m. Essas medidas reduziram ainda mais o consumo energético, bem como elevaram a resistência mecânica.

As membranas são comercializadas em módulos, sendo eles compostos por estruturas de suporte mecânico e vias que transportam tanto o permeado como o rejeito ou concentrado, com o objetivo de limitar o acúmulo de material e otimizar a superfície de contato sem contaminar o permeado com o concentrado.

Em seguida, na Figura 8, são apresentados os elementos que compõem uma membrana de OR. A água de alimentação se divide em dois fluxos, sendo o permeado composto pela água que atravessou a membra e o concentrado que é o remanescente que não passou pela membrana.

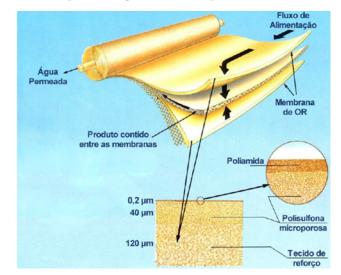


Figura 8 – Representação de um tipo de membrana de OR

Fonte: Adaptado de Riffel (2005).

#### Manutenção das membranas

À medida que o sistema vai operando, os sais da água tendem a obstruir a membrana. De acordo com Lima (2006), essa tendência é um dos parâmetros de projeto mais importantes em sistemas de membranas e pode ser indicada por meio de índices de fouling (formação gelatinosa verificada nas canalizações de água potável, em virtude da ação de microrganismos). A polarização de concentração provoca a diminuição inicial do fluxo de permeado e o fouling, sendo resultado do acúmulo de material sobre a superfície da membrana, reduzindo o fluxo ao longo do processo.

Uma solução para esse problema é a retrolavagem, que por sua vez remove as incrustações da superfície da membrana. É importante ressaltar que a retrolavagem reduz a produtividade do sistema, pois durante a sua aplicação o sistema está impossibilitado de produzir permeado.

Em sistemas de OR, os ciclos de manutenção são indicados quando for atingido um dos seguintes parâmetros (SCHNEIDER; TSUTIYA, 2001):

- 1. Diminuição do fluxo normalizado em cerca de 10 %;
- 2. Aumento da pressão em 15 %;
- 3. Aumento da passagem de sais normalizados em 5 %.

#### Grupo motobomba

Para que a OR possa acontecer, faz-se necessária a utilização de uma pressão hidráulica como força motriz para promover a separação, logo uma bomba deve manter uma elevada pressão da água a ser dessalinizada, forçando a passagem da água através da membrana, que por sua vez tem a função de reter os solutos em suspensão.

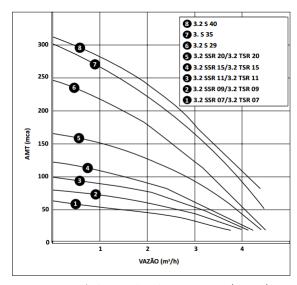
O conjunto responsável por produzir a pressão hidráulica necessária para promover a passagem da água pela membrana é denominado grupo motobomba, sendo este formado pelo acoplamento entre um motor elétrico e uma bomba que pode ser do tipo centrífuga ou de deslocamento positivo. Uma ilustração desse conjunto pode ser observada na Figura 9. Um exemplo da curva pressão/vazão (P/Q) de um grupo motobomba submerso pode ser visto na Figura 10.

Figura 9 – Representação de um grupo motobomba



Fonte: Adaptado de Melendez (2009)

Figura 10 – Curva P/Q de um grupo motobomba



Fonte: Adaptado de Dancor (2016)

Na Figurara 11, é mostrado um exemplo de um sistema de bombeamento com grupo motobomba submerso. Neste exemplo a água é bombeada do poço para um reservatório

para posterior utilização. Neste caso a alimentação do grupo motobomba foi feita por módulos FV.



Figura 11 – Sistema de bombeamento com grupo motobomba submerso

Fonte: Adaptado de Melendez (2009)

As bombas centrífugas trabalham convertendo a energia potencial da água em energia cinética de rotação, transformando essa velocidade do fluido dentro das bombas em energia de pressão, fazendo com que esse fluido atinja cotas mais elevadas (MELENDEZ, 2009).

Já nas bombas de deslocamento positivo, não há troca de energia interna na massa líquida. O fluido sofre uma pressão interna e, por estar confinado, desloca-se de uma posição estática para outra mais elevada. A vazão é proporcional à velocidade do acionador da máquina como pode ser observado na Equação 2.4 (MELENDEZ, 2009).

$$\frac{Q_1}{N_1} = \frac{Q_2}{N_2} \tag{2.4}$$

Sendo: Q a vazão e N a rotação.

Os motores elétricos são equipamentos cuja finalidade é converter energia elétrica em energia mecânica. De acordo com sua fonte de alimentação eles podem ser classificados em: motores de corrente contínua e de corrente alternada.

Os motores de corrente contínua são utilizados em aplicações de bombeamento alimentados por energia proveniente de módulos FV, já que exigem para seu funcionamento uma fonte de corrente contínua. Eles geralmente são acoplados diretamente ao arranjo FV,

mediante um dispositivo de controle. Um dos principais motivos pelos quais estes estão deixando de ser competitivos em relação aos motores de corrente alternada está no seu alto custo inicial, ficando sua aplicação restrita a sistemas de bombeamento de pequenas potências (potências inferiores a 400  $W_p$ ) (FEDRIZZI, 2003). Outra desvantagem deste tipo de motor é o custo de manutenção superior ao do motor de corrente alternada.

Em função da distribuição de energia, pelas concessionárias, ser realizada em corrente alternada, os motores de corrente alternada são mais difundidos. Devido o grande número de aplicações e menores preços, os motores de corrente alternada são amplamente utilizados em sistemas FV de bombeamento, sendo geralmente empregados em sistemas submersos. Para essa configuração é necessária a introdução de um inversor de frequência.

## 2.3 Tecnologia FV

A seguir, são abordados os conceitos básicos referentes ao processo de obtenção de energia elétrica, por meio de módulos FV.

#### 2.3.1 Radiação solar

A radiação solar pode ser vista como uma radiação eletromagnética, proveniente do Sol, que se propaga pelo espaço, no qual se observa aspectos ondulatórios e corpusculares. Em termos de comprimento de onda, a radiação solar ocupa a faixa espectral de 0,1  $\mu m$  a 5,0  $\mu m$ , tendo densidade máxima espectral de 0,55  $\mu m$ , que é a luz verde (LIMA, 2006).

De acordo com a incidência no meio material a energia solar pode ser refletida, transmitida e absorvida. A parte absorvida dá origem aos processos de:

- 1. Fotoconversão: processo que converte diretamente a energia solar em energia elétrica.
- 2. Termoconversão: a energia se converte primeiramente em calor para em seguida ser transformada em energia elétrica.

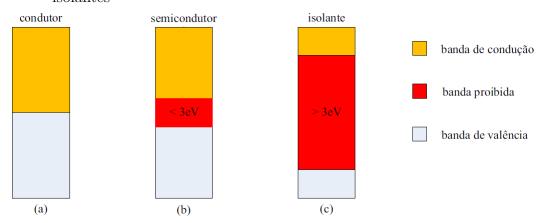
Neste trabalho a fotoconversão será abordada com maior enfoque, visto que, faz parte do estudo.

#### 2.3.2 Efeito FV

A geração FV utiliza as características dos materiais semicondutores em relação às suas bandas de energia – banda de condução, banda de valência e banda proibida. O comportamento elétrico dos sólidos depende diretamente da configuração de suas bandas de energia e das características da banda proibida. A banda de valência é o mais alto dos intervalos de energia eletrônica que seriam preenchidos pelos elétrons à temperatura de

zero absoluto. A banda de condução é o próximo intervalo de energia eletrônica permitido acima da banda de valência e onde os elétrons são considerados livres. A banda proibida é o intervalo entre a banda de valência e a banda de condução e que não pode ser ocupada pelos elétrons. Na Figura 12, está representada a estrutura destas bandas de energia e como elas determinam se um material é condutor, semicondutor ou isolante (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 12 – Estrutura de bandas de energia em (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolantes



Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014)

Nos semicondutores a banda proibida é bem pequena de maneira que bastam pequenas quantidades de energia térmica ou mesmo excitação causada por um fóton para promover elétrons livres à banda de condução (PINHO; GALDINO, 2014).

A energia elétrica é obtida por células solares que transformam a energia da luz solar diretamente em eletricidade por meio do efeito FV. Na Figura 13, é mostrado que o efeito FV é um processo pelo qual a luz do sol atinge uma célula solar e logo é absorvida pelo material semicondutor, que neste caso é o Silício (Si) cristalino. Os fótons presentes na luz solar se chocam com os átomos e então fornecem energia suficiente para que os elétrons se desprendam, permitindo-lhes fluir livremente através do material para produzir eletricidade em corrente contínua (CC) (HAMILTON, 2011).

Segundo Hamilton (2011), o semicondutor mais empregado para a fabricação de módulos FV é o Silício (Si). Este é dopado com elementos doadores de elétrons, como o fósforo (dopante N) e elementos receptores de elétrons, como o boro (dopante P) e arranjados em células FV de maneira a formarem uma junção P-N e, consequentemente uma diferença de potencial. O semicondutor que recebe o dopante N possui elétrons fracamente ligados, de tal forma que o fornecimento de pouca energia possibilita a geração de elétrons livres que, com a presença de condutores ligando as duas partes, geram uma corrente elétrica contínua. Essas células são dispostas em módulos de maneira a se obter níveis de tensão e corrente desejados. Um arranjo FV é constituído pelo conjunto de módulos, conexões, proteções, suporte, etc.

Revestimento anti-reflexo
Silício tipo - N (P+)
Silício tipo - P (B-)
Eletrodo traseiro (+)

Figura 13 – Efeito FV

Fonte: Adaptado de Hamilton (2011)

#### 2.3.3 Modelo elétrico de uma célula FV

O modelo elétrico de uma célula FV é uma representação matemática da célula FV real. Sua utilização é necessária, quando pretende-se realizar simulações virtuais do comportamento da célula para condições diversas de funcionamento.

De acordo com Pinho e Galdino (2014), a corrente elétrica em uma célula FV (I) pode ser representada como a soma da corrente fotogerada ( $I_L$ ) com a corrente de saturação reversa do diodo ( $I_O$ ). Esta corrente em função da tensão é denominada de curva I-V ou curva característica. Ela pode ser descrita pela Equação 2.5.

$$I = I_L - I_O \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right]$$
 (2.5)

Onde:

n - Fator de idealidade do diodo, número adimensional que varia entre 1 e 2, obtido por ajuste de dados experimentais medidos;

q - Carga do elétron  $(1, 6.10^{-19} \ J/K)$ ;

k - Constante de Boltzmann (1, 38.10<sup>-23</sup> J/K);

T - Temperatura da célula (K).

A corrente de saturação reversa  $(I_O)$  pode ser calculada pela Equação 2.6.

$$I_O = q.A.n_1^2. \left(\frac{D_p}{L_p.N_d} + \frac{D_n}{L_p.N_a}\right)$$
 (2.6)

Sendo:

 $I_O$  - Corrente de saturação reversa do diodo (A);

A - Área da seção reta de junção (área da célula);

 $n_i$  - Concentração de portadores intrínsecos no material;

 $N_d,\,N_a$ - Concentração dos dopantes tipo ne tipo p, respectivamente;

 $D_p, D_n$  - Coeficientes de difusão de lacunas e elétrons, respectivamente no material;

 $L_p, L_n$  - Comprimento de difusão de lacunas e de elétrons;

q - Carga do elétron  $(1, 6.10^{-19} \ J/K)$ .

Na Figura 14, é apresentada a curva I-V típica de uma fotocélula de (Si), para uma irradiância de 1.000  $W/m^2$ .

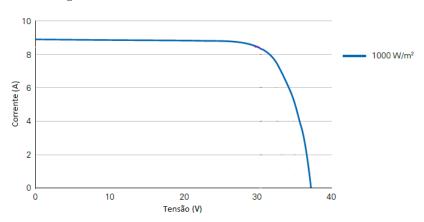
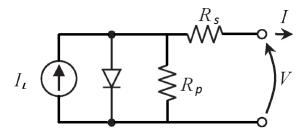


Figura 14 – Curva I-V de um módulo de silício

Fonte: Adaptado de SunEdison (2015)

Segundo Pinho e Galdino (2014), uma célula real diferencia-se de uma ideal por apresentar perdas, como a resistência em série e paralelo inseridas no modelo ideal. As perdas por resistência em série se dão pela resistividade do corpo do material, a resistência da lâmina da camada difundida e a resistência dos contatos metálicos. Já as perdas em paralelo se devem aos defeitos da junção. Por meio da Figura 15, pode-se observar o modelo elétrico de uma célula FV real com as referidas perdas em série  $(R_S)$  e em paralelo  $(R_P)$ .

Figura 15 – Modelo elétrico de uma fotocélula real



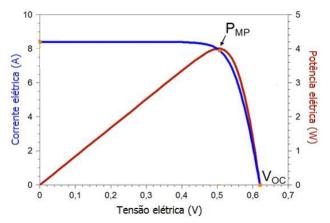
Fonte: Adaptado de Cristaldi et al. (2012)

Dessa forma a Equação 2.5 da curva característica de uma célula FV passa a ser:

$$I = I_L - I_O \left[ \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_P}$$
 (2.7)

A partir dos dados da curva I-V, a curva da potência em função da tensão pode ser determinada, sendo esta denominada curva P-V. Um exemplo desta curva pode ser visto na Figura 16, onde o ponto  $P_{MP}$  representa o ponto de máxima potência, representando aquele na qual a sua derivada em relação à tensão é nula  $\left(\frac{d_P}{d_V}=0\right)$  (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 16 – Potência elétrica em função da tensão elétrica de uma célula FV de silício cristalino de 156 mm sob condições-padrão de ensaio

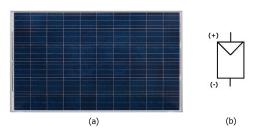


Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014)

#### 2.3.4 Módulo solar FV

A célula FV de Si produz uma tensão de circuito aberto de 0.5 - 0.7  $V_{CC}$ , porém esse valor é muito pequeno, por esse motivo são agrupadas diversas células interligadas entre si para gerar tensão de circuito aberto e correntes maiores. A estrutura que comporta esse arranjo denomina-se módulo solar FV. Um exemplo de um módulo FV comercial e sua simbologia são mostrados na Figura 17 (a) e (b), respectivamente.

Figura 17 – Módulo FV comercial



Fonte: Adaptado de Canadian Solar (2016) e Pinho e Galdino (2014)

De acordo com Pinho e Galdino (2014), o material mais empregado na produção de células FV é o Si (monocristalino ou policristalino) chegando a dominar 87,9 % do mercado mundial. As outras tecnologias comercializadas são baseadas em filmes finos de telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS), silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), silício microcristalino ( $\mu$ c-Si) e silício crescido em fitas (Si-fitas).

#### Parâmetros elétricos

A partir da curva I-V na Figura 14, podem ser determinados os parâmetros elétricos que caracterizam os módulos FV como: tensão de circuito aberto e máxima potência, corrente de curto-circuito e máxima potência e eficiência.

- 1.  $V_{OC}$ : Representa a tensão de circuito aberto, observada quando não há uma carga conectada ao módulo e que varia inversamente com a temperatura a uma taxa de 2,3  $mV/^{\circ}C$  por célula;
- 2.  $I_{SC}$ : Representa a corrente de curto-circuito, obtida nos terminais do módulo ligados e varia diretamente com o nível de irradiação;
- 3.  $V_{MP}$ : É o valor da tensão em máxima potência;
- 4.  $I_{MP}$ : É o valor da corrente em máxima potência;
- 5.  $\eta$ : Representa a eficiência do módulo.

### 2.3.5 Associações de células e módulos FV

As células e os módulos FV podem ser associados em série e/ou em paralelo, com intuito de obter os níveis de corrente e tensão desejados.

O comportamento da curva I-V quando os dispositivos FV, iguais e em mesmas condições ambiente, são ligados em série e paralelo está representado nas Figuras 18 e 19, respectivamente.

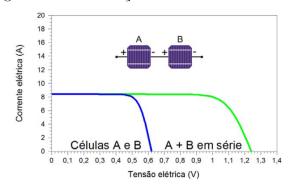


Figura 18 – Associação de células FV em série

Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014)

Figura 19 – Associação de células FV em paralelo

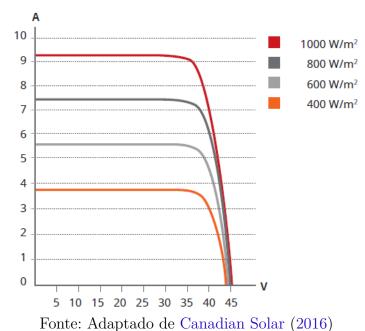
Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014)

#### 2.3.6 Parâmetros que influenciam a curva característica das células FV

Os principais fatores que afetam o desempenho das células FV são a irradiância incidente e sua distribuição espectral, bem como a temperatura de operação da célula.

Na Figura 20, pode-se observar como a irradiância solar incidente influência a curva I-V de uma célula FV de silício mantida a 25 °C . A corrente elétrica fornecida pela célula aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente, enquanto que a tensão de circuito aberto  $(V_{OC})$  praticamente não se altera.

Figura 20 – Influência da irradiância solar na curva I-V de uma célula de silício cristalino com temperatura de  $25^{\circ}\mathrm{C}$ 



Já na Figura 21, têm-se diversas curvas I-V para várias temperaturas da célula FV, com irradiância fixa de 1.000  $W/m^2$ . Por meio desta figura, pode-se constatar que com o aumento da temperatura, os valores de tensão de circuito aberto  $V_{OC}$  diminuem, enquanto que a corrente praticamente não se altera.

A
10
9
8
45°C
45°C
65°C
7
6
5
10
15
20
25° 0
40
45° 0
40
45° 0
40
45° 0
40
45° 0
40
45° 0
40
45° 0
40
45° 0
40
45° 0
40
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0
45° 0

Figura 21 – Influência da temperatura na curva I-V de célula de silício cristalino com irradiância solar de 1.000  $W/m^2$ 

Fonte: Adaptado de Canadian Solar (2016)

### 2.4 Equipamentos de condicionamento de potência

Os equipamentos de condicionamento de potência têm a função de adequar os níveis de tensão e corrente gerados com os exigidos pela carga. A seguir, são descritos dois equipamentos de condicionamento de potência, sendo o primeiro um conversor de frequência de aplicação industrial e o segundo um conversor CC-CC tipo boost.

#### 2.4.1 Conversor de frequência

Neste trabalho o grupo motobomba é composto por uma bomba centrífuga acoplada ao motor de indução trifásico, este por sua vez deve ser alimentado com corrente alternada (CA). No entanto, os módulos FV fornecem energia em corrente contínua (CC). Por esta razão, é necessária a introdução de um dispositivo que condicione a tensão disponibilizada pelos módulos a que é necessária ao motor de indução. O equipamento utilizado para realizar esse condicionamento da tensão é o conversor de frequência de aplicação industrial.

Os conversores de frequência geralmente são utilizados conectados à rede, alimentados por energia em CA. Nesse trabalho quando essa situação ocorrer o equipamento será denominado conversor de frequência. No entanto, eles também podem ser utilizados em sistemas de CC, sendo denominados de inversores de frequência. Um diagrama de blocos de um conversor de frequência genérico pode ser visto na Figura 22. A área indicada pelo algarismo 1 é o barramento CC do inversor. É neste ponto que os módulos podem ser ligados.

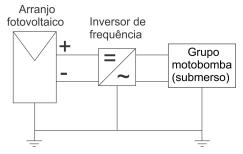
R T Interface de comunicação série RS485 I H M 0-10 V C Analógico P A/D U I/O IGRT's Digital W U

Figura 22 – Diagrama de blocos de um conversor de frequência

Fonte: Adaptado de Brito (2006)

Na Figura 23, é apresentada uma configuração, onde o arranjo FV está conectado diretamente ao inversor de frequência e este ao grupo motobomba.

Figura 23 – Ilustração do acoplamento entre o arranjo FV e o grupo motobomba



Fonte: Adaptado de Brito (2006)

O conversor de frequência também pode ser utilizado para controle de velocidade de motores de indução trifásicos. Segundo Brito (2006), o conversor de frequência fornece um sistema trifásico de tensão e frequência variáveis a partir da tensão e frequência constantes da rede. Logo, a função do conversor passa a ser de regular a velocidade do motor elétrico mantendo seu torque constante ou variável. Como se observa na Equação 2.8, ao variar a frequência de alimentação, a velocidade de rotação, assumindo que p seja fixo, varia na mesma proporção. Em que N representa a rotação do motor em rpm; f é a frequência em Hz e p é o número de polos do motor de indução.

$$N = 120.\frac{f}{p} \tag{2.8}$$

De acordo com Brito (2006), os conversores de frequência são dotados de dois métodos de controle de velocidade, que podem ser empregados no acionamento de diferentes tipos de carga.

- 1. Controle escalar V/f: É normalmente usado em aplicações a torque constante ou variável. O conversor com este tipo de controle pode atuar na velocidade de rotação do motor com uma precisão de até 0,5 % da rotação nominal para sistemas sem variação de carga, e de 3 a 5 % com variação de carga de 0 a 100 % do torque nominal. Por esta razão, o conversor de frequência escalar é mais adotado em sistemas que não demandam alto rendimento. Mas tem como vantagem um custo relativamente menor se comparado a conversores mais sofisticados;
- 2. Controle vetorial: Também é utilizado em aplicações a torque constante, porém sua utilização se justifica quando é desejado obter uma alta performance dinâmica, respostas rápidas e alta precisão de regulação de torque e velocidade para uma faixa extensa de condições de operação. No entanto, sua utilização necessita que se conheça ou calcule parâmetros específicos do motor como: resistência do estator e do rotor, indutância do rotor, entre outros.

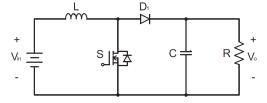
Portanto, o conversor de frequência pode ser utilizado para acionamento tanto de cargas que necessitam de torque constante (bombas de deslocamento positivo), quanto das que necessitam de torque variável (bombas centrífugas) (BRITO, 2006).

#### 2.4.2 Conversor boost

O conversor boost é um conversor eletrônico CC-CC elevador. Sua aplicação, em sistemas FV, se faz necessária quando se deseja ter uma tensão de saída maior do que a fornecida por banco de baterias ou arranjos FV.

O conversor *boost* clássico é a estrutura eletrônica mais básica para esse tipo de conversor. Na Figura 24 é ilustrada a topologia do mesmo.

Figura 24 – Ilustração da topologia do conversor boost clássico



Fonte: Adaptado de Mohan (2012)

Segundo Mohan (2012), o ganho estático (G) do conversor boost clássico operando no modo de condução contínua (MCC) é dado pela Equação 2.9.

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \tag{2.9}$$

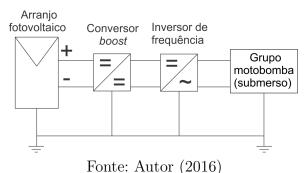
Onde:  $V_{in}$  é a tensão de entrada e  $V_o$  é a tensão de saída.

A razão cíclica D é a relação entre o intervalo de condução da chave e o período de chaveamento.

Neste conversor o ganho estático é o fator de amplificação entre a tensão de entrada e de saída do conversor e o mesmo é modificado pela variação da razão cíclica (D). Portanto, quanto maior a razão cíclica, maior é a tensão de saída do conversor.

Na utilização deste equipamento em sistemas de bombeamento FV com motor de indução, se faz necessária também a utilização do inversor de frequência para transformar a tensão CC fornecida por ele em CA. Na Figura 25, é mostrado um diagrama do sistema de bombeamento com conversor *boost*.

Figura 25 – Ilustração do acoplamento entre o arranjo FV e o grupo motobomba com conversor boost



Neste capítulo foram apresentados assuntos pertinentes ao entendimento dos objetivos deste trabalho tais como, conceitos sobre geração FV de energia elétrica responsável por alimentar todo o sistema de bombeamento. Além disso, foram apresentados assuntos referentes à tecnologia de dessalinização da água salobra proveniente de poços artesianos, com ênfase na OR. Por fim, foram abordados assuntos referentes à interface entre o grupo motobomba e o arranjo FV (ou gerador FV), que neste caso é o inversor de frequência. No capítulo seguinte é apresentada a descrição do sistema de bombeamento para dessalinização proposto.

# 3 Descrição do sistema proposto

O principal objetivo deste trabalho é comparar diversas estratégias de acionamento de um sistema de bombeamento para dessalinização de água salobra proveniente de poços artesianos utilizando geração FV de energia elétrica.

Existe também a possibilidade de que o sistema de bombeamento possa ser utilizado em outras aplicações quando a filtragem de água não for necessária. A seguir na Figura 26 é apresentado um diagrama de blocos do sistema proposto.

Arranjo Condicionador de potência

Controlador

Circuito de religamento

Fonte: Autor (2016)

Figura 26 – Diagrama de blocos do sistema proposto

O arranjo FV converte a energia solar em energia elétrica para alimentar o sistema de bombeamento. O condicionador de potência é composto pelo inversor de frequência que, por meio do controlador, tem a função de atuar na frequência comandada para manter o sistema operando o máximo de tempo possível. Como a geração FV é dependente da irradiância, o inversor de frequência pode entrar em falha por subtensão. Se isso ocorrer, o circuito de religamento atua quando a condição de irradiância for restabelecida.

Na sequência, são apresentados os componentes do sistema.

### 3.1 Materiais empregados no sistema proposto

A opção pela construção do dessalinizador de pequeno porte, se deu principalmente para possibilitar o estudo em laboratório, o que não inviabiliza sua aplicação numa situação

real. Pois, segundo Rosa (2013), a quantidade mínima de água potável para atender às necessidades diárias para beber e cozinhar de uma família de cinco pessoas é de 30 litros.

As características impostas ao sistema são que ele tenha uma capacidade de produção de 15 a 20 L/h de água dessalinizada e que possam ser utilizados componentes comerciais de fácil aquisição no mercado interno.

O dessalinizador descrito na Tabela 3, foi o que mais se aproximou das características desejadas.

Item Descrição Marca Water Point Modelo LOW - 1812 - 100 Membrana poliamídica Tipo da membrana Produção nominal 15,38 L/h97,5 % Rejeição salina nominal  $8,77 \ kgf/cm^2$ Pressão máxima 45 °C Temperatura máxima Vazão máxima de entrada 450 L/hCloro máximo < 0.1 ppmFator de recuperação 20 %

Tabela 3 – Especificações do dessalinizador

Fonte: Adaptado de Water Point (2015)

Para que o dessalinizador funcione corretamente se faz necessária uma determinada pressão de alimentação, que neste caso é de no máximo  $8,77\ kgf/cm^2$ . O grupo motobomba é o responsável por garantir que essa pressão seja alcançada. Para esse valor de pressão de alimentação o grupo motobomba descrito na Tabela 4 foi o selecionado.

Item	Descrição
Fabricante	Dancor
Tipo do conjunto	Bomba submersa
Modelo	1.1-SSR-13 - 100
Potência	0.5~CV
Número de estágios	13
Motor elétrico	Motor indução, 220 $V_{CA}$ trifásico, 60 $Hz$
Altura manométrica total	$80\ mca$
Vazão máxima	$1.9 \ m^3/h$

Tabela 4 – Especificações do grupo motobomba

Fonte: Adaptado de Dancor (2016)

Como pode ser visto na Figura 27, o grupo motobomba da curva 1 é o que tem o ponto de operação mais próximo do exigido pela membrana, (máximo de 87,7 mca e vazão de 0,45  $m^3/h$ ).

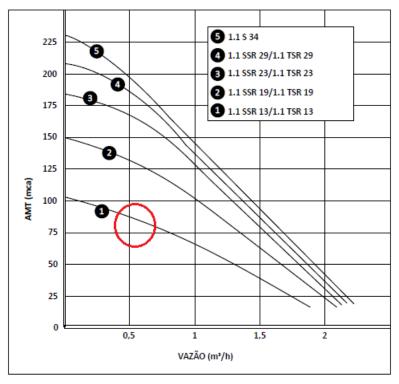


Figura 27 – Curva de performance do grupo motobomba

Fonte: Adaptado de Dancor (2016)

Com a utilização do motor de indução trifásico para compor o grupo motobomba, surgiu a necessidade de utilizar um equipamento para realizar a interface entre o motor e o arranjo FV. Esse equipamento é o inversor de frequência descrito na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações do inversor de frequência

Item	Descrição
Fabricante	WEG
Modelo	CFW 08
Potência nominal	2 CV
Tensão de alimentação	$220 V_{CA}$ , monofásico, $60 Hz$
Tensão de saída	$220 V_{CA}$ , trifásico
Corrente nominal	7,0 A

Fonte: Adaptado de WEG (2014)

As características dos módulos FV utilizados no trabalho são apresentadas na Tabela 6. As condições de teste do fabricante são as  $Standard\ Test\ Conditions\ (STC)$  com: Irradiância de 1.000  $W/m^2$ ; massa de ar (AM) de 1,5 e temperatura de 25 °C no módulo.

A determinação da quantidade de módulos utilizados no arranjo FV levou em consideração as características do conversor de frequência adotado no trabalho. O conversor de frequência convencional trabalha geralmente conectado à rede elétrica com uma tensão de alimentação de 220  $V_{CA}$ , que após um processo interno de retificação e filtragem torna-se 311  $V_{CC}$ .

Item Descrição Fabricante SunEdson SE-P265NPB-A4 Modelo  $\overline{\text{Potência máxima}} (P_{MP})$ 265~WTensão circuito aberto  $(V_{OC})$  $37,81 \ V_{CC}$ 9,24 ACorrente curto-circuito  $(I_{SC})$ 16,2 % Eficiência Tensão de máxima potência  $(V_{MP})$  $30,71\ V_{CC}$ Corrente de máxima potência  $(I_{MP})$ 8,63 A

Tabela 6 – Especificações do módulo FV

Fonte: Adaptado de SunEdison (2015)

Por meio da Figura 22 (Seção 2.4.1) pode-se observar que é possível conectar a tensão de saída do arranjo FV diretamente ao barramento CC do inversor de frequência. O inversor adotado no trabalho admite para o barramento CC uma tensão mínima de 200  $V_{CC}$ . Os módulos selecionados possuem tensão de máxima potência ( $V_{MP}$ ) de 30,71  $V_{CC}$ . Logo, foi dimensionado um arranjo FV com 10 módulos SunEdison modelo SE-P265NPB-A4, com potência individual de 265 W, associados em série, fornecendo assim uma tensão de aproximadamente 307,1  $V_{CC}$ .

A quantidade de módulos do arranjo FV pode ser alterada para mais ou para menos, porém deve-se atentar para a quantidade de energia que é disponibilizada ao inversor. Na Tabela 7, são apresentados os dados nominais elétricos de módulos disponíveis no mercado interno.

Tabela 7 – Especificações de módulos FV disponíveis no mercado

Potência (W)	Tensão máxima $(V_{MP})$	Corrente máxima $(I_{MP})$
0,50	17,56	0,29
10,00	17,56	0,60
20,00	17,56	1,14
30,00	17,56	1,71
50,00	17,74	2,84
55,00	17,83	3,08
65,00	18,36	3,54
85,00	18,10	4,70
95,00	18,18	5,23
140,00	17,70	7,91
150,00	18,10	8,30
250,00	29,80	8,39
255,00	30,02	8,43
260,00	30,40	8,50
265,00	30,65	8,65

Fonte: Adaptado de Minha Casa Solar (2016)

## 3.2 Sistema de aquisição de dados

O processo de medição de um fenômeno elétrico ou físico, como corrente, tensão, temperatura ou pressão, com o uso de um computador pode ser entendido como *Data Acquisition* (DAQ). Um sistema DAQ é formado por sensores, *hardware* de aquisição e medição de dados e um computador com *software* que possibilite a programação do sistema de aquisição (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016).

Na fase de realização dos ensaios algumas variáveis como tensão e corrente, oriundas do arranjo FV, pressão, vazão e irradiância solar devem ser medidas a fim de permitir o entendimento do comportamento do sistema durante seu funcionamento. O sistema de aquisição de dados é o responsável por essa tarefa.

Utilizando a plataforma *LabVIEW* da *National Instruments* foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados para receber os sinais dos sensores usados no sistema. Na Figura 28 está ilustrada a *interface* desse sistema supervisório.

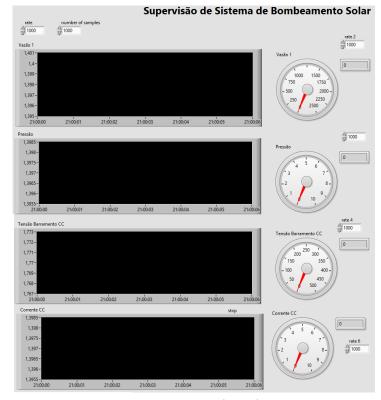


Figura 28 – Interface do sistema de aquisição de dados desenvolvido

Fonte: Autor (2016)

Os sensores usados nesse sistema de aquisição estão descritos na Tabela 8.

#### Instrumentação

No sistema DAQ os sinais dos sensores são tratados por um dispositivo (aquisitor) que condiciona os sinais e depois converte-os para então direcioná-los ao computador.

Sensor	Utilidade	Modelo	Faixa de operação	Precisão
Pressão	Medir $P_a$	NP - 430 D	$0 \text{ a } 20  kgf/cm^2$	1 %
Vazão	Medir $Q_a \in Q_p$	ND - 32	1  a  120  L/min	5 %
Piranômetro	Medir a irradiância	SL - 200	1 a 1300 $W/m^2$	5 %

Tabela 8 – Sensores do sistema de aquisição de dados

Fonte: Adaptado de Novus (2014); Water Flow Sensor (2016) e Kimo (2016)

O aquisitor só reconhece os sinais dos sensores em tensão analógica de baixo valor (0 a 10 V) nas suas entradas. Por essa razão, foram desenvolvidos dois circuitos eletrônicos para tratar esses sinais antes que sejam aquisitados.

Os valores de pressão são fornecidas pelo sensor por meio de sinais de corrente que variam de 4 a 20 mA. Como esse valor não pode ser aquisitado dessa forma, o circuito para medição de pressão converte esse sinal em um valor que varia de 0 a 5  $V_{CC}$ . Já o sensor de vazão fornece um sinal de frequência que varia em função da vazão. O circuito para medição de vazão converte esse sinal em tensão que varia em função da vazão.

A tensão de alimentação varia entre 0 e 311  $V_{CC}$ . O circuito de medição fornece um sinal analógico de tensão correspondente de 0 a 5  $V_{CC}$ . O mesmo acontece com o sinal da corrente elétrica. As ilustrações desses dois circuitos são apresentadas no Apêndice C (Figuras 60 e 61).

#### 3.3 Ensaio do módulo FV

Devido às características do conversor de frequência utilizado, o valor da tensão fornecida pelo arranjo FV é um fator determinante para o bom funcionamento do sistema, pois como discutido anteriormente a tensão do barramento CC mínima para operação do conversor de frequência é de 200  $V_{CC}$ .

A curva característica I-V do módulo usado no estudo pode ser observada na Figura 29. O ponto P simboliza o ponto de máxima potência, caracterizado por uma tensão de 30,71  $V_{CC}$  e uma corrente de 8,63 A, que proporciona uma potência de 265 W. Porém, esses valores são válidos para STC com uma irradiância de 1.000  $W/m^2$  e uma temperatura de 25  $^{\circ}C$  no módulo, conforme trecho do manual do módulo disponível no Anexo A.

No entanto, as condições do ambiente as quais o sistema está exposto, diferem das encontradas em ambientes de teste. Pois o sistema foi montado no anexo do Laboratório de Processamento de Energia (LPE) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - *Campus* Fortaleza, na cidade de Fortaleza - Ceará. Uma foto do local da instalação do sistema pode ser vista no Apêndice A (Figura 54).

Por essa razão foi feito um ensaio experimental com o módulo em questão para encontrar a curva I-V nas condições reais de operação.

1000 W/m<sup>2</sup>
(Y) 6
2
0 10 20 30 40
Tensão (V)

Figura 29 – Curva I-V do módulo FV SunEdson modelo SE-P265NPB-A4

Fonte: Adaptado de SunEdison (2015)

O ensaio do módulo seguiu o procedimento descrito à seguir:

- 1. Primeiramente, foi conectado aos terminais do módulo um reostato de 1 kW de potência, como carga;
- 2. Em seguida, o módulo foi exposto ao sol no horário de meio dia, pois nesse período a irradiância é próxima do valor considerado pelo fabricante nos testes padrões, ou seja, de  $1.000 \ W/m^2$ ;
- 3. O próximo passo foi variar a carga progressivamente. Com a variação da carga e da irradiância a corrente e a tensão fornecida pelo módulo também varia e é possível traçar a curva I-V do módulo. A medida em que era variada a carga, foram feitas leituras dos valores da tensão, corrente, irradiância e temperatura do módulo;
- 4. Após o término do ensaio com o reostato, a carga foi desligada e logo em seguida foram feitas as leituras da tensão de circuito aberto e da corrente de curto-circuito;
- 5. De posse dos dados de tensão e corrente coletados durante o ensaio, o passo seguinte foi tratá-los e posteriormente organizá-los em forma de gráficos.

Na Subseção 2.3.6, é discutida a influência que a temperatura exerce na curva I-V dos módulos FV. Com o objetivo de verificar este fato, foi feito outro ensaio do módulo. O procedimento experimental desse ensaio foi basicamente o mesmo do ensaio anterior. O que mudou foi a aplicação constante de uma fina camada de água sobre a superfície do módulo visando resfriar o mesmo.

Na Figura 30, pode-se observar as duas curvas I-V para as duas temperaturas ensaiadas. Já na Figura 31, são apresentadas as potências calculadas nos dois ensaios.

Na Tabela 9, pode-se observar que a potência máxima alcançada no ensaio com temperatura de 33 °C é 13,36 % menor do que a relatada pelo fabricante. Quando é levado

Figura 30 – Efeito da temperatura na curva I-V

Nodelo de 1 Diodo - 25°C

Experimental - 33°C

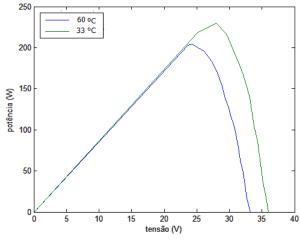
Experimental - 60°C

O

Tensão (V)

Fonte: Autor (2016)

Figura 31 – Efeito da temperatura na curva P-V de potência



Fonte: Autor (2016)

em consideração a temperatura de 60 °C a diferença aumenta, chegando a 22,98 % menor do que a do fabricante.

Tabela 9 – Rendimentos do módulo FV para temperaturas diferentes

Condições	Tensão	Corrente	Potência	Irradiância
de teste	$(V_{MP})$	$(I_{MP})$	$(P_{MP})$	$(W/m^2)$
STC	30,7	8,6	265,0	1.000
Ensaio do módulo FV a 60 °C	24,3	8,4	204,1	1.049
Ensaio do módulo FV a 33 °C	28,0	8,2	229,6	1.053

Em relação a tensão, que é um ponto fundamental para o bom funcionamento do sistema, também há uma divergência entre os valores relatados pelo fabricante e os encontrados em condições reais de funcionamento. Para a temperatura de 33 °C, a tensão de máxima potência é 8,8 % menor do que a relatada pelo fabricante. Já para a temperatura de 60 °C, a diferença sobe para 20,9 %.

Portanto, pode-se concluir que devido as característica encontradas no local de instalação do sistema, não é possível trabalhar com os dados de tensão e corrente nominais

informados pelo fabricante dos módulos FV. Logo, este é um fator que deve ser levado em consideração no projeto e dimensionamento de sistemas alimentados por esse tipo de geração de energia elétrica. No caso do trabalho em questão esses resultados serviram de base para nortear o dimensionamento da quantidade de módulos do arranjo FV.

Este capítulo foi dedicado a apresentação e descrição do sistema de bombeamento para dessalinização proposto por meio da descrição de cada um dos componentes utilizados. Além disso foi demonstrado o procedimento experimental para realização do ensaio de um dos módulos FV do arranjo. As fotos do sistema montado podem ser vistas no Apêndice A (Figuras 55, 56, 57 e 58). No próximo capítulo é apresentada a metodologia adotada nos ensaios experimentais e as discussões dos resultados obtidos.

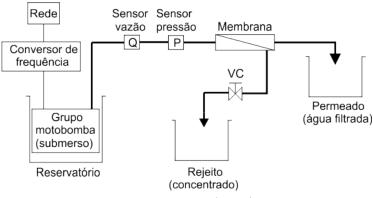
# 4 Metodologia e Resultados

Este capítulo é dedicado a apresentação da metodologia de trabalho adotada nos ensaios experimentais e discussão dos resultados obtidos.

# 4.1 Ensaio do sistema de dessalinização conectado à rede com tensão e frequência fixas

Quando o objetivo é determinar características operacionais do sistema de dessalinização, tais como pressão, vazão de alimentação e fator de recuperação, é recomendado que o sistema seja alimentado eletricamente por uma fonte estável. Por esta razão, optou-se por alimentar o conversor de frequência diretamente da rede. Na Figura 32 pode ser vista a estrutura básica utilizada neste ensaio. A válvula de controle (VC) regula a carga hidráulica aplicada a membrana.

Figura 32 – Sistema de dessalinização conectado à rede com tensão e frequência fixas



Fonte: Autor (2016)

O procedimento experimental foi realizado como segue:

- 1. O conversor de frequência foi conectado à rede elétrica e foi parametrizada uma frequência máxima de 56,2 Hz que proporciona uma pressão de 7  $kgf/cm^2$ . Pois acima desse valor a pressão ultrapassa a margem de segurança adotada para não danificar a membrana. Por exemplo, em 60 Hz a pressão atinge  $8,2 \ kgf/cm^2$ ;
- 2. Na água de alimentação foi adicionado cloreto de sódio para simular uma água salobra. O percentual de sódio na água é de aproximadamente  $500 \ mg/L$ ;
- 3. Em seguida, com o sistema ligado, a posição de VC foi mudada de totalmente aberta até próximo da posição fechada, passando por nove posições. Uma ilustração desse processo pode ser vista na Figura 33.

Rejeito

P1 (Completamente aberta)

P9
90° (Completamente fechada)

Rejeito

Figura 33 – Variação de VC

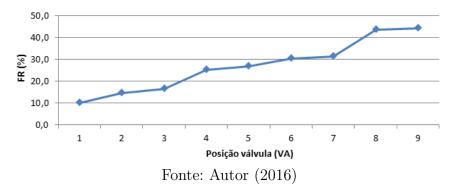
Fonte: Autor (2016)

4. A cada posição de VC, foram aquisitados dados referentes a vazão de alimentação, do permeado, pressão de alimentação, tensão e corrente fornecidas pela rede. Dessa forma, foi possível calcular o fator de recuperação para cada posição de VC.

Durante a realização do ensaio a tensão de alimentação do conversor manteve-se praticamente constante. A corrente medida na saída do conversor variou de 4,4 A a 4,1 A, pois a medida que a válvula é fechada, a vazão diminui, diminuindo assim a carga.

Na Figura 34, observa-se que a medida em que VC sai da posição aberta (posição 1) até a mais fechada (posição 9), o Fator de Recuperação (FR) tende a aumentar. No entanto, de acordo com Lima (2006), quanto mais alto for esse valor, menor será a vida útil do elemento filtrante, que neste caso é a membrana poliamídica, pois na medida em que o FR cresce, aumenta-se também a deposição de sais na superfície da membrana.





Os valores de pressão na entrada do sistema  $(P_a)$ , vazão de entrada  $(Q_a)$ , permeado  $(Q_p)$  e FR, podem ser visualizados na Tabela 10.

Posição de VC	Pressão $kgf/cm^2$	$Q_a (L/h)$	$Q_p (L/h)$	$\mathbf{FR}$ (%)
1	5,3	164,9	16,5	10,0
2	5,3	132,8	19,5	14,7
3	5,3	108,0	18,0	16,7
4	5,6	74,2	18,8	25,3
5	5,6	52,2	14,1	27,0
6	5,7	59,0	18,0	30,5
7	5,8	61,9	19,5	31,5
8	6,0	37,6	16,5	43,8
9	6,0	40,7	18,0	44,3

Tabela 10 – Fator de Recuperação (FR) em função da posição de VC

O FR especificado para a membrana utilizada neste trabalho é de 20 %. Com os resultados observados na Figura 34, as posições de VC que propiciam o rendimento semelhante ao que é recomendado pelo fabricante da membrana, são as posições três e quatro. Porém, ao observar a Tabela 10, nota-se que dentre essas duas posições a que propicia a maior vazão de permeado e menor produção de rejeito é VC na posição quatro. Portanto, essa foi a posição escolhida para VC durante a realização dos próximos ensaios.

A seguir, é apresentado o ensaio do sistema de dessalinização conectado à rede com frequência variável.

# 4.2 Ensaio do sistema de dessalinização conectado à rede com frequência variável

A geração de energia elétrica por meio de módulos FV é demasiadamente dependente das condições de irradiância, fato esse que torna essa geração intermitente.

Por esta razão, surgiu a necessidade da realização de um ensaio onde fosse possível variar a frequência de rotação do grupo motobomba, para então observar como o sistema de dessalinização se comporta.

A configuração da estrutura montada para a realização deste ensaio é semelhante a que foi utilizada no ensaio anterior (vide Figura 32). Porém, nesse ensaio o conversor de frequência é usado para variar a frequência de alimentação do grupo motobomba. A seguir, o roteiro do procedimento experimental:

1. O primeiro passo foi parametrizar o conversor de frequência para a frequência máxima de 56.2~Hz, pois com 60~Hz a pressão ultrapassa a margem de segurança adotada para não danificar a membrana. A pressão máxima de operação da membrana é de  $8.77~kgf/cm^2$ ;

2. O passo seguinte foi ligar o conversor de frequência e aumentar a frequência progressivamente até alcançar a frequência máxima programada, a medida em que eram aquisitados os valores de pressão na entrada do sistema  $(P_a)$ , frequência (f), tensão V e corrente (I) fornecidas pela rede, para permitir o cálculo da potência aparente (S), vazões da entrada  $(Q_a)$  e do permeado  $(Q_p)$ . Na Tabela 11, essas grandezas medidas durante o ensaio podem ser visualizadas.

Frequência	$P_a$	S	$Q_a$	$Q_p$	FR
(Hz)	$(kgf/cm^2)$	(VA)	(L/h)	(L/h)	(%)
20,0	1,0	642,8	26,9	3,0	11,2
24,5	1,5	710,8	34,8	4,8	13,7
28,5	2,0	840,9	38,9	6,2	15,9
31,5	2,5	838,3	45,8	8,2	17,9
35,0	3,0	914,1	50,6	10,6	20,9
38,1	3,5	985,3	56,3	11,3	20,0
41,0	4,0	1.059,7	60,0	15,0	25,0
43,8	4,5	1.209,9	68,9	17,5	25,4
46,5	5,0	1.356,8	70,0	19,3	27,6
48,5	5,5	1.434,1	75,7	22,0	29,0
51,4	6,0	1.585,9	80,6	25,2	31,2
53,3	6,5	1.696,0	76,2	23,2	30,5
56.2	7.0	1.808.3	73.0	21.0	28.8

Tabela 11 – Comportamento do dessalinizador para frequência variável

Por meio da Tabela 11, é possível construir uma gráfico que relaciona a pressão fornecida pelo grupo motobomba com a frequência de alimentação do mesmo. Na Figura 35, pode-se observar que quanto maior é a frequência do conversor, maior é a pressão fornecida pelo grupo motobomba. Importante lembrar que a frequência máxima alcançada foi de 56,2~Hz, pois com 60~Hz, a pressão ultrapassa a margem de segurança adotada para não danificar a membrana.

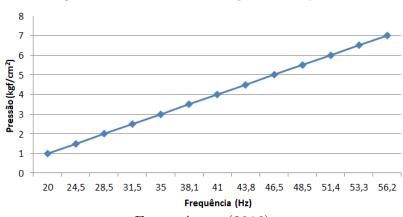


Figura 35 – Pressão em função da frequência

Fonte: Autor (2016)

Já na Figura 36, é mostrado que a capacidade de dessalinizar água por parte do sistema está diretamente relacionada com a pressão, pois na medida que a pressão aumenta, o FR também aumenta até certo ponto, que neste caso, foi uma pressão de 6  $kgf/cm^2$  e com um FR de aproximadamente 31,2 %. A partir deste ponto, o aumento da pressão acarreta em uma diminuição do FR. De acordo com Lima (2006), esse comportamento se explica pelo aumento da concentração de sais na água ao longo da membrana. Na medida que a água de entrada é dessalinizada, o teor de sais da água que continua percorrendo a membrana aumenta.

35,0 30,0 25,0 £ 20,0 £ 15,0 10,0 5,0 0,0 1 1,5 2 2,5 3 3,5 4 4,5 5 5,5 6 6,5 7 Pressão (kgf/cm²)

Figura 36 – Fator de Recuperação (FR) em função da pressão

Fonte: Autor (2016)

Baseando-se nas informações retiradas da Figura 36, constatou-se que a pressão máxima a ser utilizada neste sistema não pode ultrapassar 6  $kgf/cm^2$ , visto que, para pressões superiores o desempenho do sistema diminui. Já a pressão mínima não pode ser inferior a 1  $kgf/cm^2$ , pois, abaixo disso a vazão é muito baixa.

Na Figura 37, pode-se observar que a Potência Aparente (S) na saída do conversor aumenta substancialmente com o aumento da frequência. A potência aparente é composta por potência ativa e reativa. Quando o conversor é alimentado e o motor é ligado, a potência ativa é diretamente entregue a carga. No entanto, a parcela reativa fica oscilando entre a carga e os capacitores do conversor de frequência.

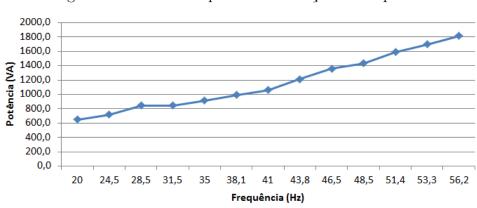


Figura 37 – Potência aparente em função da frequência

Fonte: Autor (2016)

A seguir é apresentada a descrição do sistema de religamento do conversor de frequência.

### 4.3 Circuito de religamento do conversor de frequência

O conversor de frequência utilizado neste trabalho possui um nível mínimo de tensão no barramento CC necessário para mantê-lo em funcionamento (200  $V_{CC}$ ). Abaixo dele o conversor entra em falha por subtensão.

Como a geração de energia elétrica por meio de módulos FV é dependente das condições de irradiância solar, há possibilidade do inversor entrar em falha por subtensão. Por esta razão, foi desenvolvido um sistema auxiliar para religá-lo de forma automática. Na Figura 38, é apresentado o circuito eletrônico responsável por fazer esse religamento.

Figura 38 – Circuito de religamento do inversor de frequência

O circuito monitora o nível de tensão do arranjo FV e comanda o religamento do conversor de frequência através de um contato selo numa entrada digital, quando a tensão dos módulos é recuperada.

O ensaio do sistema de bombeamento conectado ao arranjo FV está descrito a seguir.

## 4.4 Avaliação do comportamento do sistema de bombeamento conectado ao arranjo FV

Os ensaios anteriores foram realizados com o objetivo de caracterizar o sistema de dessalinização com variações de fornecimento de energia. Encerrada essa etapa o passo seguinte é avaliar o comportamento do sistema de bombeamento conectado ao arranjo FV.

Para este ensaio o sistema de bombeamento foi utilizado para uso geral, ou seja, o dessalinizador não foi usado. Logo, a válvula V1 foi aberta e a V2 foi fechada. Em seguida o inversor de frequência foi ligado. As variáveis aquisitadas foram vazão de saída da bomba, tensão e corrente do arranjo FV e irradiância solar. A configuração do sistema de bombeamento utilizado nesse ensaio é apresentada na Figura 39.

Bombeamento para uso geral Arranjo fotovoltaico Sensor Sensor V2 vazão pressão Dessalinizador Q Ρ Inversor de frequência Grupo motobomba (submerso) Reservatório

Figura 39 – Sistema de bombeamento conectado ao arranjo FV

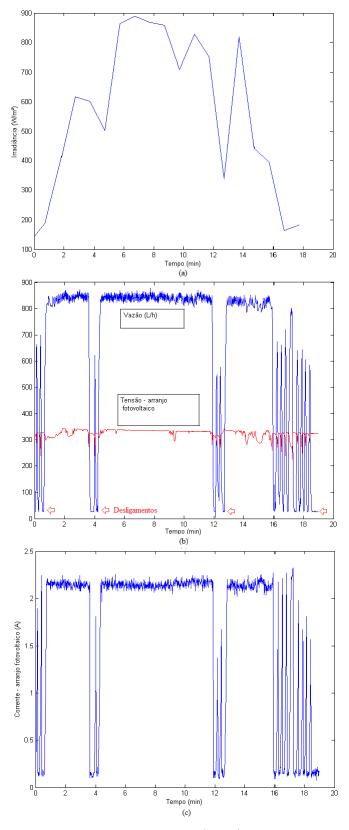
Fonte: Autor (2016)

Na Figura 40 (a), é mostrada a leitura de irradiância solar aquisitada durante o referido ensaio. Já na Figura 40 (b), pode-se observar o comportamento da vazão e da tensão do barramento do arranjo FV. E na Figura 40 (c), é mostrado o comportamento da corrente do arranjo.

O ensaio foi realizado no dia 10 de novembro de 2016 no horário de 10 horas, com condições de tempo nublado. No início do ensaio o sistema teve dificuldade de entrar em funcionamento devido a baixa irradiância. A partir do primeiro minuto, a irradiância começou a crescer (vide Figura 40 (a)) e o sistema de bombeamento entrou em funcionamento.

Próximo ao quarto minuto houve uma diminuição brusca na irradiância. Com isso a potência fornecida pelo arranjo FV também diminuiu, o que ocasionou o desligamento do sistema por subtensão. Quando a irradiância se recupera, o circuito de religamento atua. O mesmo também ocorre próximo ao décimo segundo minuto, e novamente o sistema de bombeamento é religado, até que próximo ao minuto dezesseis, a irradiância cai novamente e permanece muito baixa. Com isso o sistema de bombeamento novamente desliga por subtensão. As oscilações observadas a partir do minuto dezesseis são ocasionadas pelas

Figura 40 – Avaliação do sistema de bombeamento conectado ao arranjo FV: (a) Irradiância solar; (b) Vazão de entrada e tensão no barramento CC do arranjo FV; (c) corrente do arranjo FV



Fonte: Autor (2016)

tentativas de religamento do sistema.

Na curva I-V do módulo FV SunEdson modelo SE-P265NPB-A4 (vide Figura 29) a  $V_{MP}$  é de 30,71  $V_{CC}$  com uma corrente de 8,63 A. Sob estas condições, a tensão no arranjo FV seria de 307  $V_{CC}$  (10 × 30,7  $V_{CC}$ ). Porém como pode visto na Figura 40 (b) a tensão no arranjo está em torno de 345  $V_{CC}$  com uma corrente de 2,2 A. Essa condição evidencia a operação além da região de máxima potência.

Por meio da Figura 40, pode-se concluir que o sistema de bombeamento solar conectado ao arranjo FV sem o controlador, no inversor de frequência, apresentou muitos desligamentos em virtude das variações da irradiância. Por essa razão foi implementado um controlador PI no inversor de frequência. O procedimento experimental da implementação desse controle está descrita a seguir.

### 4.5 Implementação do controlador

Os resultados obtidos com o ensaio da avaliação do sistema de bombeamento FV mostraram que sem um controlador, o sistema desligou várias vezes devido as variações da irradiância. Por esta razão, surgiu a necessidade da incorporação de um controlador que permita que o sistema permaneça em funcionamento o maior tempo possível mesmo com as variações da irradiância.

O controlador proporcional integrador (PI) permite realizar a tarefa de variar, proporcionalmente à irradiância solar, a frequência comandada, mantendo a relação V/f no motor. Logo, se a potência disponibilizada pelo arranjo FV, para uma determinada condição de irradiância, não for suficiente para manter o grupo motobomba funcionando em sua frequência nominal, o inversor de frequência atua para tentar manter o torque que a motobomba necessita para continuar operando.

### 4.5.1 Parametrização do inversor de frequência

De acordo com Brito (2006), o inversor de frequência além de ser utilizado para transformar a tensão de CC para CA, também pode atuar no controle de velocidade do grupo motobomba.

O procedimento consiste em fazer com que o inversor trabalhe em malha fechada, ou seja, ele deve ter um setpoint, programado pelo usuário, receber um sinal de realimentação do sensor de medição da variável do processo e possuir um sistema de controle de modo a manter a variável do processo no valor desejado. Um diagrama de blocos desse sistema de controle pode ser visto na Figura 41. O responsável por esse controle é o PI do inversor, pois ele atua sobre o erro do sistema, que é a diferença entre os sinais de setpoint e realimentação, com o objetivo de mantê-lo próximo de zero.

Controlador Planta  $K_p \frac{s+1/T_i}{s}$  H(s) G(s)

Figura 41 – Controlador PI do inversor de frequência

Fonte: Adaptado de Brito (2006)

Sendo: SP(s) - Setpoint; E(s) - Erro;  $K_p$  - Ganho proporcional;  $T_i$  - Tempo integral; G(s) - Função de transferência da planta do sistema; <math>H(s) - Sinal de realimentação do sensor.

A seguir, é apresentado o procedimento de parametrização do inversor de frequência:

- 1. O passo inicial foi definir a variável de processo a ser controlada, que neste caso foi à tensão do barramento CC do inversor de frequência, que por sua vez, é a mesma tensão de alimentação do inversor de frequência. Essa escolha foi feita porque, como dito anteriormente, o inversor é programado para fornecer ao grupo motobomba sua frequência nominal de operação. E se a potência que o arranjo FV estiver disponibilizando não for suficiente para a motobomba operando nessa frequência, acontecerá uma queda de tensão no barramento CC, que provocará a falha do equipamento por subtensão. No entanto, com a tensão do barramento CC do inversor de frequência sendo a variável de processo, isso não acontece, pois quando o inversor aumenta sua frequência de operação, acarreta na diminuição da tensão do barramento CC do inversor de frequência. O controlador atua reduzindo a frequência de operação do inversor sempre que a tensão no barramento se encontrar abaixo do valor de setpoint especificado;
- 2. Em seguida foi programado o setpoint para aproximadamente 260  $V_{CC}$  e a ação de controle foi selecionada para opção reverso, ou seja, quando a tensão do barramento diminuir, o controlador deve reduzir a frequência proporcionalmente;
- 3. O próximo passo foi definir como obter o sinal de realimentação. Neste caso, foi utilizado um divisor de tensão como pode ser visto na Figura 42. O divisor fornece um sinal analógico de 0 a 10  $V_{CC}$ , que correspondo à faixa de 0 a 100 % da tensão do barramento para o inversor de frequência. Este sinal de realimentação foi conectado em uma das entradas analógicas do inversor, que foi habilitada para recebê-lo;

Realimentação (0 - 10 Vcc)

Entrada analógica

Inversor de frequência

R1 = 6 M Ω

R2 = 200 k Ω

Grupo motobomba

V = 311 Vcc

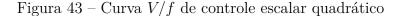
Arranjo fotovoltaico

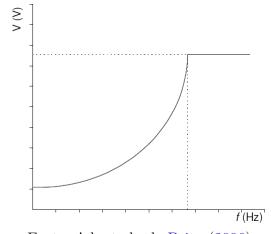
(-)

Figura 42 – Divisor de tensão para obtenção do sinal de realimentação

Fonte: Autor (2016)

4. O passo seguinte foi selecionar a opção de controle escalar quadrático, considerado apropriado para aplicações com bombas centrífugas. Na Figura 43, é possível observar o comportamento curva V/f desse tipo de controle;





Fonte: Adaptado de Brito (2006)

5. Posteriormente, foram ajustados os tempos de rampa de aceleração e desaceleração para  $0.1\ s;$ 

6. A finalização da parametrização do inversor se dá pela sintonia do controlador PI. O método utilizado para determinar os ganhos do controlador foi desenvolvido por Ziegler-Nichols, que consiste de equações derivadas a partir dos parâmetros da curva de reação do sistema. Para esta curva, os parâmetros, tempo de retardo (L) e a constante de tempo (T) são determinados por meio de uma reta tangente no ponto de inflexão da curva (vide Figura 44). De posse dos dados referentes aos valores de L e T, basta recorrer à Tabela 12, para determinar os ganhos do controlador PI;

 $\begin{array}{c|c} u & & & & \\ \Delta u & & & \\ \hline & t_0 & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & \\ & & & \\ & &$ 

Figura 44 – Exemplo de curva de reação

Fonte: Adaptado de Brito (2006)

Tabela 12 – Regra de determinação dos parâmetros de Ziegler-Nichols baseada na curva de reação

Controlador	$K_p$	$K_p$ $T_i$	
Р	$(1/K_c).(T/L)$	$\infty$	0
PI	$(0.9/K_c).(T/L)$	3,33 . L	0
PID	$(1,2/K_c).(T/L)$	$2 \cdot L$	L/2

Com base nessas informações procedeu-se a aplicação deste método no sistema em questão. Estando a função PI desabilitada e os tempos de aceleração e desaceleração reduzidos para  $0.1\ s$ , o inversor foi ligado. Essa ação abrupta é análoga a um degrau de tensão na entrada do inversor. A curva de resposta do sistema pode ser vista na Figura 45.

Por meio da Tabela 12, e com os dados experimentais observados na Figura 45, foi possível determinar os ganhos do controlador, sendo:  $K_p = 0.83$ ;  $T_i = 0.40$ .

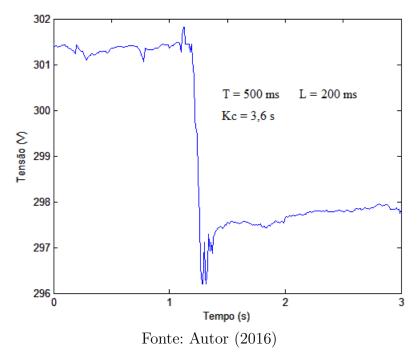


Figura 45 – Tensão de entrada do inversor no momento da partida

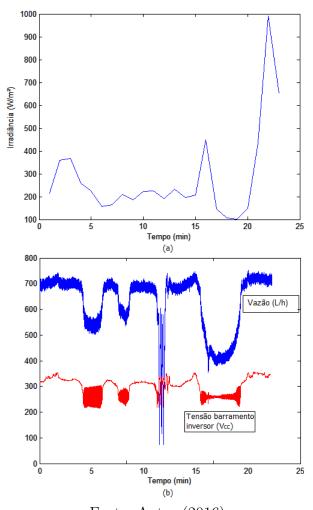
- O passo seguinte, foi parametrizar o controlador PI do inversor de frequência com os ganhos encontrados;
- 8. Finalizada a parametrização do inversor, o próximo passo foi validar experimentalmente o sistema de controle. A estrutura montada para realizar este ensaio é basicamente a mesma do ensaio anterior (vide Figura 39). Para este ensaio o sistema de bombeamento foi utilizado para uso geral, ou seja, o dessalinizador não foi usado. Logo, a válvula V1 foi aberta e a V2 foi fechada. As variáveis aquisitadas foram vazão de saída da bomba, tensão do barramento CC do inversor e irradiância solar.

Na Figura 46 (a) e (b), pode-se observar que o comportamento do sistema de bombeamento é completamente diferente com o PI do inversor habilitado, pois apesar da irradiância se encontrar muito baixa, o sistema não deixa de bombear, ou seja, o sistema não desligou em nenhum momento, apenas reduziu a frequência quando aconteciam quedas bruscas na irradiância.

As regiões do gráfico da tensão na Figura 46 (b), que estão com grande numero de oscilações, evidenciam o controlador atuando. Com a irradiância muito baixa, o sistema tende a diminuir a frequência, porém quando isso acontece, a tensão do barramento tende a recuperar. Nesse momento o controlador tenta elevar novamente a frequência, mas como a irradiância ainda está baixa, a tensão do barramento cai novamente, então o controle percebendo isso tende a retirar mais frequência. Esse ciclo continua até que a irradiância suba novamente.

Com a análise desses resultados pôde-se concluir que o controle PI do inversor é

Figura 46 – Avaliação do sistema de bombeamento conectado ao arranjo FV com controlador PI: (a) Irradiância solar; (b) Vazão de entrada e tensão no barramento CC do arranjo FV



Fonte: Autor (2016)

fundamental para manter o sistema operando, apesar das variações de fornecimento de energia por parte do arranjo FV, devido as variações de irradiância.

#### 4.5.2 Rendimento do sistema de bombeamento

Neste ensaio o objetivo foi calcular o rendimento do sistema de bombeamento para a frequência de 50~Hz, visto que esta é a frequência utilizada no sistema para dessalinizar água. A seguir a descrição do procedimento experimental:

- 1. Primeiramente o controlador PI do inversor foi desabilitado;
- 2. Em seguida o inversor de frequência foi ligado e comandado manualmente em rampa até atingir a operação com 50 Hz;
- 3. Nesta condição, a pressão na saída da bomba é ajustada manualmente para 12 mca através de uma válvula instalada na linha de recalque;

4. A partir desse ponto de operação são realizados decrementos de 2,5 Hz na frequência, enquanto são aquisitados valores de vazão (L/h) e pressão (mca).

Os resultados obtidos neste ensaio podem ser observados na Tabela 13 a seguir. O rendimento total do sistema de bombeamento, considerando as perdas no inversor de frequência e no grupo motobomba é de 7,5 %. Vitorino (2012), em seu estudo de otimização utilizando um sistema de bombeamento semelhante ao aqui apresentado, porém utilizando um motor de indução trifásico de 1,5 CV, corrobora com os resultados alcançados, quando apresenta rendimentos na faixa 5,47 % a 7,4 %.

Frequência	Vazão	Pressão	Potência	Rendimento
(Hz)	(L/h)	(mca)	saída (W)	(%)
32,50	979,14	6,12	16,49	6,46
35,00	1.023,86	6,63	18,68	6,53
37,50	1,109,94	7,65	23,37	7,35
40,00	1.175,78	8,16	26,40	7,52
42,50	1.240,77	9,18	31,34	7,56
45,00	1.297,16	10,20	36,41	7,61
47,50	1.376,80	11,22	42,51	7,53
50,00	1.416,38	12,24	47,71	7,50

Tabela 13 – Rendimento sistema de bombeamento (inversor + grupo motobomba)

# 4.6 Avaliação do comportamento do sistema de bombeamento com falhas nos módulos FV

A determinação da quantidade de módulos utilizados no arranjo FV, levou em consideração as características do inversor de frequência adotado no trabalho. O inversor possui tensão mínima de 200  $V_{CC}$ . Os módulos selecionados possuem tensão de máxima potência  $(V_{MP})$  de 30,71  $V_{CC}$ . Logo, foi determinado que o arranjo FV seria composto por 10 módulos SunEdison modelo SE-P265NPB-A4, associados em série fornecendo assim um nível de tensão de 307,1  $V_{CC}$ .

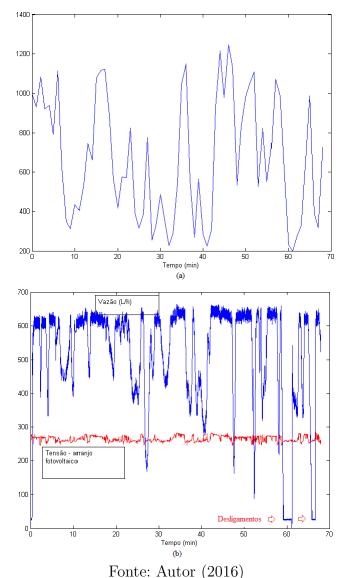
Porém, uma questão foi levantada, se um ou mais módulos do arranjo FV apresentarem falha. Qual o comportamento do sistema? Com objetivo de responder esse questionamento, foi feito um ensaio do sistema de bombeamento conectado ao arranjo FV com inversor de frequência, sendo que a cada ensaio um módulo era retirado do arranjo.

A estrutura utilizada no referido ensaio foi basicamente a mesma da utilizada no ensaio anterior (vide Figura 39), diferenciando-se apenas pela diminuição do número de módulos FV associados em série.

No ensaio do sistema de bombeamento alimentado por um arranjo FV com nove módulos pôde-se observar que o sistema suporta menos as variações de irradiância, ou seja, o sistema oscila mais do que quando está sendo alimentado com dez módulos.

Esse comportamento se acentua ainda mais quando retira-se mais um módulo do arranjo, como pode ser visto na Figura 47~(b), onde estão indicados dois desligamentos. Vale ressaltar a importância do sistema de religamento que evitou uma série de intervenções humanas no processo.

Figura 47 – Avaliação do sistema de bombeamento com 8 módulos FV: (a) Irradiância solar aquisitada; (b) Vazão de entrada e tensão no barramento CC do arranjo FV



A partir de sete módulos o sistema não entra em funcionamento, pois, a tensão disponibilizada pelo arranjo FV é de aproximadamente 214,91  $V_{CC}$ , valor esse que é muito próximo do limite mínimo do inversor de frequência.

Como o objetivo desse ensaio foi de avaliar o comportamento do sistema num

cenário de falhas nos módulos que compõem o arranjo FV, foi optado por apresentar apenas os gráficos do sistema com 8 módulos, que representa o pior cenário para essa situação.

Com os resultados obtidos nesse ensaio pode-se concluir que o sistema consegue operar mesmo em condições de falha de até dois módulos, o que evidência a robustez do mesmo. Lembrando que essa característica também faz parte dos objetivos propostos para esse trabalho.

A seguir, é descrito o ensaio do sistema de bombeamento conectado ao arranjo FV com inversor de frequência e conversor boost.

# 4.7 Ensaio do sistema conectado ao arranjo FV com inversor de frequência e conversor boost

Até aqui fez-se o uso de 10 módulos FV de 265  $W_p$  para prover ao inversor uma tensão de 307 V (10 × 30,7  $V_{CC}$ ) na condição de máxima geração de energia elétrica. É importante notar que o arranjo tem capacidade de gerar 2.650  $W_p$  (10 × 265  $W_p$ ), caso a carga necessitasse dessa demanda. Nesta seção é investigada a operação do sistema de bombeamento com a inserção de um conversor boost (Elevador de tensão) entre o arranjo FV com um número menor de módulos FV em série e o inversor de frequência. Uma ilustração desse sistema pode ser vista na Figura 48.

Bombeamento Arranjo para uso geral fotovoltaico Conversor boost Sensor Sensor vazão pressão Q Dessalinizador Inversor de frequência Grupo motobomba (submerso) Reservatório

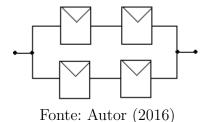
Figura 48 – Bombeamento FV com inversor de frequência e conversor boost

Fonte: Autor (2016)

O procedimento experimental do referido ensaio é descrito a seguir:

1. O conversor boost utilizado no trabalho é de 1 kW de potência. Portanto o número adequado de módulos é 4. Foram associados dois pares de módulos em paralelo, em seguida, esses dois pares foram associados em série, pois este conversor boost eleva de 61 para 311  $V_{CC}$ . Uma ilustração desse novo arranjo FV pode ser vista na Figura 49;

Figura 49 – Configuração do arranjo FV para ligar no conversor boost



- Após conectar os módulos FV na entrada do boost, a saída dele foi conectada na entrada do inversor de frequência, que já estava com a opção de controle PI habilitada;
- 3. O sinal de realimentação da variável *setpoint* foi conseguido com um novo divisor de tensão. Na Figura 50, é mostrada a nova estrutura para obtenção do sinal de realimentação;
- 4. Posteriormente a saída do inversor foi conectada no grupo motobomba;
- 5. A etapa seguinte foi fechar a válvula V2 e abrir a V1, pois neste ensaio o dessalinizador não foi utilizado;
- 6. Finalmente, o sistema foi ligado e os dados de vazão, tensão e irradiância foram aquisitados.

De acordo com a Figura 51, pode-se observar que apesar das condições de irradiância encontrarem-se bastante irregulares, o sistema não desligou em nenhum momento, pois o controlador PI do inversor de frequência estava a todo instante atuando na frequência comandada de alimentação do grupo motobomba.

Vale ressaltar que o conversor boost também contribuiu para esse resultado, pois o mesmo também estava variando a razão cíclica, de acordo com as oscilações da irradiância, para tentar manter a tensão de alimentação do inversor de frequência constante.

Por meio das Figura 51 a e b, constatou-se que a utilização do conversor boost para elevar a tensão disponibilizada pelos módulos FV, também pode ser uma boa alternativa.

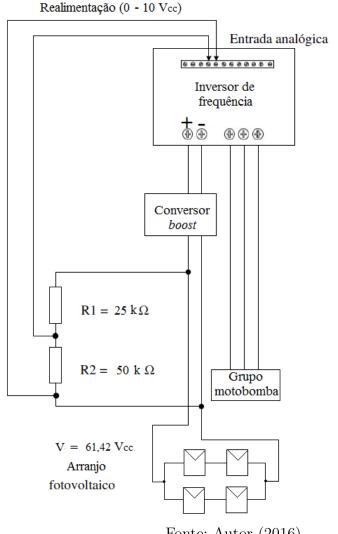


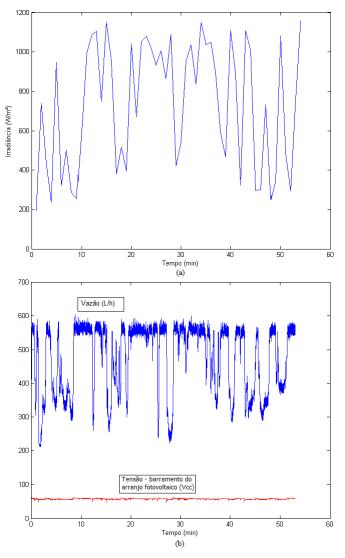
Figura 50 – Sinal de realimentação com conversor boost

Ainda na Figura 51, deve-se observar que a tensão está baixa (aproximadamente 58  $V_{CC}$ ), por que o arranjo FV é composto por apenas quatro módulos FV.

Porém, deve-se atentar para o fato de que este representa a adição de mais um componente ao sistema. A opção pela utilização de um sistema somente com o inversor de frequência ou por um sistema com inversor de frequência e conversor boost, vai depender das expectativas do investidor. Se o desejado é ter um sistema mais simples, porém, mais caro ou um sistema mais complexo, sendo mais barato, em termos de investimento inicial.

A seguir é apresentado o ensaio da validação do sistema de dessalinização FV com inversor de frequência.

Figura 51 – Avaliação do sistema de bombeamento com conversor *boost* mais inversor de frequência: (a) Irradiância solar aquisitada; (b) Vazão de entrada e tensão no barramento CC do inversor



## 4.8 Validação do sistema de dessalinização FV com inversor de frequência

Um dos objetivos deste ensaio é avaliar o comportamento e eficiência do sistema para um período longo de funcionamento, por essa razão, o ensaio teve uma duração de quatro horas ocorrendo no período de 9 as 13 horas do dia 24 de novembro de 2016.

Na Figura 52, pode-se observar uma ilustração do sistema montado para realização do referido ensaio. A seguir é mostrado o roteiro do procedimento experimental adotado:

1. O passo inicial foi associar os 10 módulos em série, formando o arranjo FV e então conectá-lo na entrada do inversor de frequência;

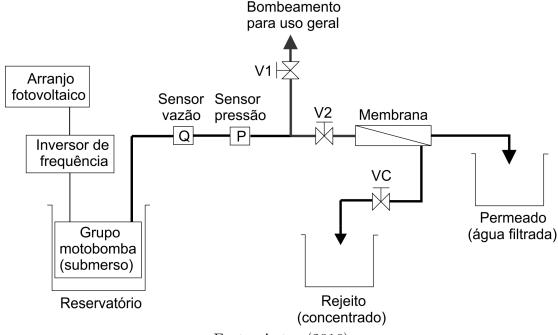


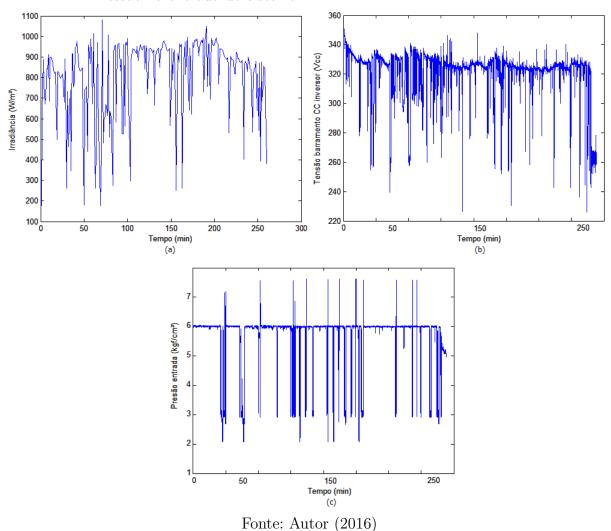
Figura 52 – Sistema de dessalinização FV com inversor de frequência

- O inversor foi habilitado para operar em malha fechada e os parâmetros foram os mesmos daqueles usados no ensaio da Subseção 4.5.1;
- 3. Foi adicionado cloreto de sódio a água para simular água salobra com salinidade aproximada de 1.000 (mg/L);
- 4. Em seguida, a válvula V2 foi aberta e a válvula V1 foi fechada;
- 5. O passo final, foi ligar o sistema e aquisitar os dados de pressão de alimentação  $(P_a)$ , das vazões de entrada  $(Q_a)$ , do permeado  $(Q_p)$  e do concentrado  $(Q_c)$ , bem como de tensão e corrente fornecidas pelo arranjo FV.

Nas Figuras 53~a, b e c são apresentados os resultados das curvas da irradiância aquisitada no ensaio do sistema de dessalinização FV, da tensão do barramento CC do inversor de frequência e da pressão de alimentação, para um período de 4 horas de funcionamento. Por meio delas, constatou-se que o sistema manteve-se em funcionamento mesmo com muitas variações na irradiância. No período do ensaio o sistema não desligou em nenhum momento.

O consumo específico de energia elétrica do sistema foi calculado com o auxílio da Equação 2.3, utilizando o valor de consumo específico hidráulico apresentado na Tabela 2 para uma salinidade na água de entrada de  $1.000\ mg/L$  e o rendimento do sistema de bombeamento apresentado na Seção 4.5.2. Os outros parâmetros necessários para caracterizar o sistema estão apresentados na Tabela 14.

Figura 53 – Avaliação do sistema de dessalinização FV com inversor de frequência: (a) Irradiância solar aquisitada; (b) Tensão no barramento CC do inversor e (c) Pressão na entrada do sistema



Como pode ser observado na Tabela 14, o sistema de dessalinização produziu uma vazão de permeado coerente com o que é especificado pelo fabricante da membrana (aproximadamente 15 L/h). Observa-se ainda que, o FR obtido ficou dentro do esperado (20,57 %), de acordo com a posição de VC localizada na saída do permeado. Com isso a vida útil do equipamento tende a ser maior.

Ainda da Tabela 14, observa-se que a capacidade de retirada dos sais da água de entrada é bastante eficiente, pois, o teor de sal diminuiu de  $1.030,86\ mg/L$  para  $71,3\ mg/L$  que representa uma diminuição de  $93\ \%$  de sal na água de entrada. Os resultados da análise das águas, tanto de alimentação quanto do permeado podem ser vistos no Apêndice B.

O consumo específico de  $4,40~kWh/m^3$  está coerente com os encontrados em experiências mundiais como em Latorre, Báez e Gotor (2015) que obtiveram valores de 4,1 a  $4,8~kWh/m^3$  em uma unidade de dessalinização alimentada por energia eólica e em Ahmed et al. (2014) que realizaram uma avaliação experimental do desempenho do sistema

Parâmetros	Valor
Tempo de ensaio $(h)$	4,19
Tensão média do barramento $(V)$	311,00
Corrente do barramento $(A)$	1,80
Pressão de entrada $(kgf/cm^2)$	6,00
Frequência média $(Hz)$	50,00
Vazão média de entrada $(L/h)$	69,09
Vazão média de permeado $(L/h)$	14,21
Vazão média de concentrado $(L/h)$	54,88
Fator de recuperação (%)	20,57
Total da água de entrada $(L)$	281,65
Produção de permeado $(L)$	56,65
Produção de rejeito $(L)$	225,00
Consumo específico elétrico $(kWh/m^3)$	4,40
Teor de salinidade da água de entrada $(mg/L)$	1.030,86
Teor de salinidade da água do permeado $(mg/L)$	71,30

Tabela 14 – Validação do sistema de dessalinização FV

de dessalinização por osmose inversa em pequena escala alimentado por bateria obtendo um consumo específico de 2,6  $kWh/m^3$ .

Nas experiências nacionais pode-se destacar o Lima (2006) que obteve um consumo específico de 3,8  $kWh/m^3$  na avaliação de um sistema de OR acionado por gerador fotovoltaico com inversor de frequência e em Carvalho et al. (2013) que num estudo de viabilidade de instalações de unidade de OR com bombeamento fotovoltaico obteve consumo específico de 3,12  $kWh/m^3$ .

Os resultados obtidos confirmaram a viabilidade do sistema proposto. Tendo em vista que o mesmo manteve-se em funcionamento mesmo em condições de oscilações da irradiância solar.

A seguir, o Capítulo 5, onde estão apresentadas as conclusões feitas com base nos resultados obtidos.

### 5 Conclusões

O objetivo principal desse trabalho foi comparar estratégias de acionamento de um sistema de bombeamento para dessalinização de água salobra proveniente de poços artesianos acionado por módulos FV e que tenha como características a robustez, em termos de vida útil e sustentabilidade de operação. Por esta razão, foi feita a opção por utilizar componentes comerciais e de fácil aquisição no mercado interno.

Um objetivo secundário foi que o sistema também pudesse ser utilizado para bombear água para aplicações gerais como, lavagem de roupas, limpeza da casa, descarga de aparelhos sanitários, entre outros.

Os benefícios que este tipo de sistema proporciona em termos de facilidade de manutenção e confiabilidade com o uso do motor de indução e conversor de frequência comerciais, também motivou o desenvolvimento deste trabalho.

No decorrer do trabalho pôde-se concluir que o conversor de frequência é o elemento chave para operação eficiente do sistema. Com a utilização do controlador PI, o sistema mostrou-se bastante eficiente na manutenção da relação V/f do motor de indução, contribuindo dessa forma para manter o sistema operando o máximo de tempo possível, mesmo com as oscilações da irradiância solar. Pois mesmo com valores de irradiância próximos de  $200 \ W/m^2$ , o sistema não desligou em nenhum momento e foi capaz de manter uma pressão média de entrada de 6  $(kgf/cm^2)$ . É importante ressaltar, que nos ensaios de validação do controlador PI do conversor, o sistema operou em condições críticas em termos de disponibilidade de irradiância.

A parametrização do conversor para que este pudesse operar em malha fechada, consistiu em habilitar o controlador PI e determinar os ganhos deste controlador.

Durante a realização do trabalho foi desenvolvido um circuito de religamento do conversor de frequência para atuar na ocorrência de falha por subtensão do mesmo. Com o conversor trabalhando em malha fechada e com o circuito de religamento o sistema pode ser utilizado em aplicações autônomas ou que necessitem de baixa intervenção humana para operar. Os resultados obtidos nos ensaios do sistema de bombeamento alimentado pelo arranjo FV com 10 módulos com controlador PI comprovam essa afirmação. Pois a irradiância se aproximou de  $100\ W/m^2$  e mesmo assim o sistema não desligou em nenhum momento.

Com os resultados obtidos no ensaio do arranjo FV simulando falhas nos módulos, pode-se concluir que o sistema consegue operar mesmo em condições de falha de até 2 módulos FV, o que evidência a flexibilidade do mesmo. Vale ressaltar que essa característica

também faz parte dos objetivos propostos para esse trabalho.

Em relação ao sistema de dessalinização, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios. Pois, com o sistema de dessalinização alimentado pelo arranjo FV em um ensaio de quatro horas, foi obtida uma produção de água filtrada de 56,65~L com um fator de recuperação de 20~%, valores estes que são compatíveis com os recomendados pelo fabricante da membrana. Vale ressaltar, que a água de alimentação estava com uma concentração de cloreto de sódio de 1.030,86~mg/L e a água filtrada estava com uma concentração de aproximadamente 71,3~mg/L. O consumo específico de  $4,4~kWh/m^3$  está coerente com os encontrados tanto em experiências mundiais quanto nacionais.

Por tudo isso, conclui-se que o sistema proposto é viável tecnicamente tanto para dessalinização de água, quanto para o bombeamento para outras aplicações.

#### 5.1 Trabalhos futuros

Este trabalho não se encerra aqui, assim com o objetivo de melhorá-lo são sugeridas as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Utilização da estratégia de *setpoint* variável da tensão do barramento CC do inversor de frequência;
- Implementar um MPPT, visando extrair a capacidade máxima de geração dos módulos FV;
- Realizar uma análise financeira com o objetivo de comprovar a sua viabilidade para diversas configurações e determinar qual é a mais viável;
- Comparação entre sistemas com diferentes tecnologias de acionamento elétrico e bombeamento.

#### Referências

- AHMED, M. R. et al. Experimental performance evaluation of battery powered small-scale reverse osmosis desalination system. **IEEE**, 2014.
- ALI, M. B. S. et al. Desalination of brackish water using electrodialysis: Effect of operational conditions. **Zaštita Materijala**, 2009.
- ARAúJO, A. C. S. P. A. Contribuição para o Estudo da Viabilidade/Sustentabilidade da Dessalinização enquanto Técnica de Tratamento de Água. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Ciências e Tecnologia FCT, 2013.
- BRASIL. Ministério da Saúde Portaria número 2.914, de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. 2011. <a href="http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\_12\_12\_2011.html">http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\_12\_12\_2011.html</a>. (Accessed on 10/07/2016).
- BRITO, A. U. Otimização do Acoplamento de Geradores Fotovoltaicos a Motores de Corrente Alternada Através de Conversores de Frequência Comerciais para Acionar Bombas Centrifugas. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo USP, 2006.
- CANADIAN SOLAR. Manual do Painel Fotovoltaico Canadian Solar- CS6P-260 | 265 | 270P. Canadá, 2016.
- CARVALHO, P. C. M. et al. Feasibility study of photovoltaic powered reverse osmosis and pumping plant configurations. **IET Renewable Power Generation**, 2013.
- CONAMA. Ministério do Meio Ambiente Resolução 357/2005. 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. 2005. <a href="http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf.html">http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf.html</a>>. (Accessed on 10/07/2016).
- CRISTALDI, L. et al. A simple photovoltaic panel model: Characterization procedure and evaluation of the role of environmental measurements. **IEEE**, 2012.
- DANCOR. Catálogo bombas submersas série SPP-1.1. São Paulo, 2016.
- FEDRIZZI, M. C. Sistemas Fotovoltaicos de Abastecimento de Água para Uso Comunitário: Lições Aprendidas e Procedimentos para Potencializar sua Difusão. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo USP, 2003.
- FONSECA, L. Obtenção de água destilada através de águas salobras com uso de Destiladores solares. 2013. <a href="http://www.abq.org.br/cbq/2013/trabalhos/14/2435-16620.html">http://www.abq.org.br/cbq/2013/trabalhos/14/2435-16620.html</a>. (Accessed on 11/05/2016).

Referências 81

GHAFFOUR, N. et al. Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems. **Desalination**, 2015.

HAMILTON, J. Careers in Solar Power. 2011.

KHLIFI, M. A. Study and control of photovoltaic water pumping system. **Electr Eng Technol**, 2015.

KIMO. Manual do piranômetro. São Paulo, 2016. SL-200.

LATORRE, F. J. G.; BáEZ, S. O. P.; GOTOR, A. G. Energy performance of a reverse osmosis desalination plant operating with variable pressure and flow. **Desalination**, 2015.

LEVY, J. Q. Novas fontes de abastecimento - reutilização e dessalinização. **Ecoserviços**, 2008.

LIMA, G. D. A. Otimização do Acoplamento de Geradores Fotovoltaicos a Motores de Corrente Alternada Através de Conversores de Frequência Comerciais para Acionar Bombas Centrifugas. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, 2006.

MELENDEZ, T. A. F. Avaliação de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo - USP, 2009.

MINHA CASA SOLAR. Minha Casa Solar – Especializada em Energia Solar Fotovoltaica. 2016. <a href="http://www.minhacasasolar.com.br/">http://www.minhacasasolar.com.br/</a>>. (Accessed on 03/11/2016).

MITSCHER, M.; RüTHER, R. Economic performance and policies for grid-connected residential solar photovoltaic systems in brazil. **Energy Policy**, 2012.

MMA. Ministério do Meio Ambiente - Água. 2017. <a href="http://www.mma.gov.br/">http://www.mma.gov.br/</a> estruturas/sedr\_proecotur/\_publicacao/140\_publicacao09062009025910.pdf>. (Accessed on 01/11/2016).

MOHAN, N. Power electronics: A first course. Minnesota - MS: Wiley, 2012.

MONTENEGRO, F. F. D. Projeto e Avaliação Econômica de Instalação Pioneira no Brasil de Planta de Osmose Reversa Acionada por Painéis Fotovoltaicos. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará - UFC, 2001.

NATIONAL INSTRUMENTS. Ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas LabVIEW. 2016. <a href="http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/">http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/</a>. (Accessed on 10/05/2016).

NOVOSEL, T. et al. Integration of renewables and reverse osmosis desalination e case study for the jordanian energy system with a high share of wind and photovoltaics. **Energy**, 2015.

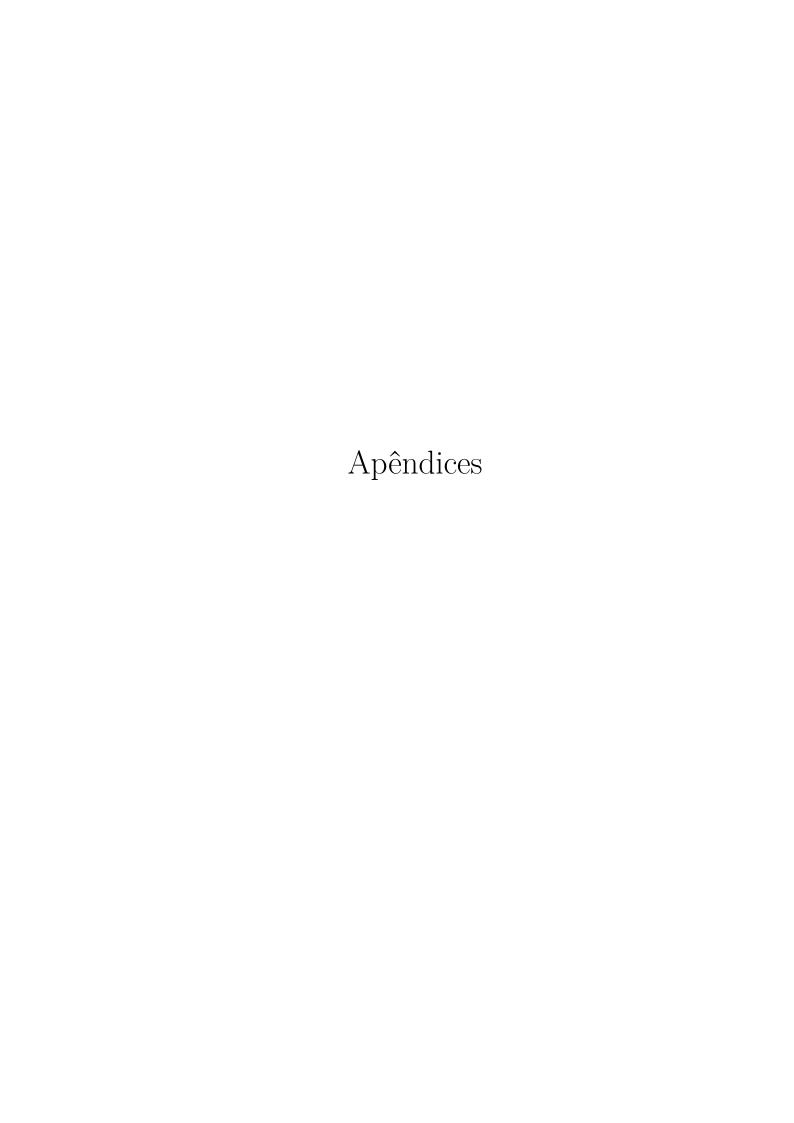
NOVUS. Manual transmissor de pressão modelo NP-430D. Rio Grande do Sul, 2014.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

Referências 82

RAMECH, G.; VASAVI, K.; SIRISHA, S. L. Photovoltaic cell fed 3-phase induction motor using mppt technique. **International Journal of Power Electronics and Drive System**, 2014.

- REBEI, N. et al. Implementation of photovoltaic water pumping system with mppt controls. **Energy**, 2015.
- RIFFEL, D. B. Unidade de Osmose Reversa Acionada por Energia Fotovoltaica sem Baterias: Simulação, Projeto e Validação Experimental. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Ceará UFC, 2005.
- ROCHA, J. S. Analise do Potencial de Aplicação de Sistemas Híbridos como Alternativa para Eletrificação do Meio Rural: Estudo de Caso para Pentecoste-CE. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual do Ceará UECE, 2010.
- ROSA, D. J. D. M. Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares de Dessalinização de Água para Consumo Humano: Um Estudo de sua Viabilidade e Configurações. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo USP, 2013.
- SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. Membranas filtrantes para o tratamento de Água, esgoto e Água de reuso. **Associação Brasileira e Engenharia Sanitária ABES**, 2001.
- SUNEDISON. Manual do Painel Fotovoltaico SunEdson SE-P265NPB-A4. Singapore, 2015.
- VITORINO, M. A. Sistema de Bombeamento Fotovoltaico com Motor de Indução e sem Baterias. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Campina Grande UFCG, 2008.
- VITORINO, M. A. Otimização do Processamento da Energia em Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico e Conversão Monofásica. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Campina Grande UFCG, 2012.
- WATER FLOW SENSOR. **Sensor de fluxo de água DN32**. 2016. <a href="http://loja.multcomercial.com.br/sensor-de-fluxo-de-agua-dn32.html">http://loja.multcomercial.com.br/sensor-de-fluxo-de-agua-dn32.html</a>>. (Accessed on 10/05/2016).
- WATER POINT. Manual membrana osmose reversa. São Paulo, 2015.
- WEG. Manual do Inversor de Frequência. São Paulo, 2014. CFW-08 Plus.



## APÊNDICE A - FOTOS

A seguir são apresentadas as fotos do sistema de dessalinização proposto.

Na Figura 54 está indicado o local de instalação do sistema. Já nas Figuras 55, 56, 57 e 58, são apresentados os componentes da bancada de ensaio.

Figura 54 – Local de instalação do sistema - IFCE - Campus Fortaleza



APÊNDICE A. FOTOS 85



Figura 55 – Reservatório de água com o grupo motobomba

Fonte: Autor (2016)



Figura 56 – Sensor de vazão e pressão

APÊNDICE A. FOTOS 86



Figura 57 — Unidade de dessalinização

Fonte: Autor (2016)



Figura 58 – Inversor de frequência

# APÊNDICE B — Resultado da análise de água dessalinizada

A seguir na Figura 59 é apresentado o resultado da análise da quantidade de cloreto de sódio da água de alimentação e do permeado. Sendo a água 01 a água de entrada e água 02 o permeado ou água tratada.

CLASSIF. = classificação das águas para fins de irrigação segundo o USDA, proposta por RICHARDS (1954) RESPONSÁVEL TÉCNICO: LAB. IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA PERIGO DE SALINIZAÇÃO
C1 - BAIXA
C1 - MODERADA
C3 - MÉDIA
C4 - ALTA
C5 - MUITO ALTA
C6 - IMPROPRIA RESULTADO DE ANÁLISE DE ÁGUA PARA FINS DE IRRIGAÇÃO CÁTIONS (mmol<sub>c</sub> L-1) Mg<sup>2+</sup> Na<sup>+</sup> INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS: PERIGO DE SODIFICAÇÃO CE RAS

Figura 59 – Resultado da análise de água dessalinizada

## APÊNDICE C – Circuitos auxiliares

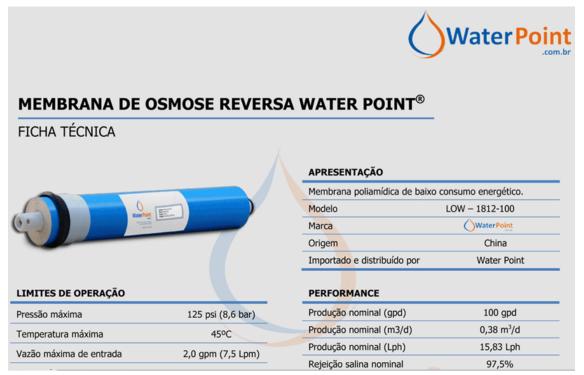
A seguir são apresentados os circuitos utilizados no sistema de aquisição de dados para tratar os sinais dos sensores de vazão e pressão (Figura 60) e o circuito para medição de tensão e corrente (Figura 61).

Figura 60 – Circuito para medição de vazão e pressão

Figura 61 – Circuito para medição de tensão e corrente

## ANEXO A – Trechos de Manuais

Figura 62 – Trecho do manual da membrana de  ${\rm OR}$ 



Fonte: Adaptado de Water Point (2015)

Figura 63 – Trecho do manual do grupo motobomba Dancor

#### Bombas Submersas para Poços Profundos

Aplicações







Bombas Submersas para Poços Profundos (SSP)

- SSR: Aço inox e rosca rolada TSR: Termoplástico e rosca rolada S: Aço inox e rosca fina

- S: Aço Inox e rosca fina
  Indicados para poços tubulares com diâmetro mínimo de 4" (101.6mm)
   Bocal, carcaça, intermediária, eixo, corpos de difusores em aço inox
   Impulsores e difusores em termolástico de engenharia
   Motores Dancor Submersos (MDS): em aço inox com flange em ferro fundido
   Refrigerado a óleo (atóxico)
   Rebobinável; Grau de proteção IP 68; Isolamento classe "F"
   Tensão dinica: Monofásico 220V (equipados com caixas de controle MDS); Trifásicos 220V ou 380V
  características técnicas de operação: Resistência à areia (máxima) 50g/m³; Faixa ideal de ph 6 a 9

\* TSR - Submersa (Bocal - 1%" BSP) e intermediária em termoplástico, opção até 2 Hp (nas séries 1.1, 2.1, 3.2, 5.4 e 8.3)

Leitura dos códigos para todos os modelos (séries)

EX: 2.1 SSR/TSR 19 → N° de estágios → Submersa (bocal e intermediá em inox) → Série / Vazão média em m³/h

		Pot.	8		Bocal de			Α	ltura N	/lanon	nétrica	Total	em n	etros	de Co	luna d	le Águ	a (mo	a) - Nâ	io est	šo inc	luidas	as pe	rdas p	or atri	ito							
Modelo (cv)		Fases	Fases	Fases	Fases	Fases	Fases	1		descarga max.			24	30	36	42	51	67	79	85	103	115	121	134	140	158	164	176	182	201	225	250	292
			ш		(bsp)	(/										Vaz	ão (m	<sup>1</sup> /h)															
1.1-SSR-13	1.1-TSR-13	1/2	13			103	1.90	1.80	1.70	1.60	1.40	1.30	1.00	0.80	0.60																		
1.1-SSR-19	1.1-TSR-19	3/4	19			151	2.10	2.00	1.90	1.80	1.70	1.60	1.40	1.30	1.20	1.00	0.80	0.70	0.50	0.30													
1.1-SSR-23	1.1-TSR-23	1	23			185	2.20	2.10	2.00	19.0	1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.60	0.50	0.30										
1.1-SSR-29	1.1-TSR-29	1 1/2	29			195	2.20	2.10	2.00	1.98	1.90	1.80	1.70	1.60	1.50	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50									
2.1-SSR-08	2.1-TSR-08	1/2	8			75.5	3.30	2.80	2.60	2.40	1.90	0.90																					
2.1-SSR-11	2.1-TSR-11	3/4	11			106	3.40	2.90	2.80	2.60	2.30	1.90	1.50	1.30	0.30																		
2.1-SSR-14	2.1-TSR-14	1	14			127	3.50	3.20	3.10	3.00	2.80	2.40	2.10	1.90	1.30	0.80	0.60																

Fonte: Adaptado de Dancor (2016)

Figura 64 – Trecho do manual do inversor de frequência CFW-08

ERRO	RESET (1)	CAUSAS MAIS PROVÁVEIS
E00 Sobrecorrente na saída (entrefases ou fase e terra)	☑ Power-on ☑ Manual (tecla <b>0</b> ) ☑ Auto-reset ☑ DI	<ul> <li>☑ Curto-circuito entre duas fases do motor</li> <li>☑ Curto-circuito para o terra em uma ou mais fases de saída</li> <li>☑ Capacitância dos cabos do motor para o terra muito elevada ocasionando picos de corrente na saída (consulte a nota na próxima página)</li> <li>☑ Inércia de carga muito alta ou rampa de aceleração muito rápida</li> <li>☑ Ajuste de P169 muito alto</li> <li>☑ Ajuste indevido de P136 e/ou P137 quando estiver no modo V/F (P202 = 0 ou 1)</li> <li>☑ Ajuste indevido de P178 e/ou P409 quando estiver no modo vetorial (P202 = 2)</li> </ul>
E01 Sobretensão no circuito intermediário		<ul> <li>☑ Módulo de transistores IGBT em curto</li> <li>☑ Tensão de alimentação muito alta, ocasionando uma tensão no circuito intermediário acima do valor máximo Ud &gt; 410 V - Modelos 200-240 V Ud &gt; 820 V - Modelos 380-480 V</li> <li>☑ Inércia da carga muito alta ou rampa de desaceleração muito rápida</li> <li>☑ Ajuste de P151 muito alto</li> <li>☑ Inércia de carga muito alta e rampa de aceleração rápida (modo vetorial - P202 = 2)</li> </ul>
E02 Subtensão no circuito intermediário "linkCC" (Ud)		☑ Tensão de alimentação muito baixa, ocasionando tensão no circuito intermediário abaixo do valor mínimo (ler o valor no parâmetro P004):  Ud < 200 V - Modelos 200-240 V  Ud < 360 V - Modelos 380-480 V

Tabela 7.1 - Erros, possíveis causas e formas de reset

Fonte: Adaptado de WEG (2014)

Figura 65 – Trecho do manual do módulo FV SunEdison - Modelo SE-P265NPB-A4

#### STC ELECTRICAL CHARACTERISTICS<sup>1</sup>

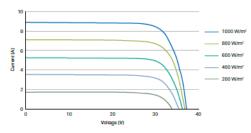
Model #	SE-P255NPB-A4	SE-P260NPB-A4	SE-P265NPB-A4	SE-P270NPB-A4
Rated Maximum Power Pmax (W)	255	260	265	270
Open-Circuit Voltage Voc (V)	37.54	37.65	37.81	38.10
Short-Circuit Current Isc (A)	8.94	9.09	9.24	9.45
Module Efficiency (%)	15.6	15.9	16.2	16.5
Maximum Power Point Voltage Vmpp (V)	30.25	30.51	30.71	30.80
Maximum Power Point Current Impp (A)	8.43	8.52	8.63	8.77

#### NOCT ELECTRICAL CHARACTERISTICS<sup>2</sup>

Model #	SE-P255NPB-A4	SE-P260NPB-A4	SE-P265NPB-A4	SE-P270NPB-A4
Rated Maximum Power Pmax (W)	189.8	193.5	197.2	200.9
Open-Circuit Voltage Voc (V)	35.21	35.31	35.46	35.73
Short-Circuit Current Isc (A)	7.21	7.33	7.45	7.62
Maximum Power Point Voltage Vmpp (V)	28.14	28.39	28.57	28.64
Maximum Power Point Current Impp (A)	6.74	6.82	6.90	7.02

Listed specifications are subject to change without prior notice.

IV CURVES AT MULTIPLE IRRADIANCES [25 °C]



Fonte: Adaptado de SunEdison (2015)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>All electrical data at standard test conditions (STC): 1000 W/m², AM 1.5, 25 °C; power measurement

tolerance may vary by  $\pm 3\%$ .

Pmax Production Tolerance: factory-measured module performance is warranted to meet or exceed the stated panel STC power rating by 0 W to +5 W.

 $<sup>^2</sup>$  NOCT electrical characteristics measured under normal operating conditions of cells: 800 W/m², 20 °C, AM 1.5, wind 1 m/s.