



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DOGLASSE ERNESTO MENDONÇA

**PLANTA DE OSMOSE REVERSA ACIONADA POR MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS COM MPPT E VÁLVULA AUTOREGULADORA DE PRESSÃO**

FORTALEZA

2016

DOGLASSE ERNESTO MENDONÇA

PLANTA DE OSMOSE REVERSA ACIONADA POR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
COM MPPT E VÁLVULA AUTOREGULADORA DE PRESSÃO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistema de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça

FORTALEZA

2016

ii

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- M494p Mendonça, Doglasse Ernesto.
Planta de osmose reversa acionada por módulos fotovoltaicos com MPPT e válvula autogeradora de pressão / Doglasse Ernesto Mendonça. – 2016.
140 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2016.
Área de Concentração: Sistema de Energia Elétrica.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.
Coorientação: Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça.
1. Engenharia elétrica. 2. Dessalinização por osmose reversa. 3. Energia solar. I. Título.

CDD 621.3

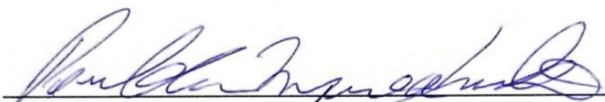
DOGLASSE ERNESTO MENDONÇA

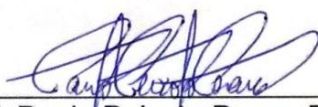
**PLANTA DE OSMOSE REVERSA ACIONADA POR MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS COM MPPT E VÁLVULA AUTOREGULADORA DE
PRESSÃO**

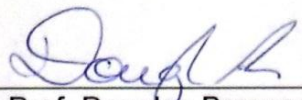
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistema de Energia Elétrica.

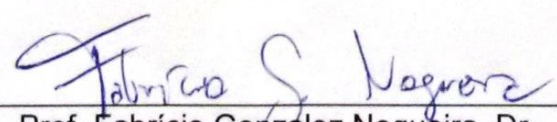
Aprovada em: 22/02/2016

BANCA EXAMINADORA


Prof. Paulo César Marques de Carvalho, Dr. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (DEE-UFC)


Prof. Paulo Peixoto Praça, Dr. (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (DEE-UFC)


Prof. Douglas Bressan Riffel, Dr.
Universidade Federal de Sergipe (UFS)


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

“Conhecimento não é aquilo que você sabe,
mas o que você faz com aquilo que sabe.”

Aldous Huxley

“If we could produce fresh water from salt water at a low cost, that would indeed be a great
service to humanity, and would dwarf any other scientific accomplishment.”

President John F. Kennedy, 1962

À Deus por conceder a vida e iluminar o meu caminho;

Aos meus pais, Ernesto Mendonça e Carlota Júlio;

As minhas filhas Michelle e Yanelly;

À minha esposa Isa;

Aos meus irmãos;

Eu dedico, o presente trabalho

AGRADECIMENTOS

A DEUS, Pai Todo Poderoso, pela vida, protecção, e por tudo que me proporciona nesta vida.

Ao Prof. Paulo Cesar Marques de Carvalho, pelo apoio no processo de candidatura a bolsa do CNPq, pelo enquadramento na linha de pesquisa referente ao tema desta dissertação, pela orientação, e motivação.

Aos Professores participantes da banca examinadora: Orientador Prof. Paulo C. M. de Carvalho, Co-orientador Prof. Paulo Peixoto Praça, Prof. Fabricio G. Nogueira, Prof. Douglas Bressan Riffel pelas sugestões e contribuições do projeto.

Agradeço ao CNPq, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

A FAPITEC/SE (Fundação de apoio à pesquisa e à inovação Tecnológica do estado de Sergipe), pelo apoio financeiro na compra de componentes para restauração da planta de dessalinização por osmose reversa.

Ao Ministério de Ciência e Tecnologia de Moçambique (MCT-Mz) e À Escola Superior Técnica da Universidade Pedagógica (ESTEC-UP) pela autorização de continuação dos estudos no Brasil.

Ao programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFC que concedeu o privilégio de cursar o mestrado e apresentar esta dissertação.

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fenando Antunes, José Carlos, René Pastor Torrico Bascope, Sérgio Daher, pelos conhecimentos transferidos.

Aos professores, Sandro S. C. Jucá e ao Urânio Stefane Mahanjane, pelos ensinamentos.

Ao professor Douglas Bressan Riffel pela colaboração na aquisição e no envio dos equipamentos para restauração da planta de dessalinização por osmose reversa.

Aos colegas da turma de mestrado, do grupo GPEC, colegas do LEA, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

Colegas moçambicanos estudantes da UFC (2014-2016), pelo convívio de residência e faculdade.

A minha esposa Isa, as minhas filhas Michelle e Yanelly, meus pais e irmãos pela paciência por suportar a minha ausência, nesta caminhada.

Finalmente, agradecer a todos que de forma direta ou indirecta contribuíram para a conclusão desse trabalho.

RESUMO

O presente projecto apresenta uma planta de dessalinização de água salobra por osmose reversa (OR) acionada por módulos fotovoltaicos (FV) com seguimento de potência máxima (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*) e válvula autoreguladora de pressão. A planta desenvolvida está instalada no Laboratório de Energias Alternativas (LEA), situado no Campus do PICI da Universidade Federal do Ceará. Para extração da máxima de energia do módulo FV foi desenvolvido um conversor do tipo *Buck*, usando a técnica Condutância Incremental (CondInc). A técnica de MPPT foi simulada, testada e validada, apresentando uma eficiência de 86,8% no seguimento do ponto de potência máxima. Uma inovação na planta proposta é o uso de uma válvula autoreguladora de pressão instalada na saída do concentrado, que garante uma menor variação de pressão e corrente elétrica na motobomba responsável por pressurização da água para as membranas. A planta de OR foi testada em duas etapas: uma sem a presença da válvula auto-reguladora de pressão e a outra com a válvula, para uma água de alimentação entre os níveis de salinidade de 1000 e 1500 mg/L de STD (Sólidos Totais Dissolvidos). Estes níveis de salinidade adotados são geralmente encontrados em poços com água salobra do semiárido do Nordeste do Brasil e noutros casos maior 1500 mg/L de STD. Para a operação sem a válvula autoreguladora de pressão foram obtidos os seguintes valores médios: taxa de recuperação 8,03%, produção de água potável de 151,7 L/dia com 130 mg/L de STD, consumo específico de energia de 2,68 kWh/m³. Para a operação com a válvula autoreguladora de pressão foram obtidos os seguintes valores médios: taxa de recuperação 8,14%, produção de água potável de 175,3 L/dia com 120 mg/L de STD, consumo específico de energia de 2,56 kWh/m³. No entanto a configuração da planta operando com a válvula autoreguladora de pressão apresenta melhores resultados relativamente a operação sem a válvula.

Palavras-chave: Dessalinização por osmose reversa, energia solar fotovoltaica, MPPT.

ABSTRACT

This project presents a brackish water desalination plant via Reverse Osmosis (RO) powered by Photovoltaic Modules (PV) with Maximum Power Tracking (MPPT) and a self – regulating pressure valve. The developed unit is installed on Alternative Energy Laboratory (LEA), which is located on the campus of PICI at Federal University of Ceará. To extract maximum power from the PV module a Buck type converter was developed for this application. The Incremental Conductance algorithms (IncCond) is used. The MPPT technique was simulated, tested and validated, showing an efficiency of 86.8%. An innovation in this plant is the use of a self-regulating pressure valve installed in the concentrate output, which ensures a smaller pressure and power variation in the pump that is responsible for pressurizing the water to the membranes. The technical feasibility of the RO plant is checked in two phases: one without the presence of the self- regulating pressure valve in the concentrated output and other with the self-regulating pressure valve in the concentrated output. The plant is tested for two salinity levels 1000 and 1500 mg/L of TDS (Total Dissolved Solids) levels. These salinity levels chosen are commonly found in most brackish water wells of the semi-arid region of Northeastern Brazil. For operation without self-regulating pressure valve the obtained average values are: recovery rate 8.03% (relation between permeate flow and feed water flow), 151.7 L of daily production of drinking water with 130 mg/L of TDS, specific energy consumption of 2.68 kWh/m³. For operation with self-regulating pressure valve the obtained average values are: recovery rate 8.14%, 175.3 L of daily production of drinking water with 120 mg/L of TDS, specific energy consumption of 2.56 kWh/m³. Thus the configuration system using the self – regulating valve showed better results.

Keywords: Reverse Osmosis Desalination, Photovoltaic System, MPPT

Figura 3. 17 - Tensão V_D e corrente I_D no diodo D.	70
Figura 3. 18 - Tensão V_C e corrente I_C no capacitor C.	71
Figura 3. 19 - Tensão V_{CH} e corrente I_{CH} na chave CH	71
Figura 3. 20 - Corrente I_L no indutor L.....	72
Figura 3. 21 - Placa SanUSB do PIC18F2550	72
Figura 3. 22 - Circuito divisor de tensão empregado como sensor de tensão.	73
Figura 3. 23 - a) Placa do circuito b) o esquemático de ligação do sensor de corrente.....	73
Figura 3. 24 - Circuito do driver.	74
Figura 3. 25 – Protótipo do conversor com MPPT.....	75
Figura 3. 26 - Circuito completo do conversor <i>Buck</i> operando como MPPT	76
Figura 3. 27 - Potência $P_{\text{módulo}}$, Tensão $V_{\text{módulo}}$ e corrente $I_{\text{módulo}}$ para temperatura constante $T = 25^{\circ}\text{C}$, irradiância (S) variante.	76
Figura 3. 28 - Potência $P_{\text{módulo}}$, Tensão $V_{\text{módulo}}$ e corrente $I_{\text{módulo}}$ para temperatura variável, irradiância G constante.	77
Figura 3. 29 - Resposta dinâmica e em regime permanente para a) $\Delta D=0,01$ e b) $\Delta D=0,03$. .	77
Figura 3. 30 - Comportamento da potência $P_{\text{módulo}}$, Tensão $V_{\text{módulo}}$ e corrente $I_{\text{módulo}}$ para temperatura $T=25^{\circ}\text{C}$, irradiância S variante.	78
Figura 3. 31 - Comportamento da potência $P_{\text{módulo}}$ e Tensão $V_{\text{módulo}}$ para temperatura $T = 25^{\circ}\text{C}$, 35°C e 45°C , irradiância $S = 1000\text{W}/\text{m}^2$	79
Figura 3. 32 - Resposta dinâmica e em regime permanente para $k=0,001$	79
Figura 3. 33 - Módulo FV utilizado.....	80
Figura 3. 34 - Tensão de saída V (1V/div) e corrente (A/div) na carga conectada diretamente ao módulo FV.....	81
Figura 3. 35 - Tensão de saída V (5V/div) e corrente (100mV/div = 1A) na carga conectada diretamente ao módulo FV	81
Figura 3. 36 - – Simulação da curva de potência de saída do módulo usando MATLAB, para $S=898\text{ W}/\text{m}^2$, $T=45^{\circ}\text{C}$	82
Figura 3. 37 - Tensão de saída V (5 V/div) e corrente (100 mV/div = 1 A) na carga conectada diretamente ao módulo FV	82
Figura 3. 38 - Simulação da curva de potência do módulo FV, para irradiância $S = 554\text{ W}/\text{m}^2$	83
Figura 3. 39 -Traçador Mini-KLA.....	83
Figura 3. 40 – Potência máxima do módulo ($P_{\text{max_módulo}}$) FV e dos métodos P&O,	

CondInc, Sem MPPT-16/09/2015.	85
Figura 4. 1 - Esquemático geral da unidade de ORFV analisada	87
Figura 4. 2 - Planta de dessalinização de água salobra por OR utilizada	89
Figura 4. 3 - (a) Motobomba SHURFLO 8000	Figura 4.3 - (b) Motobomba SHURFLO 2088
	90
Figura 4. 4 - Dimensões físicas das caixas FORTLEV 310 L	92
Figura 4. 5 - Elementos de pré-tratamento	92
Figura 4. 6 - (a) Filtro de sedimentos de 10 micra e 5 micra	(b) Filtro de sedimentos e cartucho
	93
Figura 4. 7 - Filtro de carvão ativado utilizado.	94
Figura 4. 8 -Filtro de resina deionizadora utilizado	95
Figura 4. 9 (a) Membranas de OR TW30-1812-100 utilizadas	Fig 4.9 (b) Membranas associadas em paralelo
	95
Figura 4. 10 - Impacto da pressão no fluxo de permeado gerado pela membrana.	96
Figura 4. 11 - Válvula de controle de pressão à saída do concentrado	98
Figura 4. 12 - Montagem da válvula básica	98
Figura 4. 13 - Válvula DN15 PN20 instalada após a valvula 0075PRV BERMAD	99
Figura 4. 14 – Piranômetro LP02	100
Figura 4. 15 - (a) Sensor de vazão na entrada, concentrado	Fig.4.15 (b) Sensor de vazão do concentrado
	100
Figura 4. 16 - (a) Sensor de pressão na entrada; saída do concentrado	Fig. 4.16 (b) Sensor de pressão na saída do concentrado
	101
Figura 4. 17 - Condutivímetro PHTek CD203	102
Figura 4. 18 - Termômetro utilizado	102
Figura 4. 19 - Sistema supervisorio para coletar e armazenar os dados da ORFV	103
Figura 4. 20 - Tela do aplicativo desenvolvido para captura de dados	104
Figura 4. 21 - Princípio de funcionamento da chave-bóia unipolar	104
Figura 4. 22 - Chave-bóia unipolar	105
Figura 5. 1 - Irradiância, pressão de entrada, pressão do concentrado - 23/11/2015.....	109
Figura 5. 2 - Vazão de água de entrada, vazão do concentrado, vazão do permeado - 23/11/2015.....	110
Figura 5. 3 - Corrente na motobomba 11 e a irradiância - 23/11/2015.....	111

Figura 5. 4 - Curva da irradiância, pressão de entrada, pressão do concentrado - 25/11/2015	112
Figura 5. 5 - Vazão de entrada, Vazão do concentrado, Vazão do permeado - 25/11/2015....	113
Figura 5. 6 - Comportamento da corrente na motobomba 11 e a irradiância - 25/11/2015....	114
Figura 5. 7 - Irradiância, pressão de entrada, pressão do concentrado - 01/12/2015	115
Figura 5. 8 - Vazão de entrada, vazão do concentrado, vazão do permeado - 01/12/2015....	116
Figura 5. 9 - Corrente na motobomba 1 e a irradiância - 01/12/2015	117
Figura 5. 10 - Curva da irradiância, pressão de entrada, pressão do concentrado - 02/12/2015	118
Figura 5. 11 – Vazão de entrada, Vazão do concentrado, Vazão do permeado - 02/12/2015.	119
Figura 5. 12 - Corrente na motobomba 11 e a irradiância - 02/12/2015	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Principais tecnologias de dessalinização	30
Tabela 2. 2 - Consumo de Energia (kWh/m ³) para vários tipos de tecnologias de dessalinização.....	32
Tabela 2. 3 - Combinações possíveis de tecnologias dessalinização com energias renováveis.	41
Tabela 2. 4 - Tecnologia de dessalinização alimentada por Energia Renovável	41
Tabela 2. 5 - Capacidade global instalada por tecnologia alimentada por fontes de energia renováveis.....	42
Tabela 2. 6 - Plantas de dessalinização de água salobra acionadas por painéis fotovoltaicos no mundo	43
Tabela 2. 7 - Tabela de produção do permeado.	49
Tabela 3. 1 - Considerações de projeto do conversor <i>Buck</i> e parâmetros do módulo FV	68
Tabela 3. 2 - Principais componentes dimensionados	69
Tabela 3. 3 - Parâmetro elétricos do módulo FV e potências medidas para diferentes níveis de irradiância e temperatura ambiente -16/09/2015.	84
Tabela 4. 1 - Especificações técnicas dos motores-bomba utilizados	90
Tabela 4. 2 - Especificações do desempenho típico da motobomba SHURFLO 2088.	91
Tabela 4. 3 - Especificações do desempenho típico da motobomba SHURFLO 8000.	91
Tabela 4. 4 - Especificações técnicas dos filtros de sedimento utilizados.	93
Tabela 4. 5 - Especificações técnicas do filtro de carvão ativado utilizado.	94
Tabela 4. 6 - Especificações técnicas das membranas de OR utilizadas	96
Tabela 4. 7 - Intervalo de pressão (bar)	98
Tabela 4. 8 - Especificações técnicas da chave-bóia usada no controle de nível	105
Tabela 5. 1 Tipos de configuração de operação da planta ORFV	107
Tabela 5. 2 - Resumo dos resultados obtidos para as estratégias de operação adotadas para estudo da viabilidade técnica da planta ORFV	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAS	Agência Brasileira de Águas Subterrâneas
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
CV	Compressão a Vapor
CondInc	Condutância Incremental
DME	Destilação Multi-Efeito
ED	Eletrodíálise
FV	Fotovoltaico
IDA	<i>International Dessalination Association</i>
LEA	Laboratório de Energias Alternativas
GPEC	Grupo de Processamento de Energia e Controle
MEF	Multi-Estágio <i>Flash</i>
MP	Máxima Potência
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i>
NEPAD	Nova Parceria para o Desenvolvimento da África
OMS	Organização Mundial de Saúde
OR	Osmose Reversa
P&O	Perturbar e Observar
ORFV	Osmose Reversa alimentada por energia solar Fotovoltaica
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a educação, a ciência e a cultura
WHO	<i>World Health Organization</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

AM	Índice relacionado à massa de ar dentro da atmosfera terrestre	
D	Razão ciclica	
$D(n)$	Razão ciclica da iteração atual	
$D(n-1)$	Razão ciclica da iteração anterior	
C_E	Capacitor filtro de entrada	F
I_0	Corrente de saída do conversor <i>Buck</i>	A
I_D	Corrente no diodo do conversor <i>Buck</i>	A
$I(n)$	Corrente lida na iteração atual	A
$I(n-1)$	Corrente lida na iteração anterior	A
I_{MP}	Corrente no ponto de potência máxima	A
I_{SC}	Corrente de curto circuito	A
I_{PH}	Corrente gerada pela célula fotovoltaica	A
I_{PH}^{ref}	Corrente gerada pela célula fotovoltaica em <i>STC</i>	A
I_{RP}	Corrente de regime permanente	A
I_{carga}	Corrente na carga	A
I_{cc}^{ref}	Corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico em <i>STC</i>	A
$I_{módulo}$	Corrente de saída do módulo fotovoltaico	A
I_{mp}^{ref}	Corrente no <i>MPP</i> do módulo fotovoltaico em <i>STC</i>	A
k	Constante de Boltzmann	J/K
L_0	Indutância do indutor do <i>Buck</i>	H
L_{omin}	Indutância mínima do indutor do <i>Buck</i>	H
p_{mp}^{ref}	Potência no <i>MPP</i> do módulo fotovoltaico em <i>STC</i>	W
q	Módulo da carga elementar do elétron	C
$R_{Pmódulo}$	Resistência paralela equivalente do módulo fotovoltaico	Ω
$R_{ei}(D, R_{carga})$	Resistência efetiva de entrada vista por um módulo FV em função da razão ciclica	Ω
R_{carga}	Resistência de carga de um conversor CC-CC	Ω
$R_{Smódulo}$	Resistência série equivalente do módulo fotovoltaico	Ω
R_{eq}	Resistência equivalente vista pelo módulo fotovoltaico	Ω
S	Irradiância solar	W/m^2
S^{ref}	Irradiância em condições padrão de teste (<i>STC</i>)	W/m^2
T	Temperatura	$^{\circ}C$

T^{ref}	Temperatura em condições padrão de teste (<i>STC</i>)	$^{\circ}C$
$V(n)$	Tensão lida na iteração atual	V
$V(n-1)$	Tensão lida na iteração anterior	V
$V_{Dmódulo}$	Tensão no diodo equivalente do módulo fotovoltaico	V
$V_{RPmódulo}$	Tensão resistência paralela equivalente do módulo	V
$V_{RSmódulo}$	Tensão série paralela equivalente do módulo	V
V_{ca}^{ref}	Tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico em <i>STC</i>	V
V_{carga}	Tensão na carga	V
V_g	Energia de banda proibida do semiconductor	eV
$V_{módulo}$	Tensão de saída do módulo fotovoltaico	V
V_{mp}^{ref}	Tensão no <i>MPP</i> do módulo fotovoltaico em <i>STC</i>	V
f_c	Frequência de comutação	Hz
$\theta_{Req}(D, R_{carga})$	Ângulo de inclinação da curva de carga	<i>grau</i>
ΔI_{Lmax}	Variação de corrente máxima no indutor do conversor <i>Buck</i>	A
$\Delta I_{\%carga}$	Variação de corrente na carga	$\%$
ΔV_{Cmax}	Variação de tensão máxima no capacitor do conversor <i>Buck</i>	V
$\Delta V_{\%carga}$	Variação de tensão na carga	$\%$
P_f	Pressão de filtração	psi
P_{PM}	Pressão no ponto de potência máxima	W
P_p	Pressão do permeado	psi
P_r	Pressão do contrado	psi
Q_a	Fluxo de alimentação	L/h
P_a	Pressão de alimentção	psi
$\Delta\pi$	Pressão osmótica	

UNIDADES DE GRANDEZAS FÍSICAS

Unidade	Significado
A	Ampére
°C	Graus Celsius
F	Farad
H	Henry
Hz	Hertz
Ω	Ohm
s	Segundo
V	Volt
Wh	<i>Watts</i> -hora
Wp	<i>Watt - pico</i>
W	Watt
m ³	Metro cúbico
rpm	Rotações por Minuto
ppm	Partes por milhão
min	Minuto
psi	Libra por polegada
L	Litro

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS	xv
LISTA DE SIMBOLOS	xvi
GRANDEZAS FÍSICAS	xviii
SUMÁRIO	xix
1 INTRODUÇÃO	22
1.1 Motivação	23
1.2 Objetivo Geral.....	23
1.2.1 Objetivos Específicos	24
1.3 Metodologia Geral	24
1.4 Estrutura do trabalho.....	25
2 SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO E FONTES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS	26
2.1 Dessalinização – Conceito e Enquadramento Histórico	26
2.3 Dessalinização – Contexto Mundial	28
2.4 Tecnologias e Processos de Dessalinização.....	29
2.5 Fundamentos da Tecnologia de Osmose Reversa.....	31
2.6 Demanda de energética em plantas de Dessalinização	32
2.7 Componentes Básicos de Sistemas de Dessalinização	33
2.7.1 Bombas de alta Pressão	33
2.7.2 Sistema de Pré-tratamento	34
2.7.3 Membranas Poliméricas	34
2.7.4 Parâmetros Característicos das Membranas	36
2.7.5 Operação de Sistemas de Membranas	37
2.7.6 Sistema de Pós-tratamento	38
2.7.7 Disposição do Concentrado	39
2.8 Fontes Renováveis de Energia para a Dessalinização	39
2.9 Experiências Mundiais em Unidades ORFV	42
2.9.1 Expêriencias no Brasil	44
3 SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ACIONAMENTO DE PLANTA DE DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA	51
3.1 Módulos Fotovoltaicos (FV).....	52
3.1.2 Características Elétricas dos Módulos FV	52

3.2	Seguidor do Ponto de Potência Máxima.....	53
3.3	Métodos de MPPT	60
3.3.1	Método Perturbar e Observar (P&O).....	61
3.3.2	Método da Condutância Incremental (CondInc)	63
3.4	Dimensionamento do Conversor <i>Buck</i>	66
3.4.1	Princípio de operação do conversor Buck	66
3.4.2	Modos de Operação do conversor	67
3.5	Dimensionamento do Conversor <i>Buck</i>	68
3.5.1	Simulação do Conversor Buck	69
3.6	Circuitos Auxiliares	72
3.6.1	Microcontrolador	72
3.6.2	Sensores de Tensão e Corrente.....	72
3.6.3	Driver.....	74
3.7	Validação do Conversor.....	74
3.8	Avaliação da eficiência dos Algoritmos de MPPT.....	75
3.8.1	Resultados de Simulações e Circuito físico.....	75
3.8.2	Resultados da Simulação de P&O	76
3.8.3	Método da Condutância Incremental.....	78
3.9	Resultados Experimentais.....	79
3.9.1	Método Perturbar e Observar	81
3.9.2	Método da Condutância Incremental.....	82
3.10	Validação dos Métodos.....	83
4	DESCRIÇÃO DA PLANTA DE DESSALINIZACAO DE ÁGUA SALOBRA POR OR ALIMENTADA POR ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ORFV).....	86
4.1	Descrição Geral da Planta de ORFV	86
4.2	Princípio de Funcionamento da Planta ORFV	87
4.3	Descrição dos principais componentes da planta ORFV	89
4.3.1	Conjunto Motobombas	89
4.3.2	Tanques de água	91
4.3.3	Sistema de Pré-tratamento de OR para Água Salobra.....	92
4.3.4	Membranas de OR.....	95
4.3.5	Válvula de Auto Controle de Pressão de Ação Direta	97
4.3.6	Sensores de Medição	99
4.3.7	Sistema de Aquisição de Dados	102

4.3.8	Chave Bóia Unipolar	104
4.3.9	Dispositivos Auxiliares	105
5	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA UNIDADE DE ORFV DO LEA-UFC.....	107
5.1	Resultados Experimentais.....	107
5.1.1	Resultados de Operação da Planta sem a Válvula Auto Reguladora de Pressão no Concentrado.	108
5.1.2	Resultados de Operação da Planta ORFV com a Válvula Auto Reguladora de Pressão do Concentrado.	114
6	CONCLUSÃO	124
7	Sugestões e Recomendações Para Trabalhos Futuros.....	126
8	REFERÊNCIAS BILIOGRAFICAS	127
	APENDICE A	132
	APENDICE B	139

1 INTRODUÇÃO

A escassez de água potável está rapidamente se tornando um problema mundial. No início do século XXI, cerca de 1,2 bilhões de pessoas no mundo não tem acesso à água potável suficiente. Entre 2009 e 2050, espera-se que a população mundial aumente em 2,3 bilhões de pessoas, passando de 6,8 bilhões para 9,1 bilhões (UNDESA, 2009a) e os efeitos do aquecimento global, o problema da escassez de água potável tende a crescer (BILTON *et al.*, 2011). O relatório da UNESCO (2015), sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos (WWDR4 – *World Water Development Report*) prevê que em 2030 a crise de água piorará em todo mundo, indicando que haverá 40% menos água potável do que o necessário para o consumo e o mundo ampliará as fatias de população vivendo sob “estresse de água”, caso não tome medidas drásticas para melhorar a gestão do recurso natural.

Muitas das regiões povoadas e com infra-estruturas e recursos limitados de abastecimento de água estão localizados em regiões costeiras com acesso à água do mar. Além disso, áreas do interior árido geralmente têm acesso à água subterrânea salobra.

No Brasil, a seca é característica principalmente da região semiárida nordestina, conhecida por *Polígono da Seca*, com predominância de baixa pluviosidade, distribuída irregularmente no tempo e no espaço, e altas temperaturas; estes fatores combinados produzem déficit hídrico na região (RIFFEL, 2005).

Cerca de dois terços do continente Africano são compostos por regiões áridas ou semiáridas e mais de 300 milhões dos 800 milhões de habitantes da África subsaariana vivem em ambientes de escassez de água, significando menos de 1000 m³ desse recurso *per capita* (NEPAD, 2006).

No mundo Árabe e Ásia Ocidental pelo menos 12 países sofrem da escassez absoluta de água, o que significa que têm menos de 500 m³ de recursos hídricos renováveis disponíveis *per capita* ao ano.

Uma das alternativas para enfrentar o problema da escassez de água nessas regiões é a prática da dessalinização de água salobra ou salgada, visando tornar este recurso adequado ao consumo humano e para o uso industrial e de irrigação.

A dessalinização é um processo de remoção de sal da água para produzir água potável, definida pela Organização Mundial de Saúde (OMS, 1970) como sendo água contendo menos do que 500 mg/L de STD (Sólidos Totais Dissolvidos).

Em áreas densamente povoadas, plantas de dessalinização em larga escala podem ser construídas para proporcionar abastecimento adequado de água. Embora a energia para

alimentar estas plantas é muitas vezes um fator limitativo, cerca de 30 a 50% do custo de produção da água (BURN *et al.*, 2015), estas áreas têm uma série de potenciais soluções. A combinação de plantas de dessalinização com fontes renováveis de energia apresenta-se como uma opção viável (MILLER, SHEMER e SEMIAT, 2015).

Existem várias tecnologias de dessalinização, entretanto a dessalinização por osmose reversa (OR) é a mais difundida e a que tem maior crescimento, ocupando cerca de 65% de capacidade instalada mundial (Burn *et al.*, 2015).

O processo de OR consiste em aplicar uma pressão dinâmica para vencer uma pressão osmótica sobre uma solução de sal, conhecida também como água de alimentação, através de membranas seletivas que retêm a maioria dos sais e microrganismos e deixa passar a água com pouco sal (GREENLEE *et al.*, 2009).

Para comunidades com menores consumos de água potável (<10 m³/dia), plantas de OR com acionamento fotovoltaico (ORFV) são uma solução viável. ORFV tem reduzido impacto ambiental, pode facilmente ser projetado e instalado para diferentes perfis de demanda utilizando componentes modulares e com facilidade de manutenção (GREENLEE *et al.*, 2009).

Por outro lado, os módulos FV, responsáveis pela conversão da energia do sol em energia elétrica, apresentam baixa eficiência. Para melhorar a eficiência de conversão desta fonte de energia e adequar a potência do módulo FV à carga, foi desenvolvido na presente dissertação um conversor CC-CC *Buck* controlado por um algoritmo com MPPT.

1.1 Motivação

O histórico de estiagem em determinadas regiões do mundo e da perspectiva de aumento da demanda por água potável em tais regiões nos próximos anos, forneceu a motivação para estudar alternativas que pudessem ser utilizadas como meio de amenizar o impacto da escassez de água potável.

A tecnologia escolhida para tal estudo foi a de dessalinização da água por osmose reversa acionada por energia solar fotovoltaica.

1.2 Objetivo Geral

Desenvolvimento de um MPPT para um sistema FV aplicado a planta de dessalinização por osmose reversa com válvula autoreguladora de pressão no concentrado.

1.2.1 *Objetivos Específicos*

- Estudo da tecnologia fotovoltaica e de dessalinização por osmose reversa;
- Levantamento do estado da arte de unidades de osmose reversa acionadas por módulos fotovoltaicos a nível mundial;
- Dimensionamento, simulação, desenvolvimento e validação de um conversor CC-CC para aplicação em unidade de osmose reversa acionada por módulos fotovoltaicos;
- Estudo e aplicação de técnicas de seguimento de potência máxima (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*);
- Análise da operação e da viabilidade técnica de uma unidade de osmose reversa acionada por módulos fotovoltaicos com seguimento de potência máxima instalada no Laboratório de Energias Alternativas da UFC (LEA-UFC);
- Estudo do efeito de uma válvula de auto controle de pressão na saída do concentrado para reduzir a variação de pressão nas membranas de OR.

1.3 **Metodologia Geral**

O projeto contempla a interação entre a eletrônica de potência, o sistema de bombeamento, tecnologia de osmose reversa e a fotovoltaica para fins de fornecimento de água potável mediante a dessalinização de água salobra, analisando a eficiência da planta ORFV sem banco de baterias e operando em diferentes salinidades e condições atmosféricas. O estudo envolve conceitos e aspectos de várias esferas como: aspectos técnicos de engenharia elétrica, química e hidráulica, assim como aspectos socio-econômicos e ambientais.

A condução desta pesquisa compreende as seguintes estratégias:

- Investigação do estado da arte mundial do uso da energia solar fotovoltaica no acionamento de unidades de dessalinização via osmose reversa;
- Estudo de topologias de conversores CC-CC;
- Estado da arte das técnicas de MPPT;
- Instalação de conversor CC-CC do tipo *Buck* em uma planta ORFV desenvolvida no LEA-UFC;
- Avaliação de desempenho da planta ORFV e otimização.

1.4 Estrutura do trabalho

Esta dissertação foi organizada em 6 capítulos. No capítulo 1 têm-se a introdução, motivação, o objectivo geral e específico do presente estudo. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica e a tendência atual da tecnologia de osmose reversa com energias renováveis dando enfoque na energia solar fotovoltaica.

O capítulo 3 apresenta uma abordagem do sistema fotovoltaico, dimensionamento do conversor CC-CC desenvolvido para esta aplicação, abordagem de duas técnicas de MPPT usadas para validação do conversor (uma técnica foi escolhida em função dos resultados obtidos).

O capítulo 4 faz a descrição da planta de osmose reversa utilizada, o princípio de funcionamento e os principais componentes da planta.

Capítulos 5 são apresentados os resultados da validação experimental da planta de ORFV para diferentes níveis de concentração salina e diferentes estratégias de operação.

O capítulo 6 encerra com as considerações finais e as perspectivas de trabalhos futuros.

2 SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO E FONTES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

A necessidade de fornecimento de água potável as comunidades rurais que enfrentam a escassez de água juntamente com preocupações ambientais tem estimulado o interesse no estudo de sistemas de dessalinização alimentados por energias renováveis.

Neste capítulo apresenta-se um estudo atual das diferentes combinações de tecnologias de dessalinização que propõem a minimização do problema de abastecimento de água potável em diferentes regiões do mundo e as diferentes fontes de energias renováveis empregadas para o funcionamento dos diferentes sistemas de dessalinização.

2.1 Dessalinização – Conceito e Enquadramento Histórico

O ciclo hidrológico da Terra efetua naturalmente o processo de dessalinização da água utilizando a energia solar. No ciclo da água, esta evapora dos oceanos, lagos e superfícies da terra, ficando os sais nos meios de origem. O vapor de água doce forma as nuvens que após sofrer um processo de precipitação cai na terra em forma de chuva e neve. A água move-se através dos solos, dissolvendo minerais, tornando-se cada vez mais salgada. É desta forma que os oceanos são constituídos por água salgada, devido a este processo natural de evaporação, precipitação, e escoamento que permite um constante movimento de sal da terra para o mar, onde se acumula ao longo do tempo (COOLEY *et al.* 2006).

No mundo moderno, a dessalinização começou a ser desenvolvido para os navios no mar para evitar a possibilidade de esgotar a bordo suprimentos de água doce (SEIGAL e ZELONIS, 1995).

A dessalinização consiste na remoção ou redução da concentração de sais e sólidos dissolvidos da água salgada (mar ou salobra) para obter água doce e própria para consumo. Para além da remoção de minerais, este processo, remove ainda outros componentes químicos, orgânicos e biológicos (GREENLEE *et al.* 2009).

A água doce é definida como sendo água contendo menos que 1000 mg/L de sais ou sólidos dissolvidos totais (STD) (SANDIA, 2003) . Acima de 1000 mg/L, propriedades tais como sabor, cor e odor podem ser adversamente afetados.

Muitos países adotaram padrões nacionais de água potável para contaminantes específicos, bem como para STD, assim os limites padrão podem variar de país para país, região para região e dentro do mesmo país. Por exemplo, a Organização Mundial de Saúde (WHO, 1970) tem um limite máximo para água de potável de 250 mg/L de STD.

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) na resolução nº 357/2005, define o patamar máximo de 500 mg/L de sólidos totais dissolvidos (STD) para considerar a água doce, e entre 500 e 3000 mg/L para considerá-la salobra, acima disso é salgada.

A primeira localização de uma unidade de dessalinização ocorreu nas Antilhas Holandesas, mais precisamente, na ilha de Curaçao, em 1928. Já em 1938 construiu-se uma das grandes unidades de dessalinização, onde é hoje a Arábia Saudita. No entanto, foi durante o período da 2ª Guerra Mundial que se deram os maiores avanços nesta área, na medida em que era necessário dar resposta às necessidades de água das infra-estruturas militares em zonas áridas. Após a 2ª guerra mundial vários países continuaram a investigar, desenvolver e aperfeiçoar o processo de dessalinização. Em 1950 o governo americano fundou o “*Office of Saline Water*” que deu lugar em 1974 a uma organização sucessora, a “*Office Water Research and Technology*” (OWRT), que ajudou na pesquisa e desenvolvimento das tecnologias associadas à dessalinização (LATTEMANN *et al.* 2010).

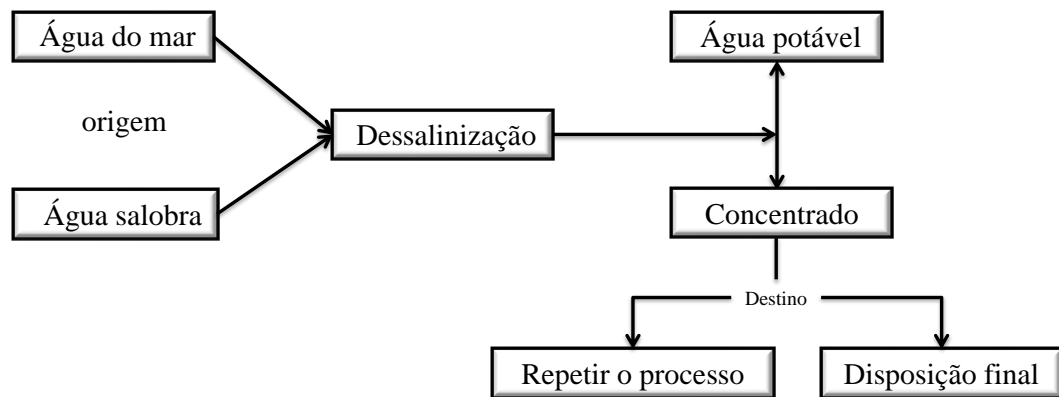
O processo de dessalinização começou a ser utilizado regularmente a cerca de 50 anos, quando se estabeleceram, em vários países, unidades de dessalinização capazes de suprir ininterruptamente uma comunidade com água potável. Atualmente a tecnologia é considerada técnica e economicamente viável.

No Brasil, um exemplo desse problema é encontrado no Polígono das Secas, localizado preponderantemente na região semi-árida nordestina. A área afetada representa 60% de todo território da região Nordeste, ou cerca de 950000 km². A problemática da escassez de água potável no Nordeste não se restringe à baixa precipitação de chuva, mas uma irregular distribuição temporal e espacial.

Uma das formas de suprimento de água potável nessas regiões seria pela abertura de furos de água, porem num estudo realizado pela associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), pelo menos 19,5 bilhões de metros cúbicos de água poderia ser extraído por ano do subsolo nordestino porem os poços perfurados na rocha cristalina, encontrada em cerca de 788,358 km², apresentam pouca vazão e produzem água salobra (RIFFEL, 2005).

Uma das opções para o suprimento de água potável consiste em dessalinizar essa água salobra para o consumo humano. A Figura 2.1 apresenta o diagrama geral de um processo de dessalinização.

Figura 2. 1 - Esquema geral do processo de dessalinização



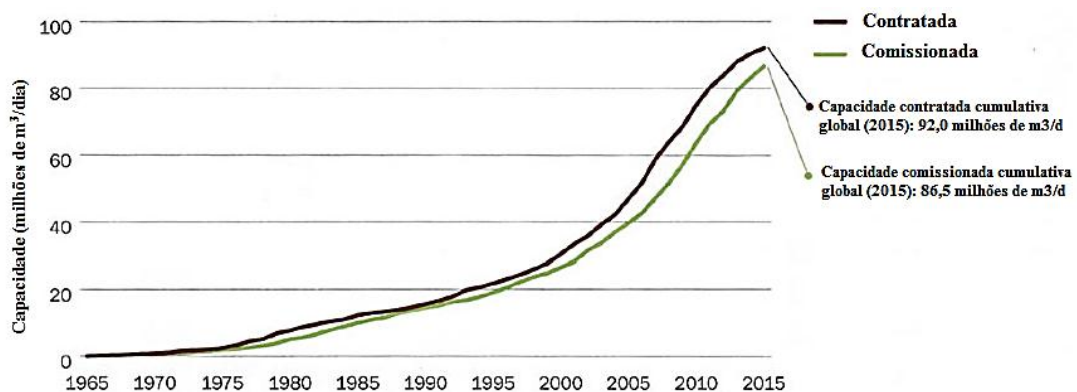
Fonte: Adaptado de CAROLINA (2013); LEVY (2008)

2.3 Dessalinização – Contexto Mundial

Atualmente o mercado da dessalinização continua a crescer exponencialmente, pois segundo a organização internacional de dessalinização (*IDA-International Desalination Association*, 2013), até Junho de 2013 foram registradas mais de 17 mil usinas de dessalinização pelo mundo, produzindo um volume de 80 milhões de m³/dia e praticada em mais de 150 países.

A capacidade de distribuição acumulada total comissionada e contratada das plantas de dessalinização instaladas no mundo (1965 – 2015) é mostrado na Figura 2.2.

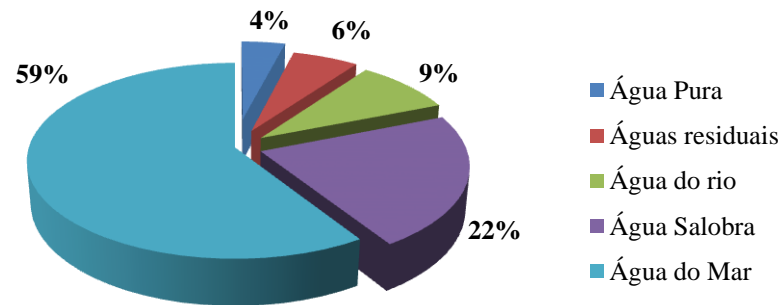
Figura 2. 2 - Capacidade global das plantas de dessalinização instaladas, 1965 - 2015



Fonte: GWI DesalData/IDA

Segundo o estudo da IDA, a distribuição total da capacidade das plantas instaladas no mundo segundo o tipo de água à dessalinizar é mostrado no gráfico da Figura 2. 3

Figura 2. 3 - Distribuição total da capacidade instalada pelo tipo de fonte água.



Fonte: Adaptado de BURN *et al.*, (2015)

2.4 Tecnologias e Processos de Dessalinização

Existe um número significativo de tecnologias de dessalinização tanto para água do mar quanto para água salobra. A escolha do tipo de tecnologia depende de certos fatores como: a demanda energética, qualidade da fonte de água.

Basicamente estes processos de dessalinização se dividem em duas categorias principais:

- Térmicos;
- Membrana.

O processo térmico de obtenção de água doce a partir de água salgada é assegurado por métodos de destilação. Os principais métodos são: destilação solar, destilação multi-efeito (DME), destilação multi-estágio *flash* (MEF) e compressão de vapor (CV).

Os Países do Oriente Médio foram pioneiros na criação e aplicação de dessalinização térmica, primeiro através de um processo chamado de destilação multi-efeito (DME) e depois através de um processo chamado de multi-estágio *flash* (MEF) de destilação (GREENLEE *et al.*, 2009). A tecnologia que utiliza processos térmicos, envolve a mudança de estado físico, e são raramente usadas para dessalinização de água de poços devido ao alto custo envolvido, e estão perdendo mercado para as membranas seletivas, devido basicamente, à escala de produção e à evolução da tecnologia (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2004).

Nos processos de separação por membranas temos a osmose reversa (OR) e a eletrodialise (ED) como mecanismos de maior relevância para a dessalinização de águas salinas e salobras. No processo de OR a separação dos componentes da água ocorre em função de um gradiente de pressão sobre uma membrana semipermeável, já na eletrodialise o processo de separação dos sais dissolvidos presentes na água acontece pela aplicação de uma

força electromotriz nos eléctodos. Nos processos de dessalinização por membranas não apresentam mudança de fase.

A dessalinização baseada na OR possui uma demanda menor de energia que a dessalinização térmica, este resultado é mais reforçado se o fornecimento de energia for através de energias renováveis e também se a redução do consumo de energia da OR for conseguida com sistemas de recuperação de energia.

Entretanto, as tecnologias térmicas de dessalinização não devem ser desconsideradas porque apresentam uma redução grande no potencial do impacto ambiental quando integradas com outros processos de produção, como os processos de membrana e tornando plantas híbridas (RALUY, SERRA e UCHE, 2006).

O resumo das principais tecnologias de dessalinização é apresentado na Tabela 2.1

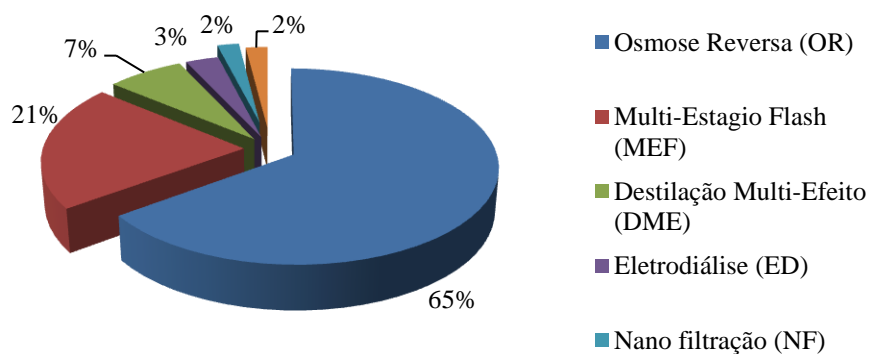
Tabela 2. 1 - Principais tecnologias de dessalinização

Tecnologia Térmica	Tecnologia de Membranas
Destilação por Compressão de Vapor (CV)	Osmose Reversa (OR)
Destilação Múltiplo Efeito (DME)	Eletrodialise (ED)
Multi-Estágio Flash (MEF)	
Congelamento	

Fonte: Adaptado de *RENEWABLE E AGENCY* (2012).

No entanto, os custos são uma limitação na escolha do tipo de tecnologias de dessalinização à adoptar para suprimento de água potável, por conseguinte, dentre as principais tecnologias de dessalinização apresentadas, a tecnologia de OR é a menos cara e portanto é a mais difundida e é a que mais cresce atualmente, como apresentado na Figura 2. 4

Figura 2. 4 - Capacidade instalada por tecnologia de dessalinização



Fonte: Adaptado de Burn *et al.* (2015)

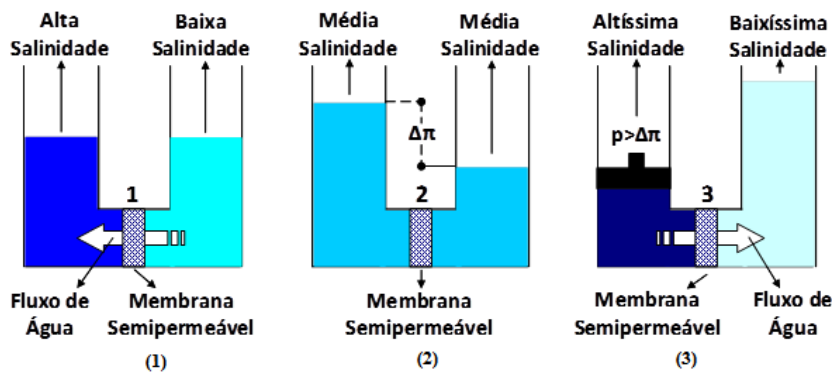
2.5 Fundamentos da Tecnologia de Osmose Reversa

A OR é um método de dessalinização de grande sucesso aplicado para água do mar, água salobra e água industrial (ABDELJAWAD, ALSHAMMARI E ALSULAIMI, 2002).

O método de OR baseia-se na separação de água a partir dos sais dissolvidos por passagem de água através de uma membrana semi-permeável a uma pressão maior que a pressão osmótica provocada pelos sais dissolvidos (HENTHORNE, 2009).

A Figura 2. 5 mostra as etapas que ocorrem durante o processo, sendo o processo natural, equilíbrio osmótico e a osmose reversa.

Figura 2. 5 - OR: (1) processo natural, (2) equilíbrio osmótico e (3) a osmose reversa.



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2011).

No processo natural, ocorre a passagem de água do meio menos concentrado para o meio mais concentrado (1), até que o equilíbrio osmótico seja atingido (2), no qual surge uma pressão osmótica $\Delta\pi$. No processo reverso, uma pressão externa "p", superior à pressão osmótica natural, é aplicada, invertendo-se o fluxo natural do solvente (água), de forma que a água é forçada a passar para o lado de concentração menor, restando um elevado grau de impurezas (3). Uma membrana de osmose reversa, quando submetida a pressões dessa ordem, promove um fluxo tangencial que ao percorrer sua superfície realizará a separação em duas correntes distintas, sendo uma com teor de sal maior que o fluxo inicial, denominada de concentrado (ou rejeito), e a outra com teor de sal bem menor, denominada permeado (ou água fresca), que flui através do centro da membrana e possui um elevado grau de pureza, baseado nos percentuais de rejeição da membrana utilizada.

Por exemplo para a pressão osmótica para água do mar com salinidade de 35000 mg/L é 2800 kPa e 140kPa para água salobra com salinidade de 1600 mg/L. Para OR, isto significa que para a dessalinização da água mar a pressão é maior e consequentemente maior energia será necessária (BURN *et al.*, 2015).

2.6 Demanda de energética em plantas de Dessalinização

O processo de dessalinização está crescendo em todo o mundo, mas o consumo de energia das plantas de dessalinização é a maior preocupação desta tecnologia (RENEWABLE e AGENCY, 2012). No entanto, 30 a 50% dos custos de funcionamento estão relacionados a energia (BURN *et al.*, 2015).

Segundo Hofert, (2009) desde 1995, o consumo de energia por m³ de água filtrada vem reduzindo consideravelmente. Tal redução ocorreu, em parte, pelo aumento da capacidade instalada por arranjo de membranas, que permitiu uma melhor otimização hidráulica da planta, e pelo aumento da eficiência energética do bombeamento, pela instalação de sistemas de rotação variável em bombas de alta pressão. Alguns avanços contribuíram para a diminuição dos custos de dessalinização de águas marinhas e salobra:

- Redução dos custos de produção e melhoria da qualidade das membranas pela automação do processo de produção;
- Maior área de membrana por módulo;
- Aumento significativo da produtividade dos módulos;
- Melhor rejeição de sais;
- Aumento da resistência ao cloro e operação estável a pressões mais elevadas

A Tabela 2. 2 mostra a energia necessária (kWh/m³) para vários tipos de tecnologias de dessalinização.

Tabela 2. 2 - Consumo de Energia (kWh/m³) para vários tipos de tecnologias de dessalinização.

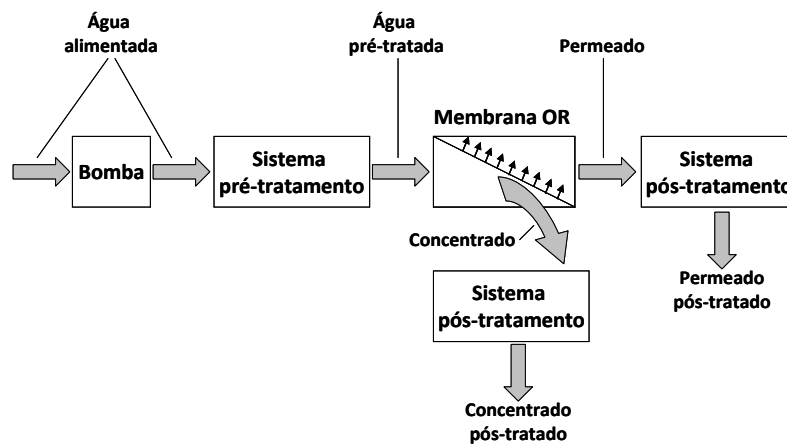
Processo de dessalinização	Energia Térmica (kJ/kg)	Energia Elétrica (kWh/m ³)
Águas do Mar		
Multi Estagio Flash (MSF)	190 - 290	4 - 6
Destilação Multi Efeito (DME)	150 - 290	2,5 - 3
Compressão de Vapor (CV)	-	8 - 12
Osmose Reversa (OR) sem recuperação de energia	-	7 - 10
Osmose Reversa (OR) com recuperação de energia	-	3 - 5
Água Salobra		
Osmose Reversa (OR) com recuperação de energia	-	1 - 3
Osmose Reversa (OR) sem recuperação de energia	-	1,5 - 4
Eletrodialise (ED)	-	1,5 - 4

Fonte: Adaptado de BILTON *et al.*, (2011)

2.7 Componentes Básicos de Sistemas de Dessalinização

Uma planta de dessalinização por OR pode ter diferentes configurações em função do tipo de água de alimentação e recursos financeiros disponíveis, mas em geral uma planta básica consiste essencialmente de quatro sistemas como na Figura 2.6: bombas de alta pressão, sistema de pré-tratamento, membranas e sistema de pós-tratamento, conforme características da água alimentada e finalidade de uso da água produzida.

Figura 2. 6 - Esquemático de uma planta de dessalinização por OR



Fonte: OLIVEIRA (2011).

2.7.1 Bombas de alta Pressão

A bomba de alta pressão é componente do sistema que gera a pressão necessária para as membranas produzirem uma vazão de água requerida com certa qualidade.

A escolha do conjunto motobomba depende da finalidade do sistema, potência requerida para atingir a altura manométrica desejada, volume de água e capacidade financeira.

Em sistemas de dessalinização são necessárias bombas de alta pressão, a fim de se vencer a pressão osmótica característica da solução, necessárias aos processos de OR.

Neste projeto foi escolhida a bomba de deslocamento positivo do tipo diafragma, acionada por um motor de ímã permanente de 12 volts CC. As bombas de deslocamento positivo são indicadas para operar de forma lenta e eficiente durante todo o dia para vazões na faixa de 0,3 a 40 m³/dia e alturas manométricas de 10 a 500 metros. As bombas de deslocamento positivo ou de diafragma são robustas, de baixo custo e consumo energético. As principais vantagens do uso dela residem no acoplamento com controladores eletrônicos para ajustar o ponto operacional do módulo FV (para potências de 50 a 400 Wp) e proporcionar corrente para a partida da bomba, reduzindo os custos efetivos, a capacidade de operar em sobretensão (PINHO e GALDINO, 2014).

2.7.2 Sistema de Pré-tratamento

O objetivo principal de qualquer sistema de pré-tratamento OR (para água do mar ou água salobra) é reduzir a propensão a incrustação da água no sistema de membrana OR.

Na superfície dos recursos hídricos (Água do mar e água salobra) normalmente têm uma maior propensão para entupimento da membrana e exigem sistemas de pré-tratamento mais extensos do que os recursos hídricos subterrâneos. Em geral, OR de água do mar tende a usar água de superfície, enquanto a OR de água salobra muitas vezes usa fontes de água subterrânea.

O pré-tratamento desempenha um papel crítico na remoção de constituintes na água fonte, como sedimentos e micróbios, o que poderia dificultar a jusante no processo de OR (HENTHORNE e BOYSEN, 2015).

Para águas subterrâneas, podem ser utilizadas apenas pré-tratamentos simplificados como um filtro de cartucho, desde que se respeite o limite de operação imposto pela membrana e pela concentração de cada composto, evitando assim a saturação e, conseqüentemente, a precipitação de minerais dissolvidos (RIFFEL, 2005). Vale lembrar que todas as características da água, seja físico-química ou microbiológica, variam durante o ano, dependendo da quantidade de chuva e de outros fatores, naturais ou não.

Entretanto, uma análise físico-química da água é extremamente importante para evitar, principalmente, a incrustação inorgânica (depósitos indesejáveis na superfície da membrana). Garantindo assim, um desempenho adequado na produção de água potável e maior tempo de vida das membranas.

2.7.3 Membranas Poliméricas

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 necessária 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). As membranas semipermeáveis são frágeis e variam em sua capacidade de passar água doce e rejeitar a passagem de sais.

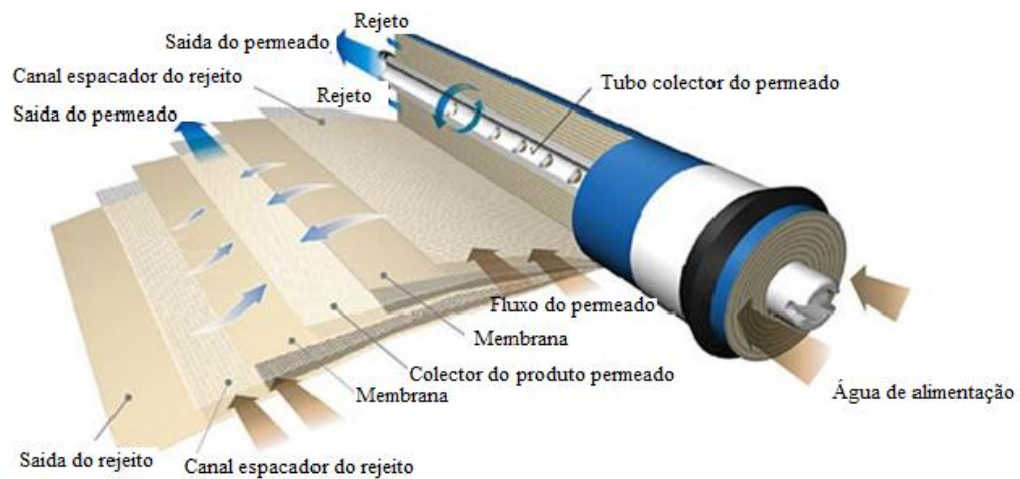
A tecnologia utilizada na síntese de filmes de porosidade controlada é dominada pelos polímeros orgânicos, podendo-se destacar três gerações distintas de membranas (SCHNEIDER, R.P.; TSUTIYA, 2001). A primeira se caracterizou por membranas simétricas

com poros regulares, quase cilíndricos que atravessavam toda a espessura da membrana. Os principais problemas foram a baixa resistência mecânica e a baixa produtividade. Com o avanço no controle da polimerização da membrana, a segunda geração, chamada de membranas assimétricas ou anisotrópicas, possibilitou a criação, normalmente por um único tipo de polímero, de uma fina película filtrante sobre uma estrutura mais grossa e porosa, responsável pela estabilidade mecânica do conjunto. A redução na espessura da película filtrante diminuiu consideravelmente a resistência à filtração e, conseqüentemente, o consumo de energia. A terceira geração possibilitou a criação de membranas com diferentes polímeros, possibilitando a diminuição da espessura da película filtrante, entre 0,1 μm a 0,5 μm ou 1 % da espessura do suporte poroso. Essas medidas reduziram ainda mais o consumo energético, bem como elevaram a resistência mecânica. No mercado da osmose reversa, predominam as membranas de terceira geração ou membranas compostas.

As membranas são comercializadas por módulos, sendo estes o conjunto de estruturas necessárias para a operação como unidade de separação. Além da membrana, o módulo contém estruturas de suporte mecânico e canais de alimentação e remoção do permeado e do concentrado, visando a limitar o acúmulo de material e a maximizar a superfície de contato sem contaminar o permeado com o concentrado.

Aplicações que demandam pressões acima de 300 kPa, normalmente, utilizam módulos em espiral, como a apresentada na Figura 2.7. Diversos elementos ou cartuchos de membrana espiral podem ser inseridos em um único módulo. Cada elemento consiste em um conjunto de membranas e espaçadores enrolados em volta de um tubo coletor de permeado central. Os canais de alimentação são delimitados por membranas dos dois lados, sendo que o canal de concentrado é mantido aberto por espaçadores no formato de telas. Diversos outros desenhos de módulos podem ser encontrados na literatura (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001), além dos módulos espirais, como: os módulos com placas, os módulos tubulares, os módulos com fibras ocas e os módulos com discos rotatórios. Na Figura 2. 7 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** é mostrada a configuração das membranas e corte transversal.

Figura 2. 7 - Secção esquemática da membrana de osmose reversa em espiral



Fonte: Adaptado de DOW FILMTEC™ Membranes (2015).

2.7.4 Parâmetros Característicos das Membranas

Cada unidade de membrana possui um gradiente de pressão (P_f), uma perda de carga (ΔP) e um rendimento (Y) característicos. A média aritmética da soma das pressões de alimentação (P_a) e do concentrado (P_r) menos a pressão de permeado (P_p) define o gradiente de pressão (P_f), pela Equação 2.1:

$$P_f = \frac{(P_a + P_r)}{2} - P_p \quad (2.1)$$

A perda de carga no elemento de membranas (ΔP) é a diferença de pressão entre a alimentação e o concentrado do módulo dado pela Equação 2.2:

$$\Delta P = P_a - P_r \quad (2.2)$$

Uma planta de OR pode possuir diversos vasos (recipientes que acondicionam as membranas) e esses podem conter diversas membranas. O quociente do fluxo de permeado (Q_p) pelo fluxo de alimentação (Q_a) de cada membrana define a taxa de recuperação, enquanto a mesma relação, quando se analisa a instalação como um todo, determina o rendimento da instalação (Y) segundo a Equação 2.3:

$$Y(\%) = 100 \times \frac{Q_p}{Q_a} \quad (2.3)$$

O percentual de rejeição de sal das membranas é determinado pela Equação 2.4:

$$\text{Percentual médio de rejeição de sais} = \left(1 - \frac{C_a}{C_p}\right) \times 100(\%) \quad (2.4)$$

Sendo: C_a – Concentração de sal da água de alimentação (mg/L);

C_p – Concentração de sal do permeado (mg/L)

2.7.5 Operação de Sistemas de Membranas

A seleção de componentes nas membranas de OR é proporcionada pela pressão, normalmente gerada por um motor-bomba e uma válvula instalada no concentrado. A bomba gera um produto pressão-vazão constante e a válvula regula a pressão de alimentação, controlando a vazão do concentrado. A pressão de alimentação determina a "qualidade" da água produzida.

A produtividade depende do fluxo de água permeada pela membrana (Q_p), que, por sua vez, é condicionada por uma série de fatores que, coletivamente, constituem a resistência da membrana à filtração, tais como (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001):

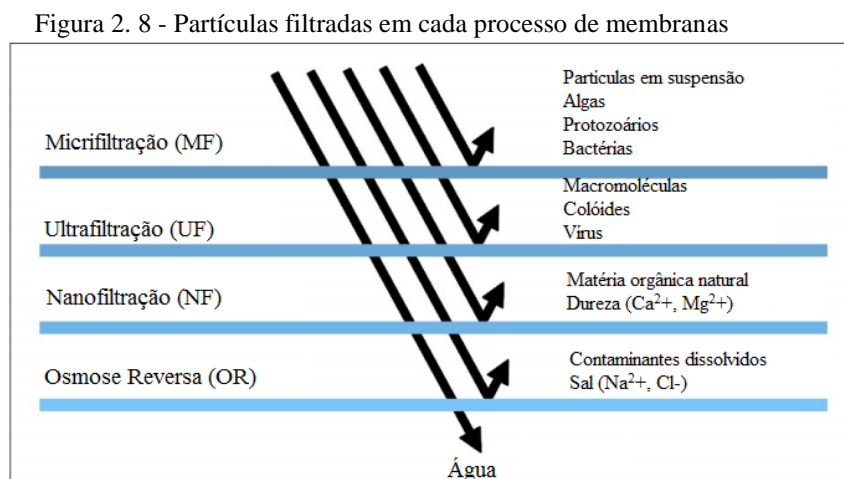
- Raio médio dos poros (r_p): esse sendo substancialmente inferior ao raio geométrico, devido, principalmente, a fatores eletrostáticos e a interação entre as moléculas de água com a superfície da membrana;
- Porosidade da membrana (f_r): fração da área de membrana ocupada por poros;
- Espessura efetiva da membrana (δ_m);
- Gradiente de pressão (P_f);
- Viscosidade absoluta da água (μ);
- Fator de tortuosidade do poro (θ);
- Fenômenos operacionais, como, por exemplo, a camada de concentração-polarização;
- Camadas de material retido na superfície da membrana (torta de filtro);
- Géis ou camadas de sais precipitados (*fouling* químico);
- Biofilmes (*fouling* biológico);

O fluxo de água permeada (Q_p), portanto, pode ser escrito pela Equação 2.5:

$$Q_p = \frac{f_r^2 \cdot P_f}{8 \mu \theta \delta_m} \quad (2.5)$$

A Equação 2.5 é válida para as primeiras horas de operação, porque, depois de um determinado tempo de operação, impreterivelmente, começa a formação da camada de concentração-polarização das tortas de filtro, das camadas de sais precipitados sobre a membrana e dos biofilmes. A influência que cada parcela dessas traz ao fluxo de água permeada é de difícil mensuração e normalmente só pode ser medida por meio de uma autópsia. Isso nos mostra que, dificilmente, poderemos projetar um sistema de OR sem levar em consideração a incrustação e seus efeitos tanto na produção de água permeada, como na redução da vida útil da membrana. Nesse caso, o rendimento é prejudicado, acarretando perda na qualidade da água permeada e aumento do consumo específico (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

Os processos de OR podem rejeitar os contaminantes menores, os íons monovalentes, enquanto outros, incluindo membranas de nanofiltração (NF), ultrafiltração (UF) e de microfiltração (MF), são concebidos para remover os materiais de tamanho crescente, tal como indicado na Figura 2.9.



Fonte: Adaptado de Araújo (2013).

2.7.6 Sistema de Pós-tratamento

De forma análoga ao pré-tratamento, o pós-tratamento é recomendável dependendo da finalidade do uso da água produzida, principalmente pelo fato de que o processo de OR barra a maior quantidade dos sais, o que inviabilizaria o consumo humano, por exemplo. Por outro lado, como mencionado, a dessalinização gera, além do permeado, uma água residuária (concentrado) altamente salina e de poder poluente elevado, cujo destino e uso podem ou não causar grandes impactos ambientais. Devido a isto, opta-se, algumas vezes, pela utilização de um sistema de pós-tratamento também no fluxo do concentrado.

Embora não seja objeto de estudo desta dissertação, é importante ressaltar a preocupação na correta disposição do concentrado, uma vez que esse fluxo residuário pode causar grandes impactos ao meio-ambiente. Devido à alta salinidade em que se encontra, o concentrado pode ser utilizado, em regiões semi-áridas tais como o Nordeste brasileiro, nos cultivos de acerola, nos tanques de criações de peixes e camarões, em plantações de coqueiros e misturado às rações dos animais. Outra aplicação do concentrado, é no cultivo da conhecida “erva do sal” (*Atriplex nummularia*), esta que é classificada como planta halófito a qual, além de suportar altos níveis de salinidade, acumula significativa quantidade de sais em seus tecidos.

2.7.7 Disposição do Concentrado

Um problema que envolve a dessalinização é o que fazer com a produção de resíduos da filtragem (concentrado), já que eles não podem ser depositados diretamente na natureza, pois este procedimento provoca a salinização do solo, que é prejudicial às culturas que nele crescem (HEE e TANSEL, 2015).

Atualmente, o manejo do concentrado esta a ser fonte de estudo em função em função da qualidade da água a ser tratada. No estudo de MOURA, J.P.; MONTEIRO, G.S.; SILVA, J.N.; PINTO, F.A.; FRANÇA (2008) propõem soluções como a criação de crustáceos ou plantas capazes de se desenvolverem em um meio salino. O concentrado de unidades próximas à costa do mar normalmente é lançado ao mar, não causando, com isso, grandes impactos ambientais.

Entretanto, o maior problema se encontra em unidades de dessalinização de águas salobras instaladas no interior do continente, onde o concentrado chega a possuir uma concentração até 10 vezes a da água bruta original. Este concentrado é, muitas vezes, despejado novamente no poço de origem, salinizando-o ainda mais. Em outras ocasiões, o concentrado é lançado sobre o solo o que, em pouco tempo, pode esterilizá-lo (RIFFEL, 2005).

PESSOA (2000) analisou o impacto ambiental dos dessalinizadores instalados no interior do Ceará, apresentando algumas experiências positivas, como o cultivo de acerola, a criação de tanques de peixes (tilápias) e de bebedouros para animais.

2.8 Fontes Renováveis de Energia para a Dessalinização

A dessalinização com base na utilização de fontes de energia renováveis pode ser usada no fornecimento de água doce de forma sustentável. Espera-se tornar uma combinação

economicamente atraente uma vez que o custo das tecnologias renováveis continua a diminuir e os preços pelos combustíveis fósseis vai aumentando.

O uso dos recursos renováveis locais para a dessalinização é provavelmente uma solução eficaz, particularmente nas regiões remotas com pouca densidade populacional, pouca infra-estrutura para obtenção de água doce e transmissão de energia elétrica (RENEWABLE e AGENCY, 2012).

As principais fontes de energias renováveis para o uso em processos de dessalinização incluem a energia eólica, solar térmica, solar fotovoltaica e geotérmica.

Inúmeras tentativas e experiências foram realizadas em todo o mundo em uma tentativa de encontrar os procedimentos de acoplamentos adequados entre os processos de dessalinização e energias renováveis (ELTAWIL, ZHENGMING E YUAN, 2009).

A escolha da fonte renovável de energia mais adequada para o acionamento de sistemas de dessalinização requer a análise inicial de algumas premissas, tais como:

- A disponibilidade local e viabilidade de utilização do insumo energético;
- A potência a ser demandada de acordo com a capacidade de produção da planta;
- A tecnologia de dessalinização escolhida de acordo com o tipo/qualidade da água a ser dessalinizada e a finalidade da água produzida;
- A disponibilidade local de pessoal experiente para manutenção e operação da planta com a fonte energética específica;
- O porte do sistema (compacto ou de larga escala);
- A necessidade ou não de conexão à rede;
- O custo total do sistema.

Portanto, para se escolher a fonte correta, é necessário fazer um estudo detalhado do local, do potencial energético disponível, do acesso ou não à rede pública e da tecnologia de dessalinização escolhida. Um fato frequente que ocorre é que as áreas geográficas com grande necessidade de água (regiões áridas e semiáridas) são providas com grande potencial de fontes renováveis de energia, seja solar, eólica, biomassa ou outra. Desta forma, o melhor caminho é combinar essas fontes com a planta de dessalinização, no sentido de prover água potável, como desejado.

A demanda solicitada pela tecnologia de dessalinização e a disponibilidade de energia da fonte renovável determinam o casamento ideal entre os dois subsistemas, havendo diversas combinações possíveis, como apresentadas pela *RENEWABLE e AGENCY*, (2012) combinações possíveis de energias renováveis e tecnologias de dessalinização na Tabela 2. 3.

Tabela 2. 3 - Combinações possíveis de tecnologias dessalinização com energias renováveis.

Fonte renovável	Tecnologias de dessalinização				
	Tecnologia térmica			Tecnologia por membrana	
	MEF	DME	CV	OR	ED
Solar térmica	●	●			
Solar FV				●	●
Eólica			●	●	●
Geotérmica	●	●	●	●	●

Fonte: Adaptado de AL-KARAGHOULI E KAZMERSKI, (2007) e RENEWABLE E AGENCY, (2012);

Uma vez que existem muitos critérios a levar em conta na determinação da melhor combinação entre fontes renováveis e a tecnologia de dessalinização, há uma vasta gama de instalações existentes alimentadas com fontes renováveis como apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2. 4 - Tecnologia de dessalinização alimentada por Energia Renovável

Distribuição da tecnologia de dessalinização alimentada por Energia Renovável	Capacidade instalada (%)
Osiose Reversa – Energia solar fotovoltaica (OR – FV)	32
Eletrodíálise - Energia solar fotovoltaica (ED – FV)	6
Destilação Multi Efeito – Energia Solar (DME – Solar)	13
Multi Estagio <i>Flash</i> – Energia Solar (MEF – Solar)	6
Osiose Reversa - Energia eólica (OR – eólica)	19
Compressão de Vapor – Energia eólica (CV – eólica)	5
Outros	19
Total	100

Fonte: Adaptado de GHAF FOUR *et al.*, (2015)

Dessas possibilidades de combinações tecnológicas de dessalinização e fontes de energias renováveis apresentadas na Tabela 2.5, a combinação entre a tecnologia de dessalinização por OR e as energias renováveis é a que mais cresce, como apresentado na Tabela 2.5.

Tabela 2. 5 - Capacidade global instalada por tecnologia alimentada por fontes de energia renováveis

Tecnologia de dessalinização alimentada por Energias renováveis	Capacidade global instalada (%)
OR (Osmose reversa)	62
Multi Estágio flash (MEF)	10
Destilação Multi Efeito (DME)	14
Destilação por Compressão de Vapor (CV)	5
Eletrodialise (ED)	5
Outros	4

Fonte: GHAF FOUR *et al.*, (2015)

A fonte dominante de energia é a solar fotovoltaica com cerca de 43% das plantas de dessalinização. A combinação da tecnologia ORFV é a mais difundida devido a simplicidade de ambas tecnologias e modularidade.

Muitas instalações de dessalinização de pequenas escala na faixa de 1 – 5 m³/dia foram testadas em todo mundo, especialmente em áreas remotas, onde as comunidades são pequenas e o recurso de água doce é limitado.

As principais vantagens da utilização da energia solar FV em sistemas de dessalinização são a grande abundância de irradiação em áreas semiáridas, que geralmente sofrem com a escassez de água, e a habilidade em adaptar-se em plantas de qualquer porte, seja um sistema de dessalinização de água salobra para uma residência (pequeno porte), seja um sistema de dessalinização de água do mar para uma cidade (grande porte)

Por um lado, as membranas, em especial a de OR, têm sido a tecnologia mais utilizada devido aos inúmeros benefícios, tais como avanço tecnológico, facilidade de adaptação, baixa necessidade de consumo energético e eficiência na dessalinização de água do mar ou água salobra, produzindo permeado potável.

2.9 Experiências Mundiais em Unidades ORFV

A crescente escassez de água potável e energético aponta positivamente para soluções que utilizem o potencial energético local sem degradar o meio ambiente. A união dessas duas tecnologias modulares, a fotovoltaica e a osmose reversa, possibilita a obtenção de água potável em locais remotos onde a energia solar é abundante. (SOARES, 2008).

Para o estudo fez se o levantamento apresentado na Tabela 2. 6, diferentes plantas de dessalinização de água salobra por ORFV que será o foco de estudo da presente dissertação.

Tabela 2. 6 - Plantas de dessalinização de água salobra acionadas por painéis fotovoltaicos no mundo

Localização da Planta, PAÍS	Água Alimentação (ppm)	Capacidade FV (kWp)	Uso de Baterias	Permeado Produzido (m ³ /dia)	Consumo Específico (kWh/m ³)	Custo Específico (R\$/m ³) *
Sadous Riyadh, Arábia Saudita	5800	10,08	Sim	15	-	-
Magan, Israel	4000	3,5+0,6 Eólica	Sim	3	-	19,58
Elhamarawien, Egipto	3500	19,8	Sim	53	0,89	-
Heelafar Rahab Oman	1000	3,25	Sim	5	-	11,13
White Cliffs, Austrália	3500	0,34	Não	0,5	2 - 8	-
Haifa, ISR	5000	3,5+0,6 Eólica	Sim	3		
Solar flow, Austrália	5000	0,12	Não	0,4	1,86	19,2
Hassi-Kheba, Algeria	3200	2,59	-	0,95	-	17,8
INETI, Lisboa, Portugal	5000	0,05 – 0,15	Não	0,1 – 0,5	-	-
Conception del Oro, México	3000	2,5	Não	0,71	6,9	-
Thar desert, Índia	5000	0,45	-	1	-	-
Perth Austrália	-	1,2	-	0,4 -0,7	4 – 5,8	-
Gillen Bore, Austrália	1600	4,16	-	1,2	-	-
Kassir GHilen, Tunísia	5700	-	-	50	-	-
Mesquire, Nevada	3500	0,4	-	1,5	1,38	6,4
Univer.of Almeria, Espanha	-	23,5	-	2,5	-	-
Aqaba, JOR	4000	16,80	Sim	58,00	2,75 **	17,44
Coite-Pedreiras, Ceará, Brasil	1200	1,10	Sim	6,00	3 – 4,7	22,78
Concepción del Oro, México	3000	2,50	Sim	0,71	6,90	22,78
Denver, ITN, USA	1600	0,54	Não	1,50	1,40	11,57
El Hamrawein, EGY	3500	19,84	Sim	53,00	0,90	20,65
Fredericksted, VIR	4400	19,84	Sim	75,70	1,57	20,65
Gillen Bore, AUS	1600	4,16	Sim	1,20	9,88 **	20,65
Giza, EGY	1600	7,00	Sim	6,00	5,54 **	20,65
Hammam Lif, TUN	2800	0,59	Não	0,05	22,42 **	20,65
Hassi Khebi, DZA	3500	2,59	Sim	0,85	2,10	17,80
Heelat Ar Rakah, OMN	1010	3,25	Sim	5,00	2,30	11,57
Java, Cituis West, IDN	1600	24,50	Sim	12,00	7,76 **	11,57
Ksar Ghiléne, TUN	3500	10,50	Sim	7,00	2,10	11,57
Kulhudhuffeshi, MDV	2500	0,30	Não	1,00	2,85 **	11,57
Kuwait, KWT	8000	0,30	Sim	1,00	2,85 **	11,57
Lisboa, INETI, Portugal	2549	0,10	Não	0,02	29,10	18,87
Maagan Michel, Israel	5000	3,50	Sim	3,00	5,54 **	12,10
Mar Vermelho, Egipto	4400	19,84	-	50,00	4,15 **	-
Mesquite, ITN, USA	3480	0,54	Não	1,28	3,21 **	6,41
Murdoch Univ., Austrália	3480	0,06	Não	0,05	4,56 **	6,41
Nicosia, CYP	3480	10,00	Sim	50,40	4,52 **	4,09

NRC, Cairo, Egípto	2000	1,10	Sim	1,00	8,36 **	6,59
Pine Hill, Austrália	5300	0,60	Não	1,10	1,50	6,59
Qatar village, Jordânia	3400	32,00	Sim	45,00	5,40 **	17,09
Sadous, Riyadh, SAU	5700	10,08	Sim	5,70	8,40 **	17,09
Seriwa, Perth, AUS	5700	1,20	Sim	0,55	4,90	17,09
Solarflow, AUS	5000	0,12	Não	0,40	2,85 **	16,55
Spencer Valley, NM, USA	1000	2,30	-	2,80	3,12 **	-
Tanote, Thar desert, Índia	5000	0,45	Não	1,00	4,28 **	16,55
Univ. Almería, Espanha	3360	23,50	Sim	8,09	2,50	4,45
Univ. Amman, Jordânia	400	0,07	Não	0,10	5,32 **	4,45
Various locations, Jordânia	7000	1,10	Sim	3,60	2,90 **	16,02
Wanoo Roadhouse, Austrália	7000	6,00	Não	3,60	6,33 **	16,02
White Cliffs, Austrália	3500	0,26	Não	0,06	8,00	16,02

(*): para valores em dólar americano, utilizou-se uma taxa de câmbio de 1,78 R\$/US\$.

(**): estimado pela produção total de água e consumo global do sistema.

(-): não informado na literatura.

Fonte: Adaptado de Oliveira (2011); Ali Al-Karaghoul, David Renne, Lawrence L. Kazmerski (2009); Lauren F. Greenlee Desmond F. Lawler, Benny D. Freeman, Benoit Marrot, Philippe Moulin (2009);(ELTAWIL; ZHENGMIN; YUAN, 2009);

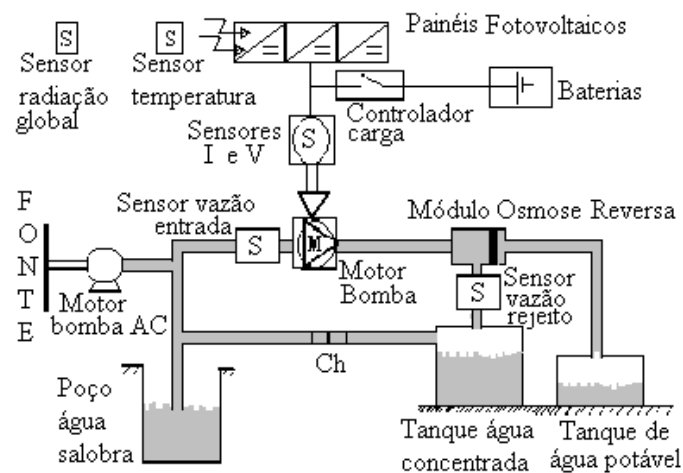
Nas diferentes plantas apresentadas na Tabela 2. 6, observa-se uma grande variação nos valores de consumo específico (kWh/m³), devido, principalmente, à diferença de escala entre os projetos e ao uso de sistemas de armazenamento de energia (baterias).

2.9.1 Experiências no Brasil

CARVALHO *et al.*, (2004) desenvolveram a primeira unidade de OR acionada por módulos FV do Brasil, instalada na comunidade de Coité – Pedreiras em Caucaia, no estado do Ceará, onde se encontra uma temperatura anual média de 28 °C e um potencial anual de energia solar de cerca de 2.000 kWh/m². Os componentes principais da instalação são: 8 baterias (12V, 100Ah) com controlador de carga, 1 membrana de OR (produção de água potável nominal de 250 L/h) e 20 módulos FV de 55 Wp cada. A planta é equipada com sensores para a medição da radiação solar global, temperatura ambiente e do módulo, velocidade do vento, fluxo de água potável e a tensão e a corrente fornecida para as baterias e para o motor. Dois sensores de fluxo são usados para medir o fluxo de água de alimentação e do concentrado. A Figura 2.10, apresenta um esquema com a configuração básica da unidade. Nesse projeto, somente a energia necessária para acionar o processo da osmose reversa foi suprido pelos módulos fotovoltaicos; a bomba do poço foi acionada diretamente pela rede convencional de distribuição.

A escolha da localidade para instalar o projeto, pioneiro no Brasil, levou em consideração a situação do suprimento de água potável e a organização social local. A comunidade beneficiada conta com uma população de cerca de 150 famílias. O poço da localidade possui uma concentração de sais da ordem de 1200 mg/L (água salobra), considerada imprópria para o consumo humano. A comunidade buscava água potável de outro local, a aproximadamente 2 km de distância, esse serviço é feito normalmente por mulheres ou crianças. A Figura 2. 9, apresenta a configuração da unidade ORFV pioneira no Brasil.

Figura 2. 9 - Configuração básica da unidade ORFV pioneira no Brasil



Fonte: Montenegro (2001).

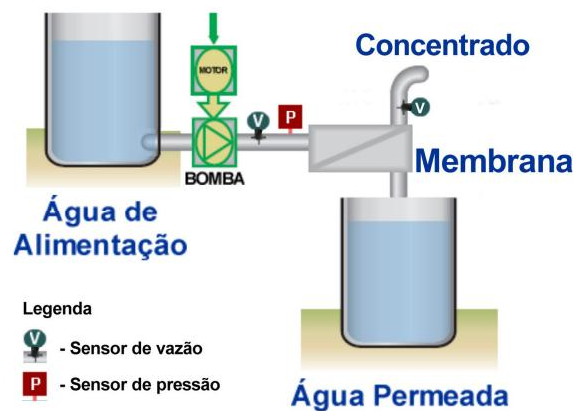
Riffel (2005) desenvolveu um sistema de OR com a utilização de tecnologia FV para o suprimento de água potável da dessalinização da água salobra oriunda de poços profundos, no semiárido nordestino brasileiro, sem a utilização de baterias. Uma unidade de OR acionada por energia solar FV sem baterias foi instalada em laboratório da Universidade Federal do Ceará. A ausência do banco de baterias proporciona uma redução dos custos e da necessidade de manutenção; ao mesmo tempo em que altera de sobremaneira, a operação da unidade, tornando-a totalmente subordinada às condições instantâneas da radiação solar e da temperatura ambiente. Um procedimento metodológico foi desenvolvido para projectar esse tipo de unidades, utilizando como parâmetros de projeto, dados estatísticos da irradiância solar e a possibilidade de complementaridade sazonal da obtenção de água potável através de cisternas. Dois sistemas foram matematicamente modelados e validados experimentalmente. O Sistema 1 possui um conjunto motobomba acoplado diretamente a 2 módulos FV e 55Wp cada. Para o sistema 2 foram acrescentados 1 módulo FV da mesma potência e um conversor CC-CC abaixador (*Buck*) de tensão com seguidor de máxima potência entre o arranjo fotovoltaico e a carga. A necessidade de se regular a potência entregue à carga, pelo Sistema 2, motivou o

desenvolvimento do conversor e do algoritmo, seguidor de máxima potência, especialmente para esta aplicação. As simulações possibilitaram uma comparação entre os dois sistemas, realizada em duas situações: com e sem a inserção de uma válvula de alívio no Sistema 1.

A unidade ORFV sem baterias, utilizando o Seguidor de Ponto de Máxima Potência, representado pelo Sistema 2, conseguiu operar durante 9 h. E, teve uma produção de 287,7 L de permeado, quase 90 % acima do Sistema 1 com a válvula de alívio e 576 % do sem a válvula. A taxa de recuperação média ficou acima de 11 % e o consumo específico acima de 1,33 kWh/m³. A salinidade da água de alimentação utilizada nas comparações possuía 800 mg/L de sólidos totais dissolvidos.

Todas as comparações mostraram uma ampla vantagem do Sistema 2, seja na produção média diária de água potável, no período diário de operação, no consumo específico ou na relação potência fotovoltaica por litro de água produzida. As bombas volumétricas, neste caso de diafragma, foram provadas para aplicação em unidades de OR. No entanto, para o acionamento FV, torna-se necessário a adoção dos seguidores de máxima potência. Na Figura 2.11, o esquema hidráulico da unidade de OR e o protótipo montado.

Figura 2. 10 - Esquema hidráulico da unidade de OR

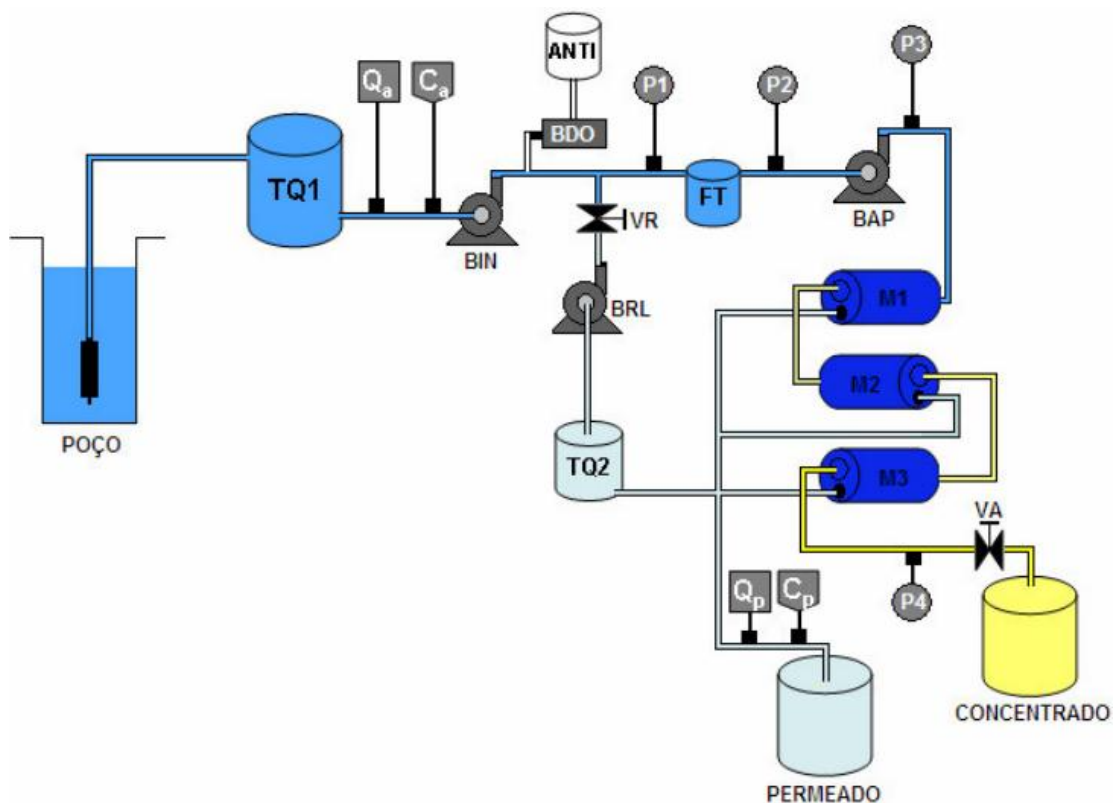


Fonte: RIFELL (2005).

LIMA (2006) desenvolveu um sistema de dessalinização por osmose reversa accionado por gerador fotovoltaico com conversor de frequência na Universidade Federal de Pernambuco. Foi estudada as condições operacionais de um sistema de osmose reversa (OR) com 3 membranas em série, com capacidade de produção de 250 L/h e um grau de salinidade máximo de 5000 mg/L, operando em três configurações: Configuração A, com o sistema conectado diretamente a energia elétrica convencional, obtendo-se resultados da unidade para uma frequência fixa de (60 Hz); Configuração B, com um conversor de frequência como interface entre a rede elétrica e o sistema OR, possibilitando o ensaio para várias frequências de rotação do motor; Configuração C, utilizando o conversor de frequência entre o gerador fotovoltaico com 16 módulos em série de 55 Wp cada e o sistema de OR. Os resultados obtidos na configuração A representaram o comportamento do

sistema OR em função das variáveis de estudo: pressão, vazão e concentração de entrada, vazão e concentração do permeado para diversas posições da válvula de controle (VA) do fluido na saída da unidade de OR. Na configuração B foram obtidos resultados experimentais para diversas frequências de operação, vazão e pressão de entrada no sistema de membranas e salinidade da água de alimentação, para três posições da válvula de controle (VA). Determinou a região de operação, vazão mínima e máxima, pressão máxima e mínima, de acordo com as características da membrana e o tipo de água a ser tratada. Foram obtidos outros resultados como: taxa de recuperação para vários níveis de salinidade e diferentes pressões de operação. Os resultados foram utilizados como parâmetros de entrada para projectar o sistema fotovoltaico que aciona o sistema de OR. Na configuração C, foram realizados ensaios para dois níveis de salinidade de entrada 2000 e 5000 mg/L. Na operação da planta com 2000 mg/L e irradiação 14,19 MJ/m², a produção foi de 625 L/dia e com a concentração salina de 5000 mg/L e irradiação de 18,23 MJ/m² a produção foi de 540 L/dia. Para 2000 e 5000 mg/L de salinidade, os valores do consumo específico foram de 3,7 e 6,1 kWh/m³ respectivamente. A Figura 2.11 apresenta o diagrama da configuração utilizada com opção da utilização de três configurações mencionadas anteriormente.

Figura 2. 11 - Configuração do sistema utilizado



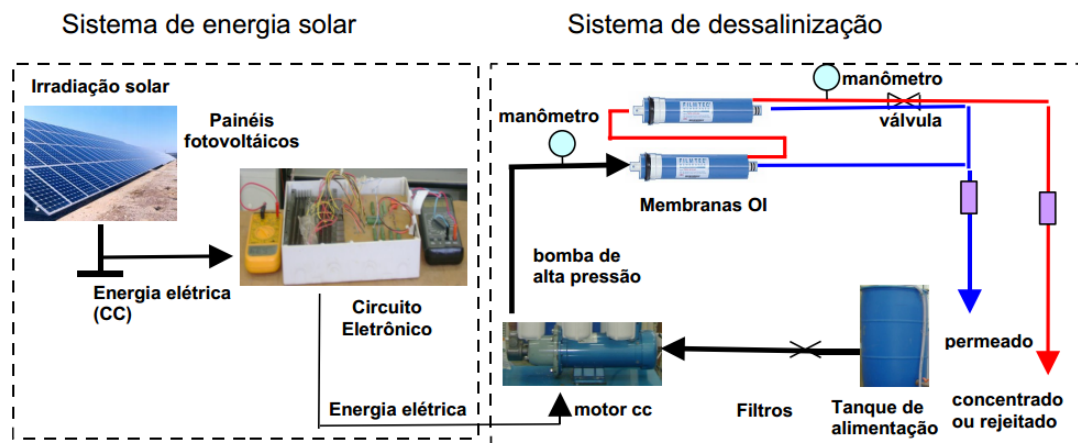
Legenda: TQ1 – reservatório da água de alimentação; BIN – motobomba de entrada; Q_a – Sensor de vazão da água de alimentação; C_a – medidor de condutividade da água de alimentação; BAP – direção da bomba de alta pressão; FT – filtro de sedimentos; BDO – motobomba doseadora, P1, P2, P3, P4 – sensores de pressão, TQ2 – tanque de retrolavagem; C_p – condutivímetro no permeado; VA – válvula de manipulação do sistema.

Soares (2008) desenvolveu um trabalho com objetivo de avaliar o processo de dessalinização por ORFV, seus consumos energéticos e custos. O projeto foi desenvolvido e

instalado no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES), na Universidade Federal de Campina Grande, um sistema constituído de duas membranas de OR, alimentado por um conjunto de 16 painéis FV, um motor-bomba de alta pressão de 1 HP, 90DC/9,3 A/746 W/1750 rpm da *Pacific Scientific*. O desempenho do sistema foi avaliado com soluções de cloreto de sódio com concentração variando de 1000, 1200, 1500 e 2000 mg/L. As variáveis medidas, como: pressão, tensão, corrente e vazão as quais foram obtidas através dos sensores elétricos e armazenadas no computador pelo *Software Data Aquisition* permitiram avaliar os seguintes parâmetros: corrente elétrica, tensão do motor, potência elétrica, vazões do permeado e concentrado, recuperação e consumo de energia por m³ de água produzida. As concentrações de água de alimentação e irradiação solar influenciam consideravelmente a pressão, e conseqüentemente a produção de água permeada. O sistema mostrou condições técnicas de produzir 0,17 m³/h de água dessalinizada. A Figura 2. 12 a) mostra o de energia solar e b) O sistema de osmose reversa.

Figura 2. 12 - a) Sistema de energia solar

b) Sistema de osmose reversa

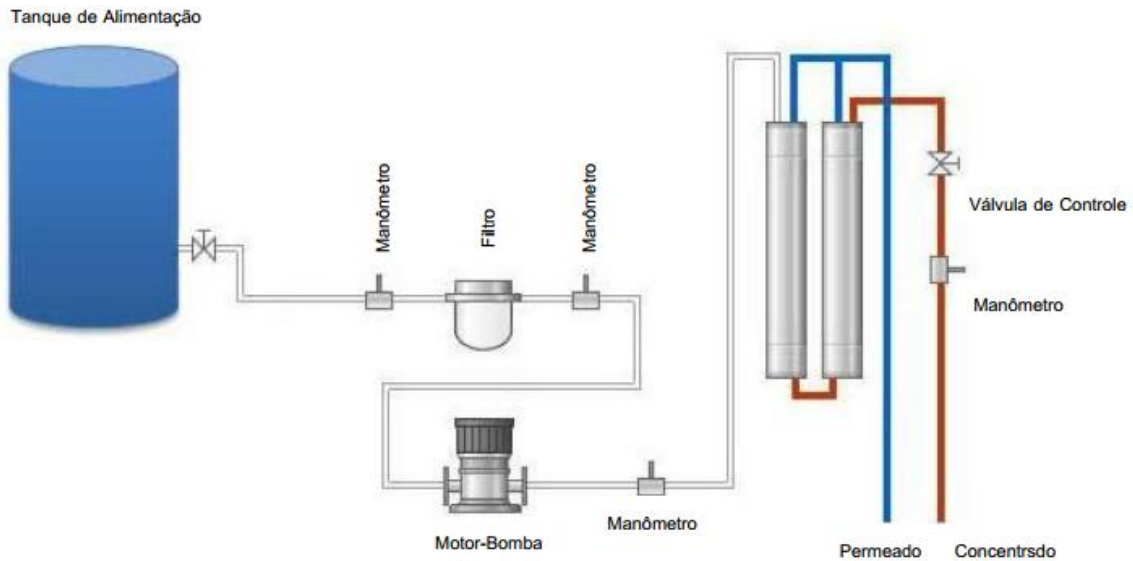


Fonte: Soares (2008)

Ribeiro (2009) apresentou na Universidade Federal de Campina Grande um estudo da oferta de energia solar visando à definição de um arranjo FV adequado para o acionamento de um sistema de dessalinização por OR. Para um dimensionamento adequado do arranjo, o sistema de dessalinização foi avaliado o sistema operando com disponibilidade de potência variável, sendo verificado seu perfil de funcionamento a partir do comportamento dos parâmetros: vazão do permeado, recuperação do sistema e condutividade elétrica do permeado. A avaliação do sistema permite caracterizar o efeito da disponibilidade de potência elétrica e da pressão de operação do sistema na quantidade e qualidade da água potável

produzida. Para os estudos do potencial de energia solar foram utilizados dados de irradiação solar do período de Janeiro/2007 à Dezembro/2008. Já para a avaliação do sistema de dessalinização foi utilizada como água de alimentação uma solução de cloreto de sódio de 2.000 mg/L para operação em níveis variáveis de potência (300 – 700 W) e de pressão (5 – 15 kgf/cm²). A Figura 2.13 apresenta o sistema experimental de dessalinização e tabela de produção do permeado para diferentes meses e os respectivos níveis de irradiância.

Figura 2. 13 - Sistema experimental de dessalinização;



Fonte: Ribeiro (2009).

Tabela 2. 7 - Tabela de produção do permeado.

G (W/m²)		400	500	600	700	800	900	1.000	1.100	1.200	1.300	Produção Diária (L)
Vazão Média (L/h)		137,9	166,8	193,4	217,4	238,9	257,7	273,9	287,1	297,6	297,6	
Jul.	Horas de Radiação (h)	1,59	1,23	0,97	0,74	0,54	0,31	0,08	0,02	0,00	0,00	
Fev.		1,07	1,24	1,00	1,02	0,98	1,13	0,88	0,79	0,25	0,01	
Jul.	Vazão (L)	219,8	204,5	187,5	160,9	129,6	80,4	23,0	6,9	0,0	0,0	
Fev.		148,0	207,2	193,3	220,8	233,1	291,3	239,9	226,3	74,2	3,1	1.837,2

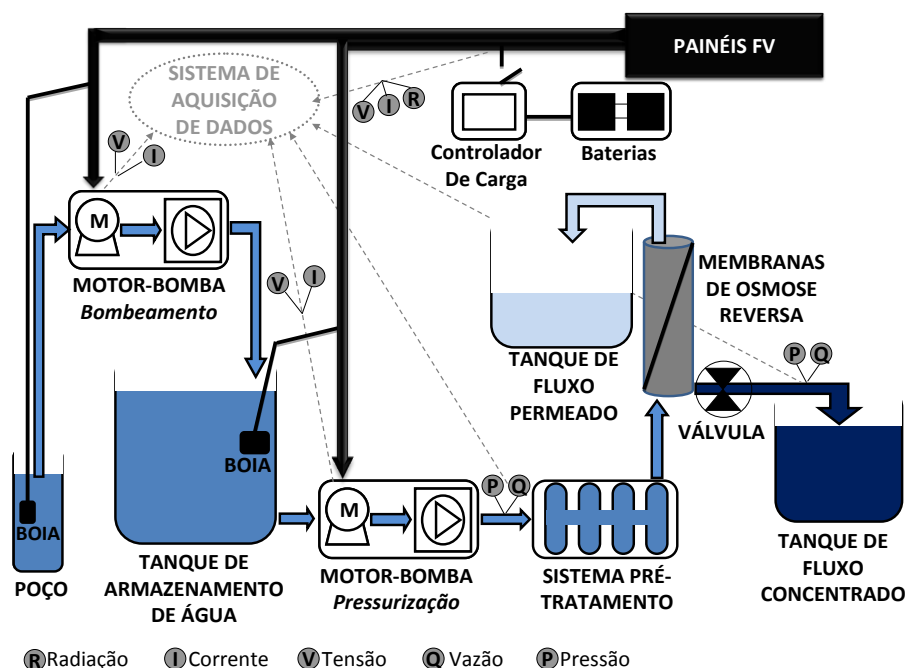
Fonte: Ribeiro (2009).

OLIVEIRA (2011) desenvolveu de uma planta de dessalinização via osmose reversa alimentada por energia solar fotovoltaica, para fins de viabilizar produção de água potável mediante dessalinização de água salobra de poços em regiões semi-áridas. A unidade, foi instalada no Laboratório de Energias Alternativas (LEA) da Universidade Federal do Ceará

(UFC), em Fortaleza - CE, Brasil, e dimensionada para abastecer o consumo *in natura* de aproximadamente 60 pessoas de uma comunidade do semi-árido cearense, dispondo, em geral, de um sistema fotovoltaico, um motor-bomba para bombeamento da água de um poço para uma caixa d'água, um motor-bomba para o processo de dessalinização, elementos filtrantes para o pré-tratamento, duas membranas de osmose reversa, além de um banco de baterias e um controlador de carga. Um aspecto inovador da planta desenvolvida foi, além da utilização de dois motores-bomba, a opção de alterar a configuração energética através da conexão ou não dos elementos armazenadores de energia e acréscimo ou diminuição na quantidade de placas fotovoltaicas, de forma a subsidiar a escolha da configuração que apresenta a melhor relação custo/benefício. Operou em diferentes níveis de salinidade na água de entrada, de forma a verificar o desempenho do sistema nas diferentes concentrações e configurações energéticas. As análises técnicas e financeiras foram efetuadas mediante tratamento das informações, coletadas através de diversos sensores conectados a um sistema supervisor. Os resultados mostraram que a unidade apresentou resultados satisfatórios e competitivos, comparando-se com as diversas plantas instaladas pelo mundo, concluindo que a configuração que traz a melhor relação custo/benefício é a planta sem a conexão do banco de baterias e utilizando 3 painéis fotovoltaicos, situação na qual fornece uma produção diária de água potável de 175 litros a 324,60 mg/L, com um consumo específico de 3,12 kWh/m³.

A Figura 2.14 mostra o esquemático geral da unidade ORFV desenvolvida.

Figura 2. 14 - Esquemático geral da unidade ORFV desenvolvida



3 SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ACIONAMENTO DE PLANTA DE DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA

O aproveitamento da energia solar, considerada inesgotável na escala de tempo terrestre, vem se tornando uma das mais promissoras alternativas para suprir a grande e crescente demanda energética mundial.

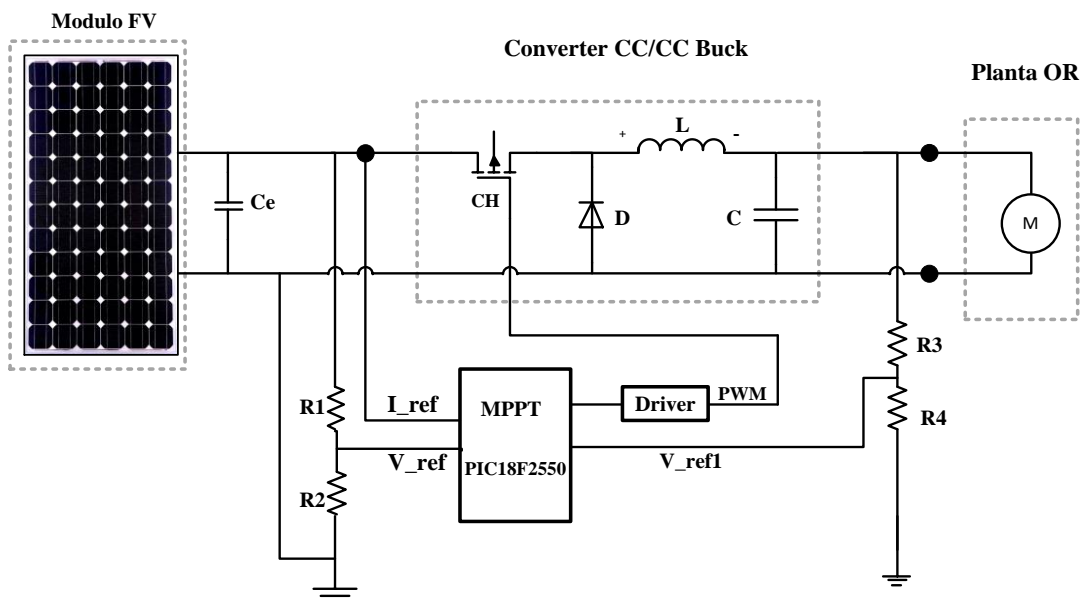
Uma das formas de se utilizar essa energia se dá através do efeito fotovoltaico, em que a energia é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade. Esse efeito, foi descoberto pelo cientista francês Alexandre Edmond Becquerel em 1839 (CARVALHO e JUCÁ, 2013; PINHO e GALDINO, 2014).

A energia solar fotovoltaica para plantas de dessalinização é uma ideia atrativa em todas as partes do mundo onde a água potável é escassa, e particularmente áreas remotas sem acesso a rede pública de eletricidade.

No presente projeto, para melhoria da eficiência da planta de dessalinização por OR acionada por módulos fotovoltaicos (FV) segue o diagrama apresentado na Figura 3.1, com a seguinte constituição:

- Módulo FV;
- Uma unidade de condicionamento de potência;
- Planta de OR.

Figura 3. 1 - Sistema FV conectado a Planta OR



Fonte: Elaborado pelo Autor (2015)

3.1 Módulos Fotovoltaicos (FV)

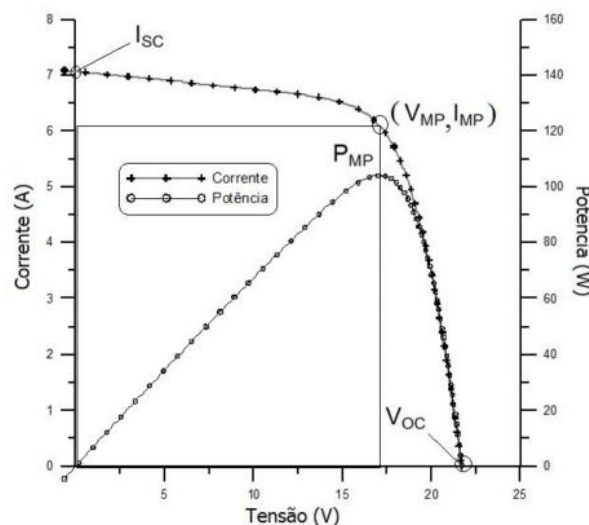
Segundo a NBR 10899, “o módulo FV é uma unidade formada por um conjunto de células FVs encapsuladas e interligadas eletricamente, com objectivo de gerar energia elétrica”. Os módulos FV podem ser conectados em série e/ou em paralelo dependendo da corrente, tensão e potência desejada (CHILUNDO, 2014).

As células FV são elementos responsáveis pela conversão direta da energia solar em energia elétrica e são feitas de material semicondutor. O semicondutor mais usado para a produção das células FVs é o silício (Si). Três formas de silício são largamente usadas no mercado: o monocristalino, que tem uma eficiência na ordem de 25% e elevado custo, o policristalino apresenta uma eficiência na ordem de 20,4%, que tem rendimento e custo intermédios e o silício amorfo que tem uma eficiência na ordem de 10,1% (Pinho e Galdino, 2014).

3.1.2 Características Elétricas dos Módulos FV

Os módulos FV são definidos pela potência elétrica de pico (W_p) dada pelo fabricante nas condições padrão de teste (1000 W/m^2 de irradiância, massa de ar de 1,5 AM e temperatura de 25° C na célula). Os módulos FV caracterizam-se por uma curva característica (I - V), que apresenta os seguintes parâmetros: tensão do circuito aberto (V_{OC}), corrente de curto-circuito (I_{SC}), ponto de máxima potência (P_{MP}), fator de forma (FF) e rendimento. A Figura 3.2 indica as principais características do módulo FV (BORGES NETO & CARVALHO, 2012).

Figura 3.2 - Curva I-V e a curva P-V para um módulo com potência de 100 Wp.



Fonte: PINHO & GALDINO (2014)

Para cada ponto na curva $I-V$, o produto corrente-tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação. A Figura 3.2 mostra também, além da curva $I-V$, uma curva de potência em função de tensão, chamada de curva $P-V$, que identifica o ponto com máximo valor de potência. A este ponto na curva de potência corresponde um ponto na curva de corrente, com valores de tensão e correntes específicos, que são denominadas, respectivamente, de tensão e corrente de máxima potência (V_{MP}, I_{MP}), conhecido como o ponto de máxima potência P_{MP} .

Fator de Forma (FF) - esta é uma grandeza que expressa, o quanto a curva característica se aproxima de um retângulo. Quanto melhor a qualidade das células dos módulos, mais próximo da forma retangular é a curva característica. Valores usuais para células solares ficam entre 70 e 80% (SEGUEL, 2009).

O rendimento (η) é um dos parâmetros das células FV que desde o começo da história da energia solar FV, o mundo científico tem-se focado nela porque até hoje as células apresentam rendimentos na ordem de 13 a 15% (BORGES NETO & CARVALHO 2012). Matematicamente este parâmetro é representado pela Equação 3.1:

$$\eta_{\text{módulo}} = \frac{P_{MP}}{S \cdot A_M} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Sendo: S a irradiância; A_M a área do módulo.

Para o módulo AZUR TSM 160M, sob as condições especificadas pelo fabricante, tem-se:

$S = 1000 \text{ W/m}^2$, $A_M = 1,38 \text{ m}^2$ e $P_{MP} = 160 \text{ W}$, portanto, a eficiência de conversão é dada pela Equação 3.2:

$$\eta_{\text{módulo}} = \frac{160}{1000 \cdot 1.38} = 11,59\% \quad (3.2)$$

3.2 Seguidor do Ponto de Potência Máxima

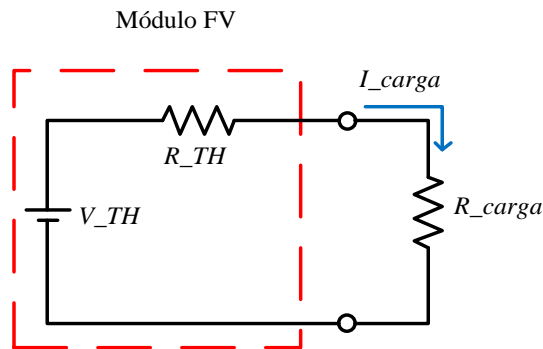
A baixa eficiência de conversão das células solares e o alto custo de instalação são os maiores obstáculos da geração de energia elétrica através de módulos FV. O máximo aproveitamento da capacidade de energia elétrica de um módulo FV é obtido quando o mesmo opera sempre no ponto de máxima potência (P_{MP} – *Maximum Power Point*).

Este ponto varia ao longo do dia, dependendo das condições de irradiância e da temperatura às quais for exposto. No entanto, devido a essas variações, a impedância interna do módulo FV também varia. Porém, para que se possa transferir a máxima potência o

teorema de Thevenin deve ser verificado, a resistência da carga deve se ajustar a cada variação da impedância interna do módulo FV (TENG *et al.*, 2010).

Supondo que o circuito equivalente de um módulo FV conectado a carga é o encontrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Esquema de demonstração de transferência de máxima potência



Fonte: Adaptado de (TENG *et al.*, 2010)

A potência entregue a carga é dada pela Equação 3.3 como:

$$P_{carga} = I_{carga}^2 \cdot R_{carga} = \left(\frac{V_{TH}}{R_{carga} + R_{TH}} \right)^2 \cdot R_{carga} \quad (3.3)$$

Onde: R_{carga} é resistência da carga;

V_{TH} é tensão de Thevenin;

R_{TH} é resistência de Thevenin

Para saber o valor de R_{carga} que maximiza a potência basta derivar a Equação 3.4 e igualar a zero.

$$\frac{dP_{carga}}{dR_{carga}} = \frac{(R_{carga} + R_{TH})^2 \cdot V_{TH}^2 - 2V_{TH}^2 \cdot R_{TH}(R_{carga} + R_{TH})}{(R_{carga} + R_{TH})^2} = 0 \quad (3.4)$$

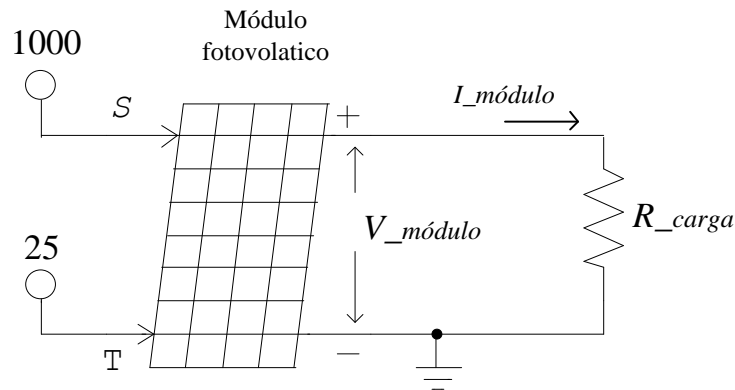
$$R_{carga} = R_{TH} \quad (3.5)$$

Pelo resultado da Equação 3.5, conclui-se que para que haja máxima transferência de potência a resistência de carga deve ser igual a resistência do módulo $R_{carga} = R_{TH}$.

Em geral, quando a carga é diretamente acoplada ao módulo, o ponto de operação não coincide com o P_{MP} , resultando em um sobredimensionamento do arranjo FV (CARVALHO *et al.* 2004).

Para que se possa entender como é determinado o ponto de operação de um módulo FV quando uma carga é conectada aos seus terminais, recorre-se à Figura 3.4.

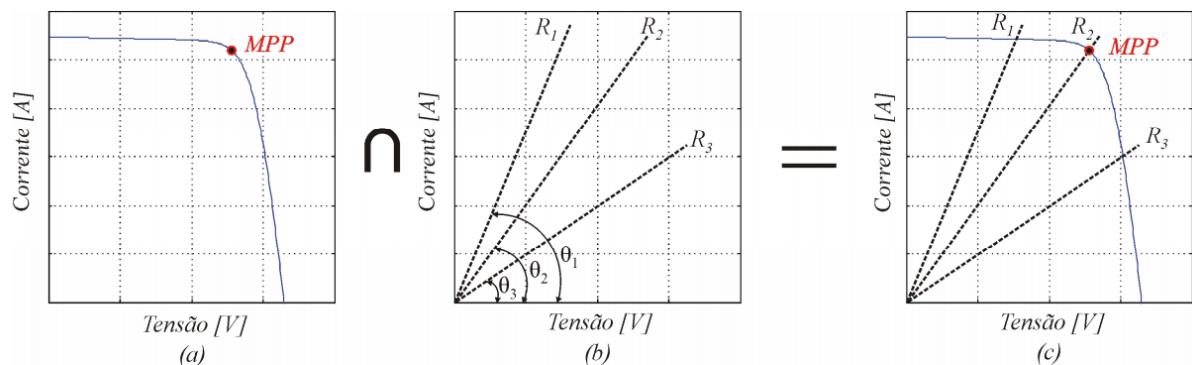
Figura 3.4 - Módulo FV conectado diretamente a uma carga.



Fonte: Adaptado de COELHO (2008)

Observando a Figura 3.4, pode-se ver que a corrente fornecida pelo módulo FV $I_{módulo}$ equivale à consumida pela R_{carga} e a tensão em ambos (módulo e carga) é a mesma. Sendo assim, o ponto de operação do conjunto fica definido pela interseção da curva característica de geração do módulo com a reta de carga, conforme retrata a Figura 3.5.

Figura 3.5 - Curvas I x V e de carga.



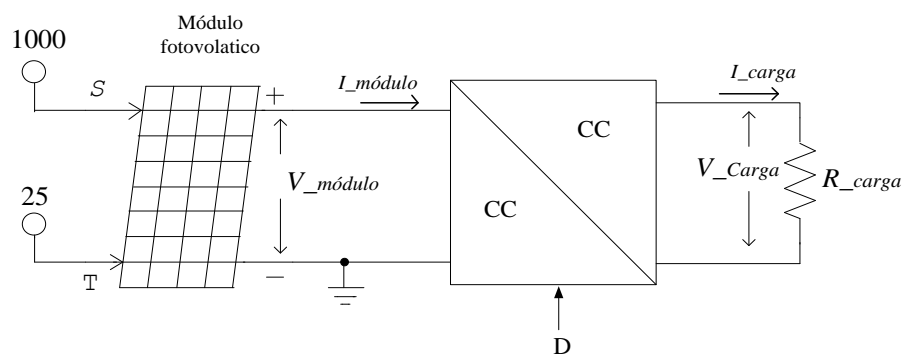
Fonte: COELHO (2008)

Através da análise da Figura 3.5 (c), nota-se que cada valor de carga (R_a , R_b e R_c) estabelece um ponto distinto de intersecção e, somente em casos específicos, onde o MPP e de operação são coincidentes e a potência transferida do módulo à carga será maximizada. Evidentemente, como a curva de geração dos módulos FV na Figura 3.5 (a) é extremamente dependente de fatores climáticos aleatórios, sem que seja empregada uma técnica para garantir que o sistema actue no P_{MP} , é pouco provável que isso ocorra naturalmente, de forma

que o sistema estará sempre subutilizado, operando com eficiência aquém da máxima possível.

Para solucionar este problema, comumente são utilizados circuitos capazes de modificar o ponto de operação do conjunto módulo-carga, estabelecendo a máxima transferência de potência sob qualquer condição. Estes circuitos, denominados de Seguidores de Potência Máxima, são obtidos pela interpolação, entre o módulo FV e a carga, de um conversor CC-CC, conforme se verifica na Figura 3.6.

Figura 3. 6 - Carga ligada a um módulo FV por meio de um conversor CC-CC



Fonte: Adaptado de COELHO (2008)

Independentemente do tipo de conversor CC-CC adotado, a tensão de saída na carga é dada pela Equação 3.6:

$$V_{carga} = R_{carga} \cdot I_{carga} \quad (3.6)$$

Para adequar a tensão nominal à carga utilizada, foi escolhido o conversor CC-CC abaixador do tipo *Buck*. Para este conversor operando no modo de condução contínua (MCC), cuja tensão de saída V_{carga} é dada pela tensão de entrada V_{painel} multiplicada pelo ciclo de trabalho (D) Equação 3.7:

$$V_{carga} = D \cdot V_{módulo} \quad (3.7)$$

Considerando que não existem perdas no conversor *Buck* “ideal”, a potência de entrada é igual à potência de saída, logo a corrente de saída I_{carga} é dada pela Equação 3.8 e 3.9:

$$\frac{I_{carga}}{I_{módulo}} = \frac{1}{D} \quad (3.8)$$

$$I_{carga} = \frac{I_{módulo}}{D} \quad (3.9)$$

Substituindo-se as Equações 3.7 e 3.9 em 3.6, tem-se a Equação 3.10 e 3.11

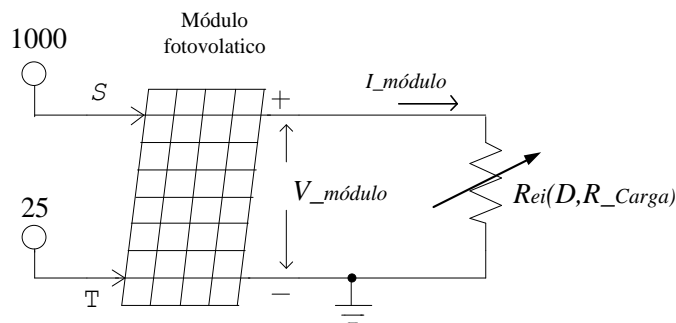
$$V_{\text{módulo}} \cdot D = R_{\text{carga}} \cdot \frac{I_{\text{módulo}}}{D} \quad (3.10)$$

$$\frac{V_{\text{módulo}}}{I_{\text{módulo}}} = \frac{R_{\text{carga}}}{D^2} \quad (3.11)$$

Na Equação 3.11, a relação $\frac{V_{\text{módulo}}}{I_{\text{módulo}}}$ pode ser entendida como resistência equivalente total $R_{ei}(D, R_{\text{carga}})$ vista pelo módulo FV, em função do ciclo de trabalho D do conversor e da resistência R_{carga} através da Equação 3.12, e ilustrada na A partir da Equação (3.12), pode ser entendida $R_{ei}(D, R_{\text{carga}})$ como uma resistência variável em que através do ciclo de trabalho D , altera-se a impedância total vista pelo módulo FV de maneira que o sistema opere para diferentes cargas e diferentes condições meteorológicas.

A partir da Equação (3.12), pode ser entendida $R_{ei}(D, R_{\text{carga}})$ como uma resistência variável em que através do ciclo de trabalho D , altera-se a impedância total vista pelo módulo FV de maneira que o sistema opere para diferentes cargas e diferentes condições meteorológicas.

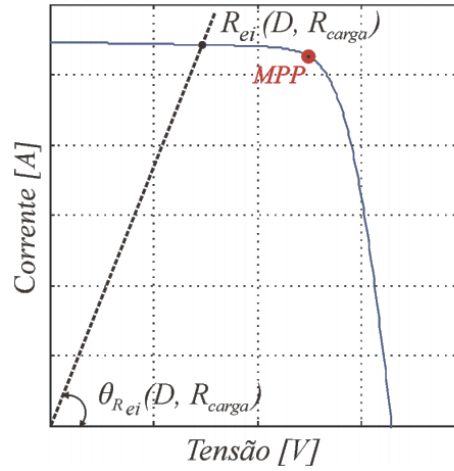
Figura 3. 7 - Impedância total equivalente vista pelo módulo FV



Fonte: Adaptado de COELHO (2008).

A interceptação da reta de carga com a curva de geração do módulo FV, determina o ponto de operação do sistema. Deste modo, se a carga efetiva vista do módulo é $R_{ei}(D, R_{\text{carga}})$ então o ponto de operação torna-se uma função da razão cíclica D , que pode ser ilustrada na Figura 3.8

Figura 3. 8 - Reta de carga para à resistência equivalente de entrada $R_{eq}(D, R_{carga})$



Fonte: COELHO, (2008).

O ângulo $\theta_{Rei}(D, R_{carga})$ de inclinação da reta de carga é calculado pela Equação 3.13:

$$\theta_{Rei}(D, R_{carga}) = \tan^{-1} \left(\frac{1}{R_{ei}(D, R_{carga})} \right) \quad (3.13)$$

Substituindo-se a Equação 3.12 em 3.13, obtêm-se a Equação 3.14 do ângulo $\theta_{Rei}(D, R_{carga})$ em função da resistência da carga R_{carga} e da razão cíclica D :

$$\theta_{Rei}(D, R_{carga}) = \tan^{-1} \left(\frac{D^2}{R_{carga}} \right) \quad (3.14)$$

Observando a Equação 3.11, torna-se evidente como o conversor CC-CC consegue atuar sempre buscando o P_{MP} : caso a interseção entre a curva de carga e de geração não se dê no ponto de maior eficiência, é possível, através da alteração da razão cíclica D , mudar a inclinação da reta de carga, até que o P_{MP} seja encontrado.

No entanto, como a razão cíclica D é um valor compreendido entre $0 \leq D \leq 1$, o ângulo $\theta_{Rei}(D, R_{carga})$ possui limites superiores e inferiores.

Quando a razão cíclica $D = 0$, substituindo na Equação 3.14 temos as Equações 3.15 e 3.16 em que ângulo $\theta_{Rei}(D, R_{carga})$ equivale a:

$$\theta_{Rei}(D, R_{carga}) = \tan^{-1}(0) \quad (3.15)$$

$$\theta_{Rei}(D, R_{carga}) = 0^\circ \quad (3.16)$$

Portanto, o limite inferior teórico do ângulo $\theta_{Req}(D, R_{carga})$ é igual a 0° .

Em contrapartida, quando a razão cíclica $D = 1$, Substituindo ainda na Equação 3.14 temos a Equação 3.17 onde o ângulo $\theta_{Req}(D, R_{carga})$ encontra seu limite superior, em função exclusivamente da resistência da carga R_{carga} :

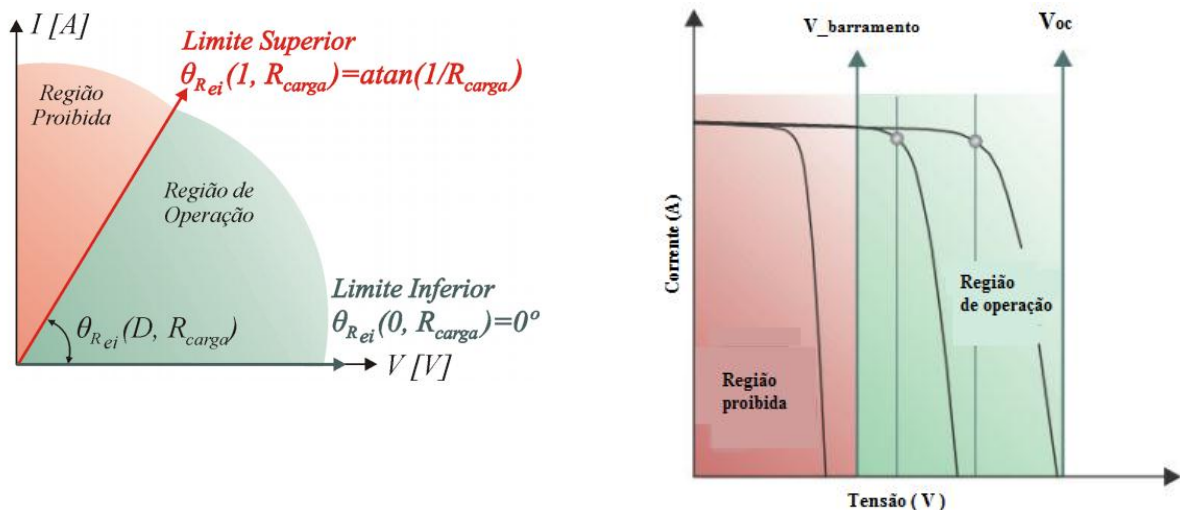
$$\theta_{Rei}(1, R_{carga}) = \tan^{-1}\left(\frac{1}{R_{carga}}\right) \quad (3.17)$$

Desta forma, os limites do ângulo $\theta_{Rei}(D, R_{carga})$ são estabelecidos de acordo com a Equação 3.18:

$$0^\circ < \theta_{Rei}(D, R_{carga}) < \tan^{-1}\left(\frac{1}{R_{carga}}\right) \quad (3.18)$$

Sendo assim o conversor opera em regiões definidas pela Equação 3.18. A Figura 3.9 ilustra a região de operação de um conversor *Buck* operando como MPPT conectado a uma carga R_{carga} (ENRIQUE *et al.* 2007).

Figura 3. 9 - Limites de operação conversor *Buck* operando como MPPT.



Fonte: Adaptado de COELHO (2008).

O ponto de máxima potência poderá ser atingido utilizando-se o conversor CC-CC do tipo *Buck* se a reta de carga estiver na região de operação. Caso contrário, não é possível o sistema operar com máxima eficiência (TAGHVAEE *et al.* 2013).

Estabelecida a maneira como o conversor *Buck* é capaz de atuar, levando o módulo FV a operar no P_{MP} , desde que este ponto se encontre na região de operação, é necessário apresentar as técnicas que permitem variar a razão cíclica e detectar quando o MPP foi encontrado.

3.3 Métodos de MPPT

Para aumentar a eficiência global do sistema FV é importante que os módulos FV operem sobre o P_{MP} maior tempo possível, para garantir essa situação, faz-se necessária a utilização de uma técnica que procure este ponto, mesmo com variações meteorológicas e variações da carga, a utilização de uma técnica que procure continuamente o ponto de máxima potência deve ser utilizado.

Segundo Seguel (2009), as técnicas baseadas nesse princípio são chamadas de técnicas de seguimento de potência máxima MPPT (*maximum power point tracking*) e podem incrementar a energia produzida entre 15 a 30%.

Muitos métodos foram propostos na literatura, com conversores estáticos CC-CC (BHATNAGAR e NEMA, 2013). Com o advento do surgimento dos microcontroladores e, mais recentemente, dos processadores digitais de sinal (DSP – *Digital Signal Processor*) permitiu o desenvolvimento de técnicas cada vez mais complexas, aplicadas a melhoria da velocidade e precisão de rastreamento.

Dentre os métodos mais utilizados na literatura, destacam-se:

- Baseados na Lógica Fuzzy;
- Baseados em Redes Neurais;
- Baseados em Frações da Tensão de Circuito Aberto;
- Tensão Constante;
- Perturbar e Observar (P&O);
- Condutância Incremental (CondInc).

Estes métodos variam em função de sua complexidade, número de sensores, velocidade de convergência e rastreamento do MPP, esforço computacional entre outros aspectos (ESRAM E CHAPMAN, 2007).

Um estudo comparativo entre as técnicas foi apresentado por BHATNAGAR e NEMA (2013), REZA REISI, HASSAN MORADI, JAMASB (2013) e ELGENDY, ZAHAWI, e ATKINSON (2008), os autores apontam Condutância Incremental (CondInc) e Perturbar e Observar (P&O) como sendo as técnicas MPPT mais difundidas e de baixo custo.

No presente estudo, durante a concepção do projeto da unidade de potência, foram estudadas duas técnicas para validação do conversor e só uma foi escolhida para a aplicação. As técnicas implementadas são: técnicas de CondInc e a técnica P&O que são detalhadamente apresentadas neste capítulo.

3.3.1 Método Perturbar e Observar (P&O)

Este método é bastante difundido devido a sua facilidade de implementação. Como o próprio nome sugere, a técnica P&O consiste em perturbar a tensão do módulo FV em uma dada direção, e observar o comportamento da sua potência de saída.

O método P&O apresenta algumas variações mas basicamente necessita de leituras de corrente I e tensão V para realizar o rastreamento do P_{MP} . O algoritmo provoca uma pequena alteração ΔV na tensão, o que acarreta uma alteração ΔP na potência. Se ΔP for positiva, o método continua a promover a variação da tensão nessa direção na tentativa de alcançar o P_{MP} . Se ΔP for negativo, o sinal da variação é invertido. Como desvantagens do método, podem ser citadas a dificuldade de localizar o P_{MP} em baixos níveis de radiação e impossibilidade de determinar quando o MPP foi realmente alcançado (BORGES NETO e CARVALHO, 2012).

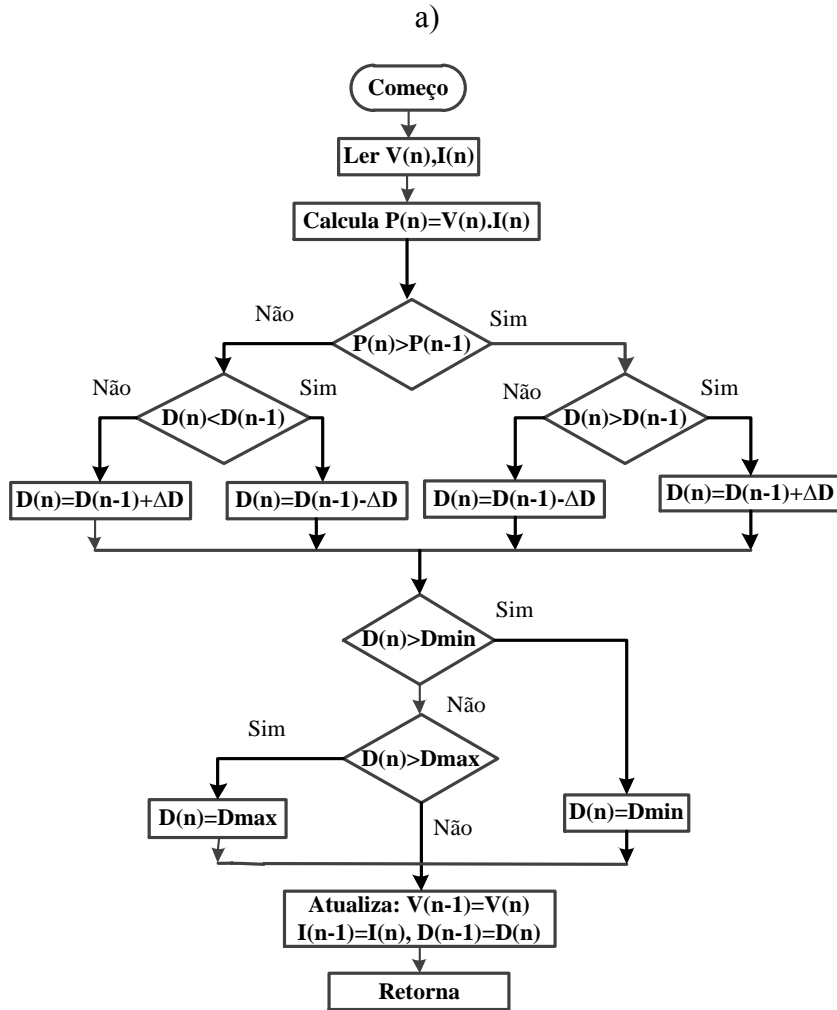
O seguimento é feito considerando duas iterações, como se pode ver no fluxograma da Figura 3.9 b). Na primeira, quando o conversor CC-CC é colocado a operar com razão cíclica $D(n-1)$, são lidos os valores de tensão $V(n-1)$ e corrente $I(n-1)$ de saída do módulo FV, possibilitando o cálculo da potência $P(n-1) = V(n-1) \cdot I(n-1)$.

A segunda iteração inicia-se quando uma pequena perturbação ΔD é causada na razão cíclica sob a forma de incremento ($D(n) = D(n-1) + \Delta D$) ou decremento ($D(n) = D(n-1) - \Delta D$) de forma que a tensão, corrente e potencia de saída passam a ser denotados por $V(n)$, $I(n)$ e $P(n) = V(n) \cdot I(n)$. Se, Após a perturbação $\Delta P = P(n) - P(n-1) > 0$, conclui-se que o sistema caminha na direção de potência máxima e o sentido de perturbação deve ser mantido, caso contrário $\Delta P = P(n) - P(n-1) < 0$, o sistema está na direção oposta a maximização da potência, o sentido de perturbação deve ser alterado. Na Figura 3.10 a) apresenta a representação gráfica do algoritmo P&O sobre a curva.

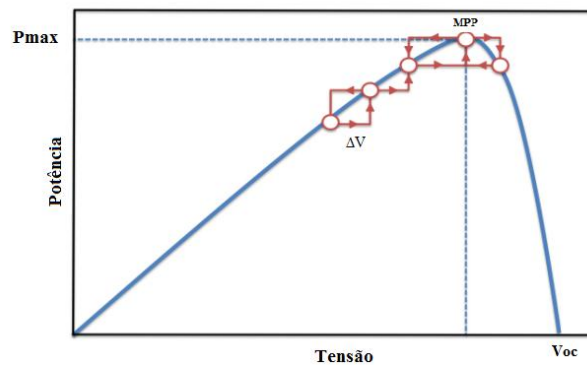
Para determinar o tamanho do passo ΔD exige escolher entre qualidade da resposta dinâmica ou em regime permanente, e nunca ambas (COELHO, 2008).

O código fonte do método P&O segue no apêndice A.

Figura 3. 10 – b) Fluxograma do método Perturbar e Observar (P&O)



a) Representação gráfica do algoritmo sobre a curva $P \times V$;



Fonte: a) Adaptado de Shaffer, (2012); b) Adaptado de COELHO (2008).

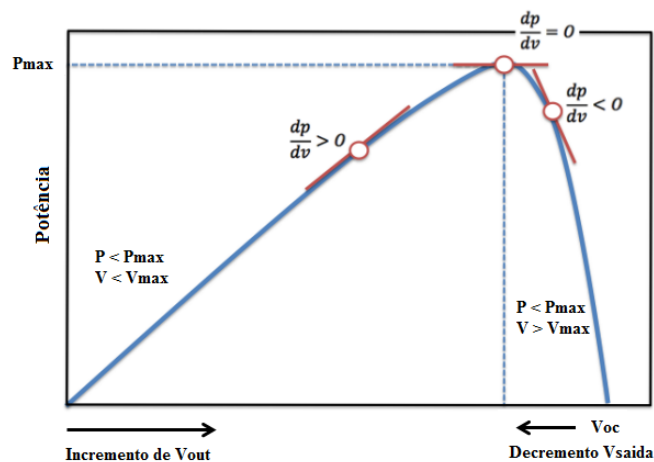
3.3.2 Método da Condutância Incremental (CondInc)

O Método da Condutância Incremental apresenta-se como uma solução para seguimento de potência máxima, uma vez que ultrapassa as desvantagens apresentadas no método de P&O; todavia, exige maior esforço computacional (CORRÊA, 2008).

Neste método promovem-se também variações no ponto de operação, porém a decisão a respeito do próximo passo não é mais tomada em relação à variação de potência ΔP , mas sim sobre a $\frac{\Delta P}{\Delta V}$.

Recorrendo-se à Figura 3.11, que retrata a curva característica $P \times V$ e a curva da derivada da potência em relação a tensão $\frac{dP}{dV} \times V$ percebe-se que há duas regiões bem definidas: a direita do *MPP* (região com derivada negativa) e, a esquerda do *MPP* (região com derivada positiva).

Figura 3. 11 - Curva da potência e região da derivada da potência em relação à tensão



Fonte: Adaptado de SHAFFER (2012).

Observando a Figura 3.10 vê-se que a região $\frac{dP}{dV} < 0$, o ponto de operação fica especificado além do P_{MP} , desta forma, o MPPT deve elevar a razão cíclica, deslocando o ponto de operação para esquerda. A atuação do MPPT deve ser sempre buscar o ponto em que $\frac{dP}{dV} = 0$, onde o ponto de operação e o P_{MP} são coincidentes.

Obviamente, a realização digital do método exige maior esforço computacional, já que há necessidade de determinar a derivada da potência em relação à tensão. Internamente ao microcontrolador, os cálculos são facilitados quando realizados conforme as Equações 3.19 e 3.20:

$$P = V \cdot I \quad (3.19)$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d}{dV} [V \cdot I] = I + V \cdot \frac{dI}{dV} = I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (3.20)$$

Onde I e V representam os estados atuais da tensão e corrente, e discretamente, de acordo com a convenção utilizada, podem ser representados por $I(n)$ e $V(n)$. Por outro lado, ΔI e ΔV representam a diferença entre estado atual e anterior da tensão e corrente como nas Equações 3.21 e 3.22:

$$\Delta I = I(n) - I(n - 1) \quad (3.21)$$

$$\Delta V = V(n) - V(n - 1) \quad (3.22)$$

Assim, o cálculo da derivada da potência em relação a tensão pode ser expressa pela Equação 3.22:

$$\frac{dP}{dV} = I(n) + V(n) \cdot \left[\frac{I(n) - I(n - 1)}{V(n) - V(n - 1)} \right] \quad (3.22)$$

Considerando a condição de máxima potência, em que $\frac{dP}{dV} = 0$, tem-se a Equação 3.23:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} + \frac{I(n)}{V(n)} = 0 \quad (3.23)$$

Podendo se rescrever resumidamente as condições de operação do algoritmo para o MPP na Equação 3.24:

$$\begin{cases} dP/dV = 0 & \left\{ \begin{array}{l} \Delta I/\Delta V = -I/V, \\ \Delta I/\Delta V > -I/V, \\ \Delta I/\Delta V < -I/V, \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{no PMP} \\ \text{à esquerda do PMP} \\ \text{à direita do PMP} \end{array} \end{cases} \quad (3.24)$$

Assim, a condutância instantânea I/V é comparada a condutância incremental $\Delta I/\Delta V$.

Adicionalmente, a determinação do passo fica definido pela Equação 3.25:

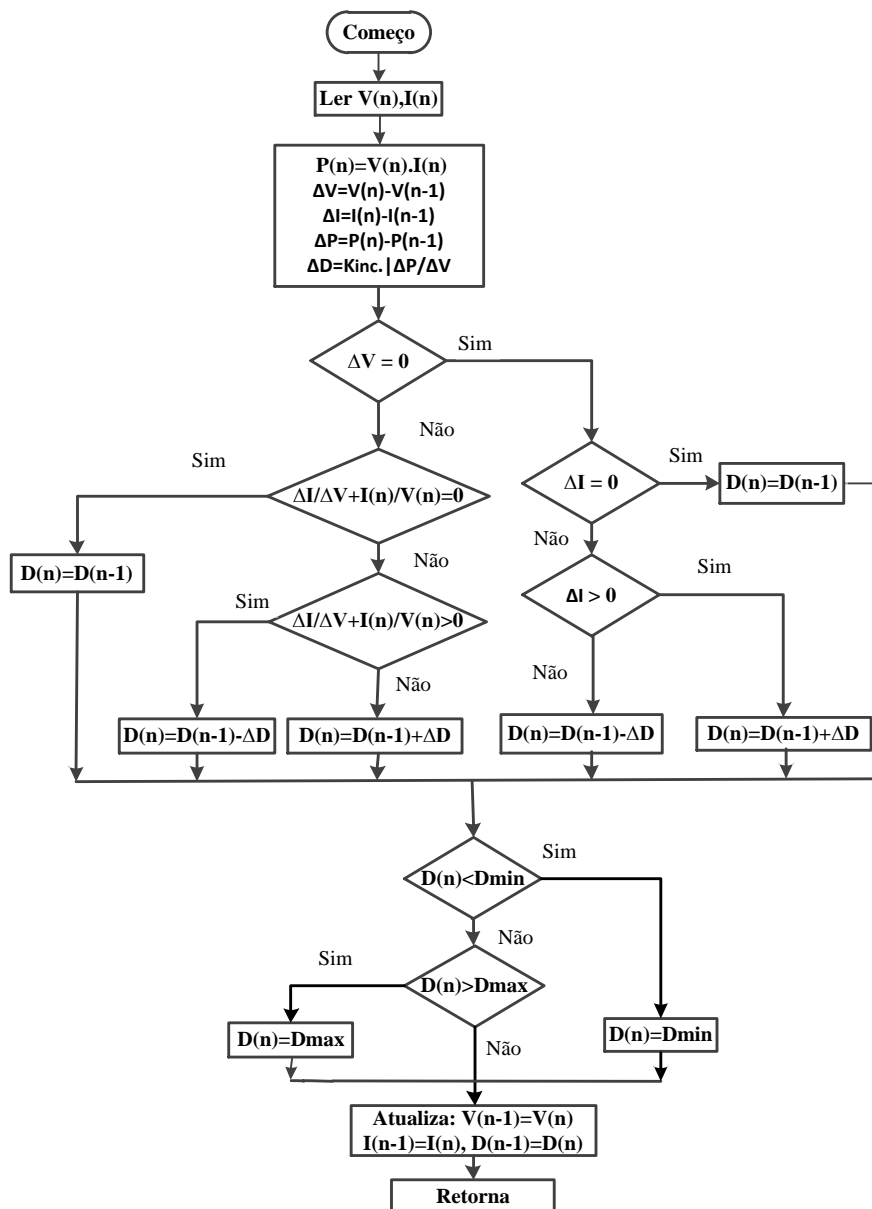
$$\Delta D = k_{inc} \cdot \left[\frac{dP}{dV} \right] \quad (3.25)$$

Onde: k_{inc} é uma constante determinada pela estipulação do máximo passo permitido ΔD_{max} , que ocorrerá nas mediações da tensão de circuito aberto do modulo FV.

O método da CondInc, assim como o método P&O, também consistem em se causar variações no ciclo de trabalho D . No entanto o tamanho do passo, neste caso, é proporcional à razão variação de potência sobre variação de tensão $\frac{\Delta P_{\text{modulo}}}{\Delta V_{\text{modulo}}}$. Essa razão é menor quanto mais próximo se estiver o P_{MP} , garantindo boa resposta em regime permanente (COELHO, 2008).

O fluxograma para implantação do algoritmo é apresentado na Figura 3.12 e código fonte na linguagem de programação segue no Apêndice A.

Figura 3. 12 - Fluxograma do método da Condutância Incremental utilizado.



Fonte: Adaptado de COELHO (2008).

3.4 Dimensionamento do Conversor *Buck*

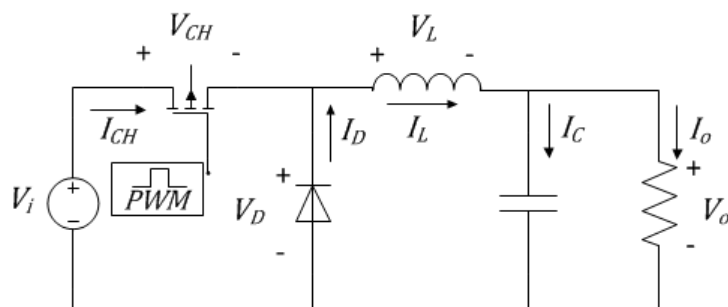
Os conversores CC-CC são dispositivos que recebem um nível de tensão ou corrente contínua nos seus terminais de entrada e ajustam para um outro valor de tensão ou corrente contínua nos terminais de saída de acordo com as exigências do sistema.

Para o presente projeto em função da tensão de saída do módulo FV e as especificações da carga (motobomba) desenvolveu-se um conversor CC-CC abaixador de tensão do tipo *Buck*.

Este produz um valor médio de tensão de saída inferior ao valor médio de tensão de entrada, enquanto a corrente média de saída é maior que a entrada. Esse comportamento é consequência do princípio de conservação de energia e característica de saída deste conversor.

A partir de uma análise comparativa entre outros tipos de conversores CC-CC, pode-se observar que o conversor *Buck* é único que apresenta uma relação linear entre tensão de entrada e a de saída. Por isso, é mais fácil de ser controlado com emprego de técnicas clássicas de MPPT (FARAHAT, METWALLY, e ABD-ELFATAH MOHAMED, 2012).

Figura 3. 13 - Topologia do conversor tipo *Buck*.



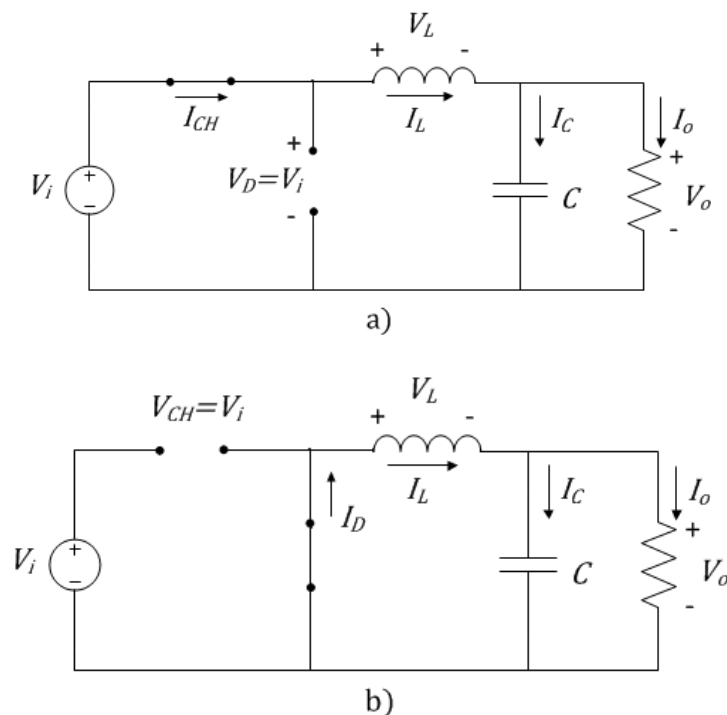
Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.4.1 Princípio de operação do conversor *Buck*

O princípio de funcionamento deste conversor é baseado em duas etapas. Na primeira etapa Figura 3.13 a), quando a chave esta ligada (*CH*) conduz, o diodo (*D*) fica reversamente polarizado. Existe, então, circulação de corrente pela chave e pelo indutor (*L*). A corrente no indutor cresce, repondo a energia perdida durante o período em que o transistor esteve cortado (desligado), o indutor atua como elemento de armazenamento de energia (fonte de corrente), transferindo energia da fonte de entrada para a carga de saída. O capacitor (*C*), não propriamente parte essencial do circuito, é utilizado apenas para filtrar as componentes de tensão alternadas na saída.

Na segunda etapa de operação observada na Figura 4 b), o transistor é colocado em corte, para não haver interrupção na corrente pelo circuito, o indutor força a condução do diodo (conhecido como diodo de retorno, pois tem a função de prover caminho de corrente para o indutor durante o período de corte do transistor). Neste trecho, a corrente no indutor decresce fornecendo energia à carga de saída (corrente de desmagnetização).

Figura 3. 14 – Princípio de operação do conversor *Buck* : (a) Circuito equivalente para a chave fechada; (b) Circuito equivalente para a chave aberta.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.4.2 Modos de Operação do conversor

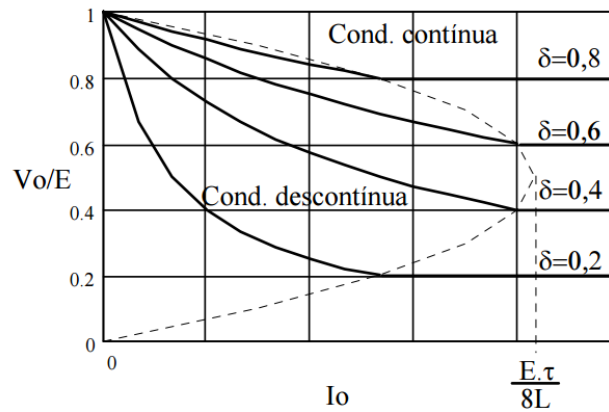
Em relação ao modo de operação, o conversor *Buck* pode operar em três modos de condução da corrente no indutor (Barbi e Martins, 2006):

- Se a corrente no indutor nunca chegar a zero, durante a condução do diodo, dizemos que o conversor está operando em modo de **condução contínua**;
- Caso chegue a zero, opera em modo de condução **descontínua**;
- **A condução crítica** ocorre quando a corrente chega a zero exatamente no final do período de condução do diodo

A Figura 3.15 mostra a região 1 de condução descontínua e a região 2 de condução contínua. Observa-se que, quando a condução é descontínua, a tensão média na carga varia com a corrente média na carga. Para maioria das aplicações práticas, essa é uma

forma indesejável de funcionamento e que deve ser evitada, sobretudo porque dificulta o controle do sistema, pela não linearidade introduzida. Por essa razão, é muito importante operar, sempre que possível, em condução contínua. Para isso, deve ser determinada a mínima indutância L_{Omin} que possibilite essa operação para uma dada frequência de chaveamento.

Figura 3. 15 - Característica de saída do conversor abaixador de tensão nos modos contínuo e descontínuo.



Fonte: POMILIO (2011)

3.5 Dimensionamento do Conversor Buck

Para o dimensionamento do conversor de potência foi considerada como limite de máxima potência nas condições de teste padrão STC (*Standard Test Conditions*) padrão para módulos FV. Algumas considerações e especificações do projeto são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3. 1 - Considerações de projeto do conversor Buck e parâmetros do módulo FV

Parâmetros do módulo FV em STC, $S = 1000W/m^2$, $T = 25^\circ C$ e $AM = 1,5$	
Potência máxima do painel fotovoltaico	$P_{mp}^{ref} = 160 W$
Tensão no ponto de máxima potência	$V_{mp}^{ref} = 35,25 V$
Corrente no ponto de máxima potência	$I_{mp}^{ref} = 4,54 A$
Tensão média desejada na carga	$V_{carga} = 12 V$
Frequência de chaveamento	$f_c = 20 kHz$
Variação máxima de tensão na carga	$\Delta V_{\%carga} = 10\%$
Variação máxima de corrente na carga	$\Delta I_{\%carga} = 10\%$

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O cálculo do ciclo de trabalho D estimado foi feito de acordo com a tensão que se deseja atingir na saída ($V_{carga} = 12 V$) em *STC* quando a tensão de entrada for a tensão de máxima potência ($V_{mp}^{ref} = 35,25 V$).

Tabela 3. 2 - Principais componentes dimensionados

Parâmetros	Fórmula	Calculado
Ciclo de trabalho D	$D = \frac{V_{carga}}{V_{mp}^{ref}}$	0,34
Resistência da carga [Ω]	$R_{carga} = \frac{V_{mp}^{ref}}{I_{mp}^{ref}} \cdot D^2$	0,90
Corrente média na saída I_{carga} [A]	$I_{carga} = \frac{P_{mp}^{ref}}{V_{carga}}$	13,33
Máxima variação de corrente no indutor ΔI_{Lmax} [A]	$\Delta I_{Lmax} = \Delta I_{\%carga} \cdot I_{carga}$	1,33
Indutância mínima L_{Omin}	$L_{Omin} = \frac{V_{carga} \cdot (1 - D)}{\Delta I_{Lmax} \cdot f_c}$	297,7 μH
Máxima variação de tensão no capacitor ΔV_{Cmax}	$\Delta V_{Cmax} = \Delta V_{\%carga} \cdot V_{carga}$	1,2 V
Capacitância mínima C_{Omin}	$C_{Omin} = \frac{1 - D}{8L(\Delta V_{Cmax}/V_{carga})f^2}$	6,871 μF

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os parâmetros da tabela 3.2 foram calculados usando as equações básicas para o conversor *Buck* detalhadas em (HART, 2011).

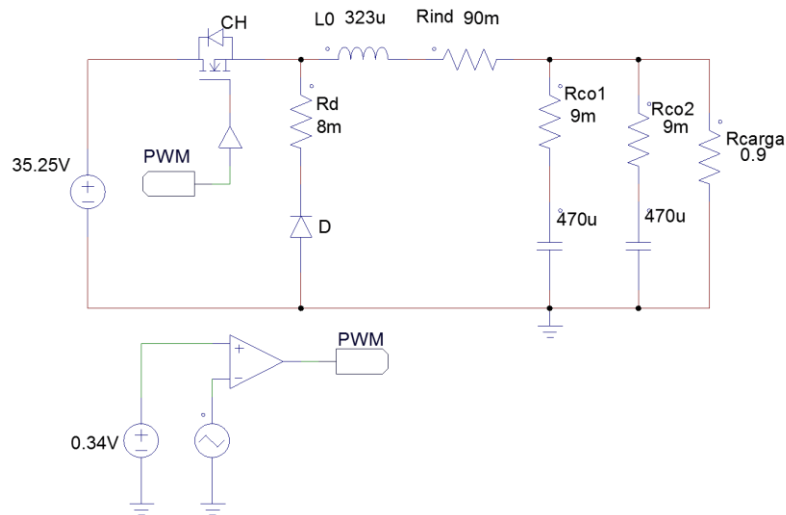
Um detalhe importante a ser considerado no projeto é o fato de que se deve somar à variação total de tensão no capacitor, além do próprio efeito da capacitância, o efeito da resistência equivalente em série intrínseca do capacitor (RES), que é inversamente proporcional à capacitância (HART, 2011).

3.5.1 Simulação do Conversor Buck

Com o intuito de avaliar o comportamento do conversor antes da produção do circuito físico e verificar os esforços de tensão e corrente sobre os componentes previamente calculados na Tabela 3.2, simulou-se o circuito do conversor *Buck* usando o *software* PSIM 9.1, conforme Figura 3.16.

Para a simulação do circuito de potência, a carga foi considerada resistiva e posteriormente indutiva. As perdas foram estimadas a partir de valores fornecidos pelo fabricante nos *datasheets* dos componentes ou, no caso das perdas no cobre indutor, medidas no laboratório.

Figura 3. 16 - Simulação do circuito do conversor *Buck*, considerando as perdas.

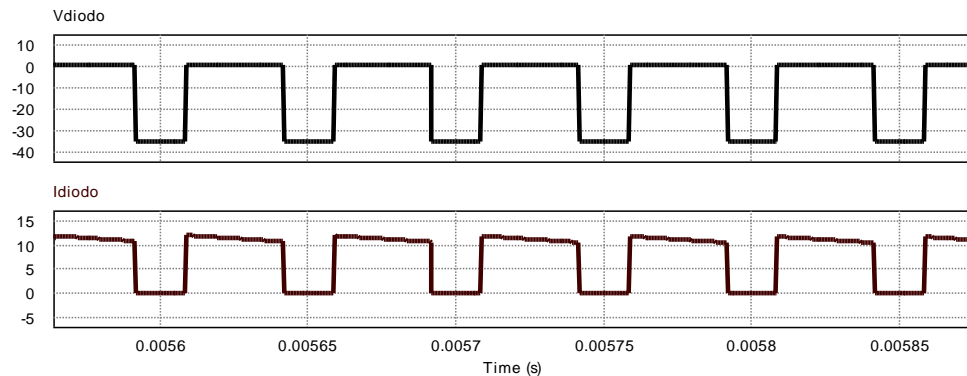


Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 3.17 ilustra os esforços de tensão reversa V_D e corrente I_D no diodo D . O valor máximo de tensão reversa em regime permanente encontrado foi

$V_{D_{max}} = -35.25 \text{ V}$, enquanto que o de corrente de condução direta máxima foi $I_{D_{max}} = 12,33 \text{ A}$.

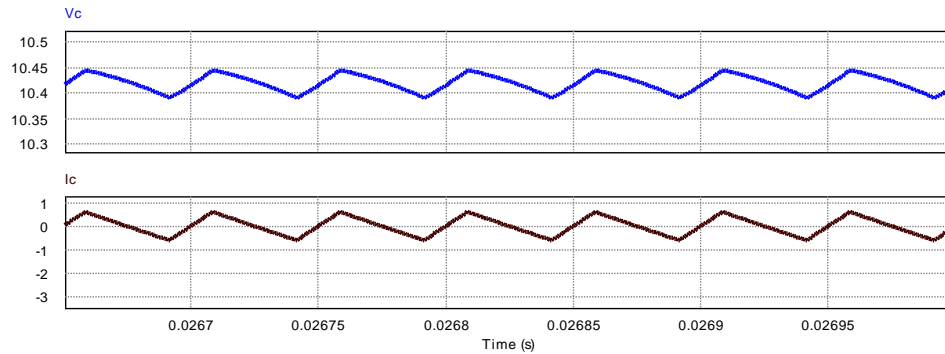
Figura 3. 17 - Tensão V_D e corrente I_D no diodo D .



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 3.18 ilustra os esforços de tensão V_C e corrente I_C no capacitor C . A tensão máxima no capacitor obtida foi $V_{C_{max}} = 10,42V$, e a máxima oscilação $\Delta V_C = 0,05V$, inferior a 10%. A corrente máxima encontrada foi $I_{C_{max}} = 0,60A$.

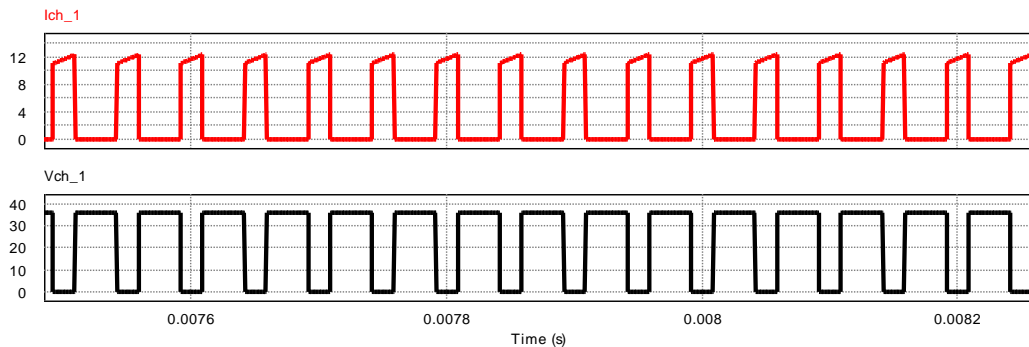
Figura 3. 18 - Tensão V_C e corrente I_C no capacitor C .



Fonte: Elaborado pelo Autor.

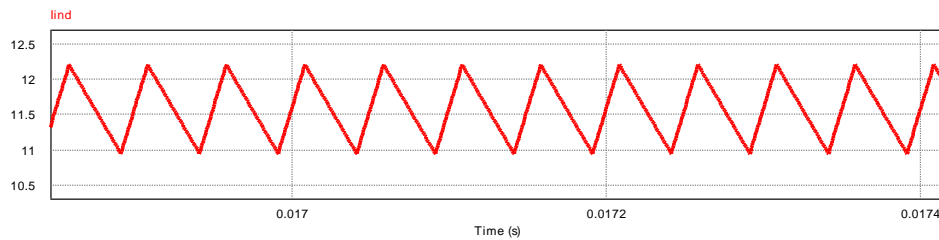
A Figura 3.19 ilustra os esforços de tensão V_{CH} e corrente I_{CH} na chave CH . A tensão máxima no capacitor obtida na chave foi $V_{CH_{max}} = 36,04A$. A corrente máxima encontrada foi $I_{CH_{max}} = 12,21A$.

Figura 3. 19 - Tensão V_{CH} e corrente I_{CH} na chave CH



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Por fim, a Figura 3.20 ilustra o esforço de corrente I_L no indutor. A corrente máxima do indutor encontrado na simulação foi $I_{L_{max}} = 12,77A$, enquanto que a máxima variação de corrente foi $\Delta I_L = 1,16A$.

Figura 3. 20 - Corrente I_L no indutor L

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.6 Circuitos Auxiliares

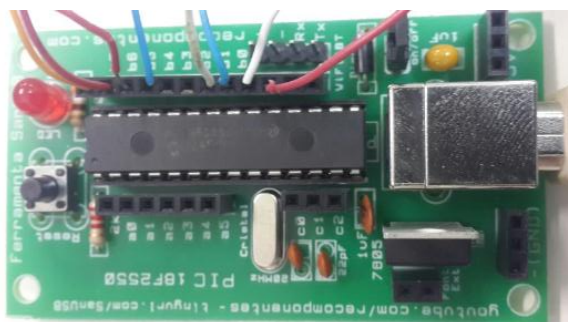
A unidade de potência para o seguimento da máxima potência vai além de um conversor CC-CC e um microcontrolador para execução dos algoritmos. No entanto, alguns circuitos auxiliares se fazem necessários dos quais se citam: sensores, circuitos condicionadores de sinal, circuitos de comando.

3.6.1 Microcontrolador

O controle do conversor *Buck* foi realizado por meio de um microcontrolador *PIC18F2550*, cujo hardware externo foi desenvolvido de acordo com a plataforma livre *SanUSB*. Esta possui como vantagem, entre inúmeras outras, a possibilidade de gravar o firmware no microcontrolador via *USB*, sem a necessidade de removê-lo do encaixe, além de facilitar a conexão de suas portas com o circuito de potência.

O *hardware* externo com o *PIC18F2550* da placa *SanUSB* pode ser visualizado na Figura 3.21.

Figura 3. 21 - Placa SanUSB do PIC18F2550



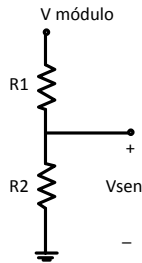
Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.6.2 Sensores de Tensão e Corrente

Como o nível de tensão de saída $V_{módulo}$ pode atingir valores não suportados pelo Conversor *A/D* do *PIC18F2550*, a utilização de um sensor de tensão se faz necessária. Para

essa finalidade, foi utilizado um divisor resistivo, Apresentado na Figura 3.22.

Figura 3. 22 - Circuito divisor de tensão empregado como sensor de tensão.



A relação entre as tensões V_{senT} e $V_{módulo}$ pode ser determinada pela Equação (3.26).

$$V_{senT} = \frac{V_{módulo} \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.26)$$

Escolheram-se as resistências $R_1 = 150k\Omega$ e $R_2 = 180k\Omega$, o que assegura que a tensão máxima do sensor é $V_{senT_{max}} < 5V$ para o máximo valor de tensão de saída do módulo $V_{ca}^{ref} = 43,5V$ usando a Equação 3.24 temos o resultado na Equação 3.27:

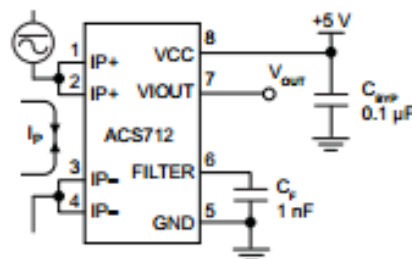
$$V_{senT_{max}} = \frac{43,5 \cdot 18000}{150000 + 18000} = 4.66V \quad (3.27)$$

Para a leitura da corrente $I_{módulo}$, utilizou-se o sensor de efeito *Hall* com saída em tensão, modelo *ACS712ELCTR-05B-T*, apresentado na Figura 3.23 a) e Figura 3.23 b) cuja faixa de leitura de corrente é $\pm 5A$, portanto, compreende o valor de corrente de curto-circuito do painel $I_{cc}^{ref} = 4,94A$.

Figura 3. 23 - a) Placa do circuito



b) o esquemático de ligação do sensor de corrente.



Fonte: *Datasheet* do sensor de corrente *ACS712ELCTR-05B-T*, fabricado por *Allegro MicroSystems*.

A saída em tensão do sensor é dada pela Equação 3.28:

$$V_{senc} = V_{offset} + G \cdot I_{módulo} \quad (3.28)$$

Para esse modelo, o ganho de tensão por corrente é $G = 0,185V/A$, e o *offset* $V_{offset} = 2,32V$. É importante salientar que a tensão no sensor é máxima para $I_{cc}^{ref} = 4,94A$. Aplicando a Equação (3.28), encontra-se $V_{senc_{max}} = 3,425V$, valor abaixo de $5V$, permitindo a conexão do sensor ao microcontrolador.

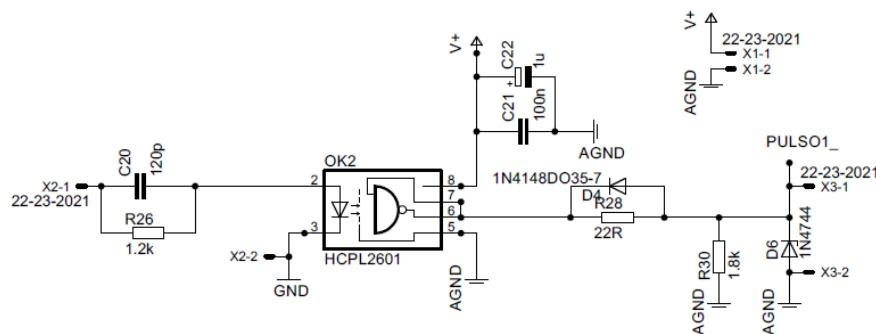
3.6.3 Driver

Pelo fato de, as saídas do microcontrolador *PIC18F2550* não fornecerem a potência necessária para o acionamento da chave *IRFP064N*, é necessário que haja um circuito intermediário capaz de fazê-lo. No entanto, foi usado um *driver HCPL3620*, que além de possuir a capacidade de acionar o *MOSFET*, isola eletricamente o circuito de comando do circuito de potência.

A tensão de alimentação é proveniente da fonte de alimentação externa $V_{I_{driver}} = 15V$, enquanto que a tensão de saída é $V_{O_{driver}} = 12V$. O nível de tensão da entrada de controle é o nível de tensão TTL, $V_{cc} = 5V$.

O esquemático do circuito recomendado está ilustrado na Figura 3.24.

Figura 3. 24 - Circuito do driver.



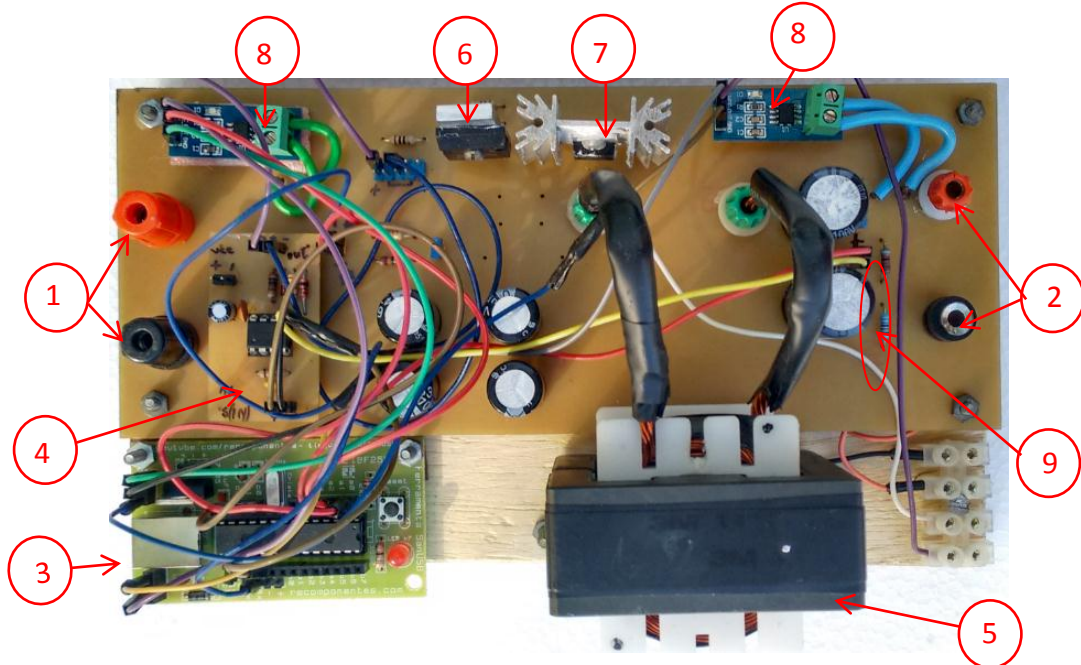
Fonte: Elaborado pelo Autor

3.7 Validação do Conversor

A implementação do conversor CC-CC abaixador baseado no microcontrolador utilizando seguidor de máxima potência, desenvolvido nesta dissertação especialmente para essa aplicação, foi realizada no laboratório do Grupo de Processamento e Controle (GPEC) no Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Ceará (DEE-UFC), como

mostra a Figura 3.25. Posteriormente foi conectada à planta de dessalinização localizada no Laboratório de Energias Alternativas - LEA.

Figura 3. 25 – Protótipo do conversor com MPPT



Legenda: (1) Entrada de tensão do módulo FV; (2) saída de tensão para a motobomba solar; (3) Microcontrolador PIC 18F2025; (4) A3120 Driver; (5) Indutor; (6) IRFP064N MOSFET; (7) 1N4148 Díodo; (8) ACS 712 Sensores de corrente; (9) Divisor resistivo.

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.8 Avaliação da eficiência dos Algoritmos de MPPT

Toda a teoria desenvolvida anteriormente foi aplicada por meio de simulações e experimentos práticos, para justificar a utilização de seguidores de máxima potência.

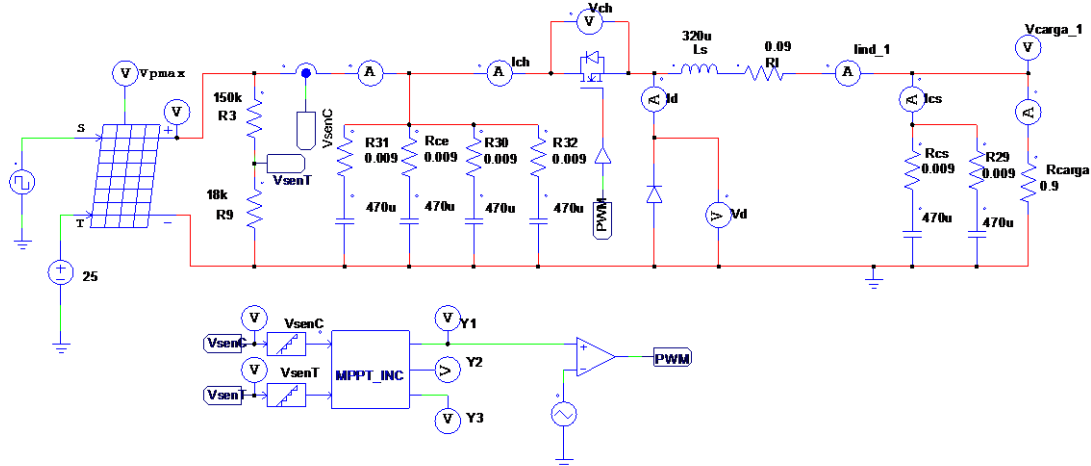
Foi utilizado o módulo FV Azur TSM 160M para alimentar uma carga resistiva, verificando-se os comportamentos de tensão e corrente de saída do módulo.

3.8.1 Resultados de Simulações e Circuito físico

Antes que qualquer teste prático seja realizado, foi verificado por simulação o comportamento do conversor *Buck* com duas técnicas de *MPPT* apresentadas anteriormente.

Para levar em conta a influência de fatores atmosféricos nomeadamente a irradiância e temperatura são aplicadas por meio de degraus no simulador PSIM. Embora isso não ocorra na prática uma vez que a temperatura não varia bruscamente, uma resposta adequada a esse tipo de perturbação garante a resposta do sistema às perturbações mais lentas.

A Figura 3.26 apresenta o modelo do circuito completo de um conversor *Buck* operando como seguidor de máxima potência.

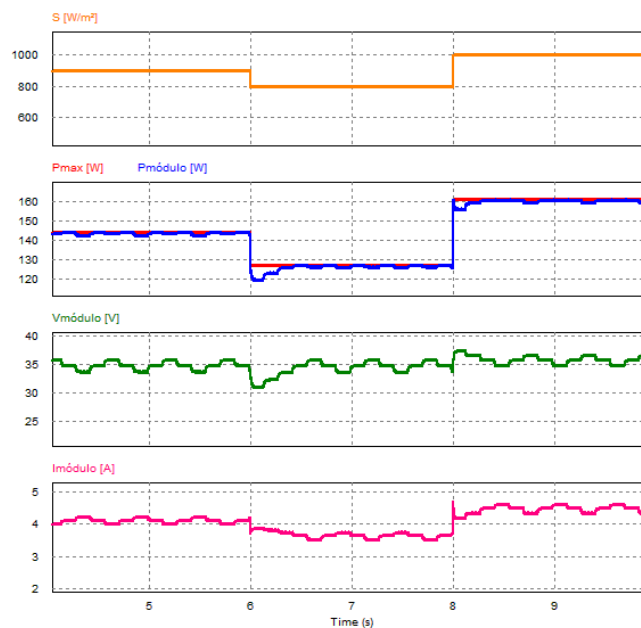
Figura 3. 26 - Circuito completo do conversor *Buck* operando como MPPT

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.8.2 Resultados da Simulação de P&O

Para que se possam fazer comparações, as simulações de potência $P_{módulo}$, tensão $V_{módulo}$ e corrente $I_{módulo}$ consideraram a temperatura do módulo constante de $T = 25^{\circ}\text{C}$, e irradiância variando. Na Figura 3.27 são apresentados os resultados da simulação para variações de irradiância e temperatura constante. Observa-se que o método consegue seguir a máxima potência mesmo variando as condições atmosféricas.

Figura 3. 27 - Potência $P_{módulo}$, Tensão $V_{módulo}$ e corrente $I_{módulo}$ para temperatura constante $T = 25^{\circ}\text{C}$, irradiância (S) variante.

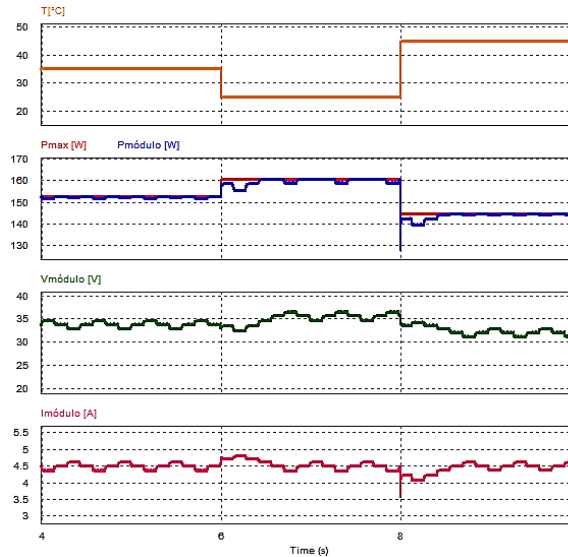


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 3.28, foi simulado o método P&O e verificado a potência $P_{módulo}$ e

Tensão $V_{módulo}$ para temperatura do módulo variando entre os valores de $T = 25^{\circ}C, 35^{\circ}C$ e $45^{\circ}C$, irradiância constante $S = 1000W/m^2$.

Figura 3. 28 - Potência $P_{módulo}$, Tensão $V_{módulo}$ e corrente $I_{módulo}$ para temperatura variavel, irradiância G constante.

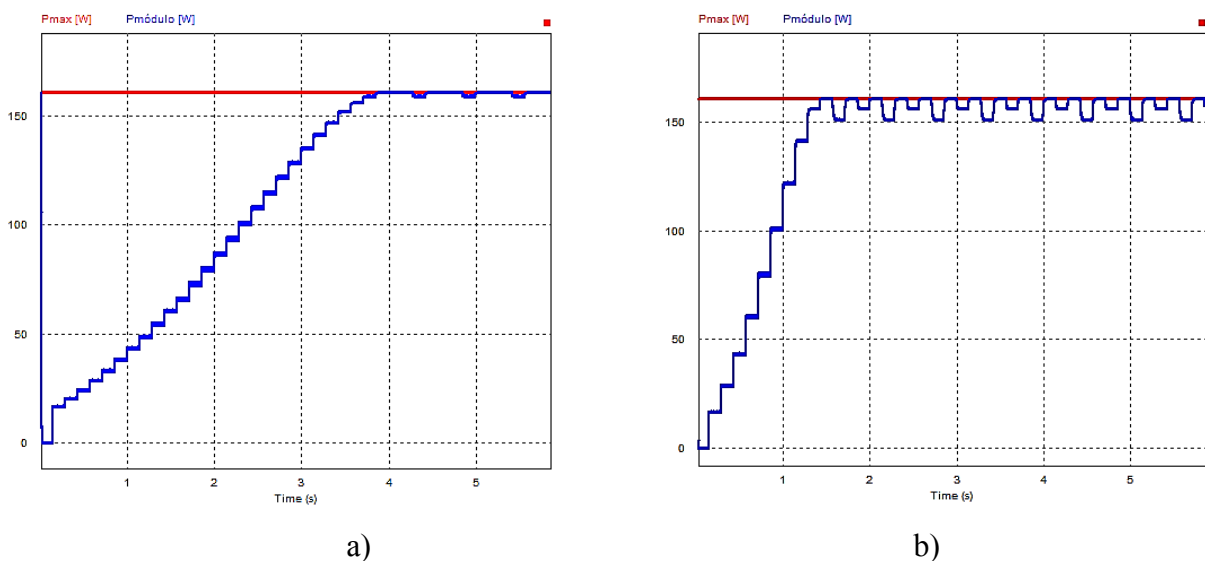


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Observa-se nas simulações que esse método mantém as oscilações de tensão e corrente, mesmo em regime permanente. Tanto para variação da irradiância S quanto para variação de temperatura T , o método P&O consegue atingir o P_{MP} , mas não consegue se manter neste valor, pois as perturbações continuam mesmo após se atingir o referido ponto.

O tamanho do passo ΔD determina a qualidade das respostas dinâmica ou em regime permanente. A Figura 3.29 ilustra essas respostas para $\Delta D = 0,01$ e $\Delta D = 0,03$.

Figura 3. 29 - Resposta dinâmica e em regime permanente para a) $\Delta D=0,01$ e b) $\Delta D=0,03$.



Fonte: Elaborado pelo Autor

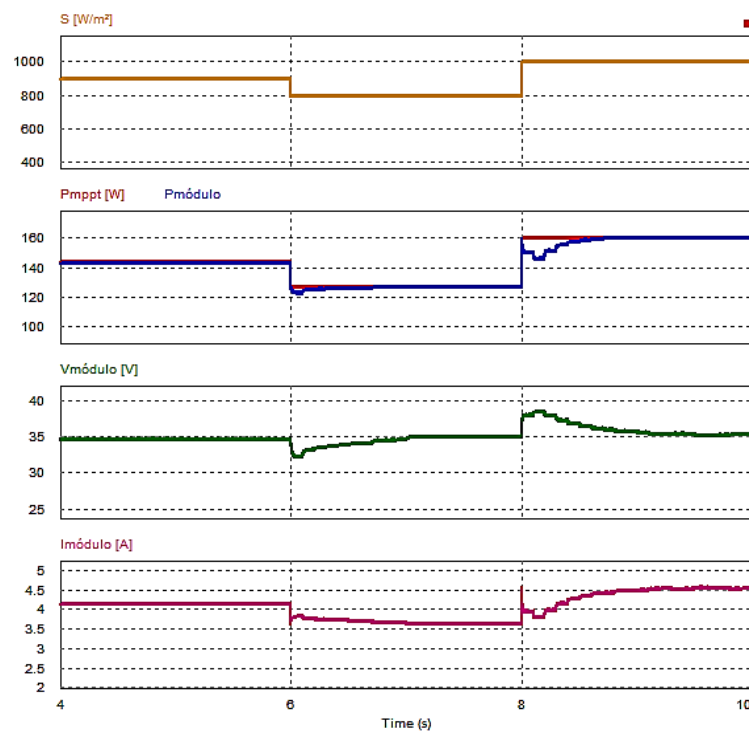
Nota-se que quando o passo ΔD é menor, a ondulação em regime permanente é menor, mas por outro lado, o tempo de assentamento é maior.

3.8.3 Método da Condutância Incremental

Assim como o método anterior, o método da condutância incremental consegue rastrear o *MPP* independente da irradiância e da temperatura. A diferença é que esse método mantém o seguidor operando no P_{MP} ao encontrar esse ponto. Nas Figuras 3.30 e Figura 3.31, são apresentados os resultados da simulação para variações de irradiância e temperatura, respectivamente para o método CondInc .

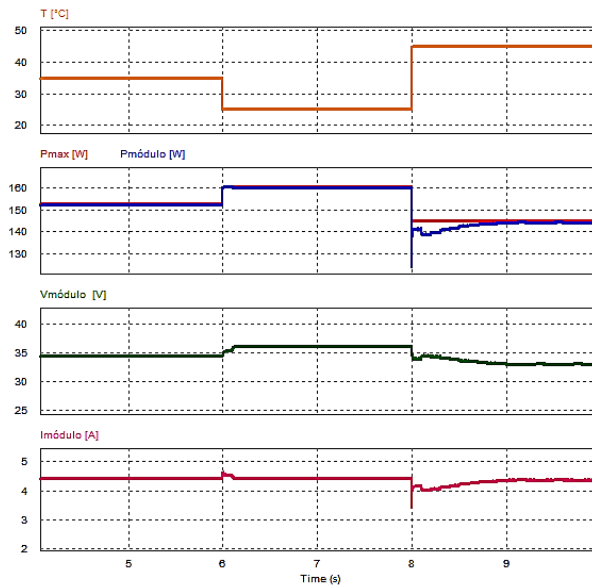
Na Figura 3.31, o mesmo método de MPPT foi simulado para irradiância constante $S = 1000W/m^2$ e temperatura variável $T = 25^{\circ}C, 35^{\circ}C$ e $45^{\circ}C$

Figura 3. 30 - Comportamento da potência $P_{\text{módulo}}$, Tensão $V_{\text{módulo}}$ e corrente $I_{\text{módulo}}$ para temperatura $T=25^{\circ}C$, irradiância S variante.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

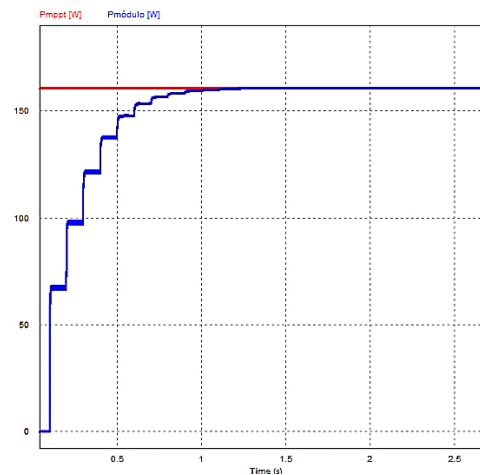
Figura 3. 31 - Comportamento da potência $P_{\text{módulo}}$ e Tensão $V_{\text{módulo}}$ para temperatura $T = 25^{\circ}\text{C}$, 35°C e 45°C , irradiância $S = 1000\text{W}/\text{m}^2$.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 3.32 mostra que o método possui uma resposta rápida em regime dinâmico com cerca de 2 s para atingir o regime permanente.

Figura 3. 32 - Resposta dinâmica e em regime permanente para $k=0,001$



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.9 Resultados Experimentais

No dia 01 de Junho de 2015, os testes experimentais foram realizados com o módulo FV conectado diretamente a uma carga resistiva, no LEA-UFC. O tempo estava parcialmente nublado, e a temperatura sobre o módulo FV se manteve praticamente constante durante todo o procedimento em aproximadamente $T = 45^{\circ}\text{C}$.

Figura 3. 33 - Módulo FV utilizado.

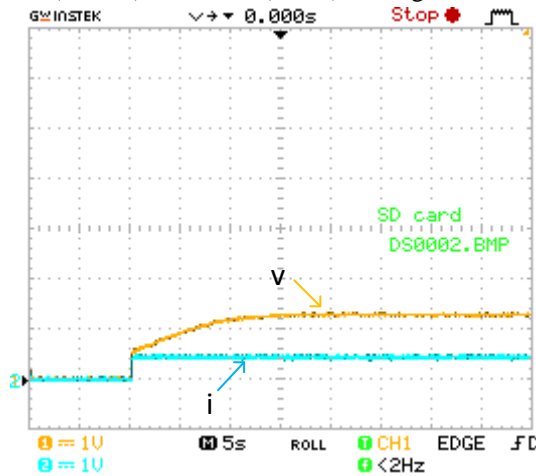


Fonte: Elaborado pelo Autor.

A carga resistiva adotada foi composta por três lâmpadas dicróicas de $50\text{ W}/12\text{ V}$, conectadas em paralelo, cuja resistência efetiva se aproximou de $R_{carga} = 0,9\Omega$, já considerando as perdas. Foi utilizado um traçador modelo Mini-KLA e o “Software” MATLAB para obtenção dos parâmetros elétricos do módulo para diferentes intervalos de irradiância e temperatura e anotados na Tabela 3.3, para mais constatações também se usou o osciloscópio para obtenção dos valores de corrente e tensão em intervalos de irradiância usados para obtenção das diferentes potências máximas correspondentes.

A Figura 3.34 mostra a saída de tensão e corrente do módulo para uma carga ligada diretamente, quando a irradiância instantânea medida pelo piranometro era $S = 716\text{ W}/m$. A curva em amarelo indica a tensão $V_{módulo}$, enquanto que a curva em azul representa a corrente $I_{módulo}$, convertida em tensão na razão de 1 V por 1 A . Em regime permanente, a tensão média $V_{módulo} = 2,2\text{ V}$ e a corrente média $I_{módulo} = 2,5\text{ A}$, portanto a potência nesse instante é de aproximadamente $P_{módulo} = 5,5\text{ W}$.

Figura 3. 34 - Tensão de saída V (1V/div) e corrente (A/div) na carga conectada diretamente ao módulo FV.



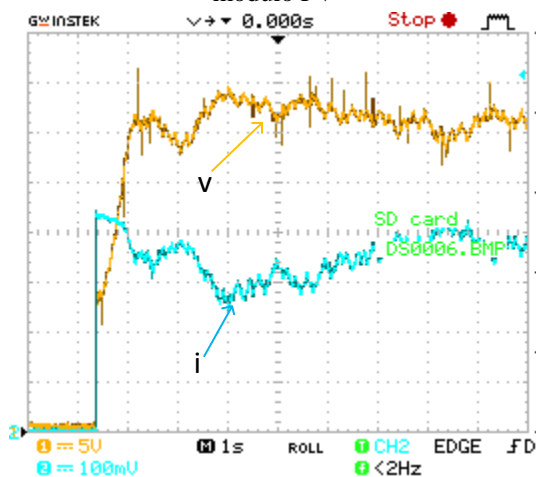
Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.9.1 Método Perturbar e Observar

Realizou-se o mesmo procedimento, usando o conversor e operando com o método P&O à irradiância de $S = 898 \text{ W/m}^2$ e Temperatura de $T = 45^\circ\text{C}$.

Observa-se na Figura 3.34, oscilações de tensão e corrente de saída do módulo em regime permanente, características do método P&O. A tensão média do módulo foi $V_{\text{módulo}} = 31,0 \text{ V}$, enquanto que a corrente média ficou em torno de $I_{\text{módulo}} = 3,8 \text{ A}$, resultando em $P_{\text{módulo}} = 117,8 \text{ W}$, aproximadamente.

Figura 3. 35 - Tensão de saída V (5V/div) e corrente (100mV/div = 1A) na carga conectada diretamente ao módulo FV

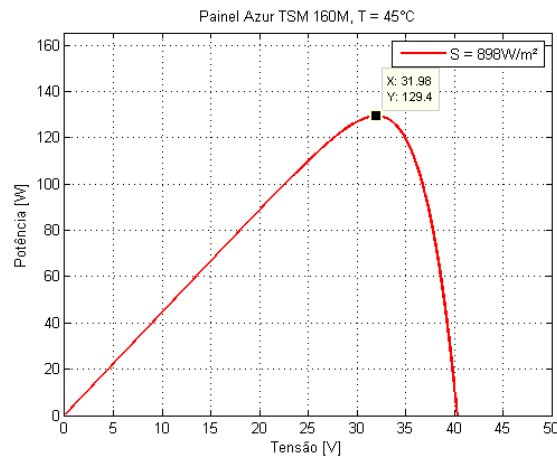


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para mais constatações fez simulação das curvas do módulo o software MATLAB na Figura 3.36, encontrou-se que a potência máxima teórica de $P = 129,4 \text{ W}$ para a temperatura de 45° e irradiância de $S = 898 \text{ W/m}^2$. E comparando os valores das potências

máximas o rendimento foi de 91,0 % para este método.

Figura 3. 36 - – Simulação da curva de potência de saída do módulo usando MATLAB, para $S=898 \text{ W/m}^2$, $T=45^\circ\text{C}$.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

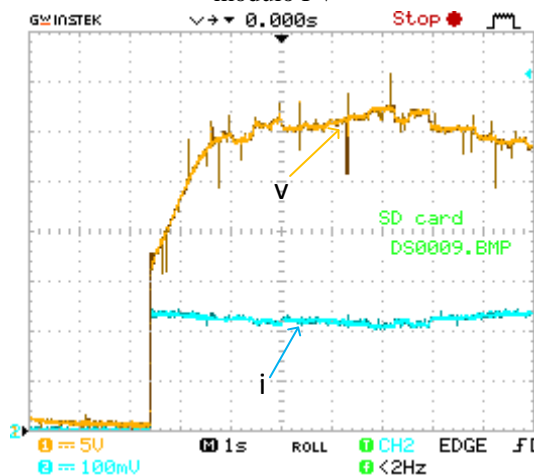
3.9.2 Método da Condutância Incremental

Repetiu-se o procedimento utilizando o método da condutância incremental. Durante o experimento, devido à nebulosidade, observaram-se consideráveis variações de irradiância, cujo pico foi de $S = 554 \text{ W/m}^2$ e temperatura $T = 45^\circ\text{C}$.

Através do osciloscópio para o nível de irradiância lido, o módulo atingiu uma tensão média de $V_{\text{módulo}} = 31,0 \text{ V}$, e a corrente média $I_{\text{módulo}} = 2,3 \text{ A}$, e $P_{\text{módulo}} = 69,0 \text{ W}$, conforme ilustra a Figura 3.37.

Apesar de ser um dia nebuloso o valor da potência máxima observada usando este método foi adequado para o accionamento da carga, mostrando assim a vantagem do uso dos MPPT.

Figura 3. 37 - Tensão de saída V (5 V/div) e corrente (100 mV/div = 1 A) na carga conectada diretamente ao módulo FV

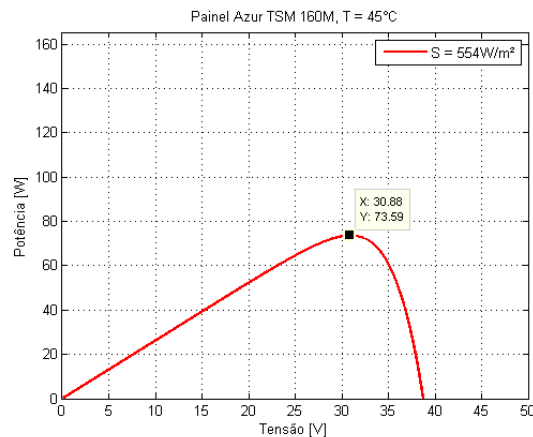


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Comparando com a simulação, em que a potência máxima atingiu $P_{módulo} = 73,59 \text{ W}$, o rendimento do método da condutância incremental foi de 92,7%.

Foi simulado no MATLAB o módulo FV, para irradiância $S = 554 \text{ W/m}^2$, $T = 45 \text{ °C}$ de acordo com a Figura 3.38.

Figura 3.38 - Simulação da curva de potência do módulo FV, para irradiância $S = 554 \text{ W/m}^2$.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.10 Validação dos Métodos

Para validar a eficiência dos métodos MPPT e a escolha de um deles para a unidade de potência desenvolvida, foram seguidos três passos e registados os valores na tabela 3.3:

- i. Foi obtido os valores das potências máximas para diferentes intervalos de irradiância usando o traçador Mini-KLA;
- ii. Obtenção das potências para carga ligada diretamente ou seja sem MPPT.
- iii. Ligação do módulo FV à carga (3 lâmpadas de 50W cada) usando o conversor operando com o método P&O;
- iv. Ligação do módulo FV à carga (3 lâmpadas de 50W cada) usando o conversor operando com o método CondInc;

A Figura 3.38 mostra a foto do traçador Mini-KLA que foi usado para obtenção dos parâmetros elétricos do módulo FV utilizado.

Figura 3.39 -Traçador Mini-KLA



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Tabela 3.3, foram registados os diferentes valores para diferentes passos usados para verificação da necessidade do uso das técnicas MPPT.

Tabela 3.3 - Parâmetro elétricos do módulo FV e potências medidas para diferentes níveis de irradiância e temperatura ambiente -16/09/2015.

Medida	Irradiância (W/m ²)	Temp. (K)	Características elétricas do módulo FV			MPPT		Sem MPPT	Eficiência (%)	
			I _{MP} (A)	V _{MP} (V)	P _{MP} (W)	P&O (W)	CondInc (W)	P (W)	P&O	CondInc
1	230 - 260	308,75	1,06	31,44	33,31	16,61	30,99	1,68	49,9	93,0
2	308 - 380	320,05	1,38	31,15	43,03	26,83	41,74	6,03	62,4	97,0
3	402 - 490	320,65	1,82	30,64	55,79	30,12	43,24	13,37	54,0	77,5
4	550 - 620	332,85	2,6	29,93	77,84	65,07	67,02	27,37	83,6	86,1
5	650 - 690	340,05	2,71	29,23	79,402	71,57	75,31	37,07	90,1	94,8
6	700 - 800	341,65	3,36	27,44	95,59	72,13	79,42	50,34	75,5	83,1
7	865 - 950	341,95	3,92	27,9	109,47	82,57	88,68	66,06	75,4	81,0
8	985 - 1000	342,25	4,13	27,95	115,34	85,28	96,64	78,66	73,9	83,8
9	1005 - 1015	342,45	4,59	27,09	124,32	103,17	105,67	91,96	83,0	85,0

Fonte: O Elaborado pelo Autor

A eficiência do método foi calculada usando a Equação 3.29 (BEN SALAH e OUALI, 2011):

$$Eficiência = \left(1 - \frac{P_{max}M - P_{max}E}{P_{max}M}\right) \times 100 \quad (3.29)$$

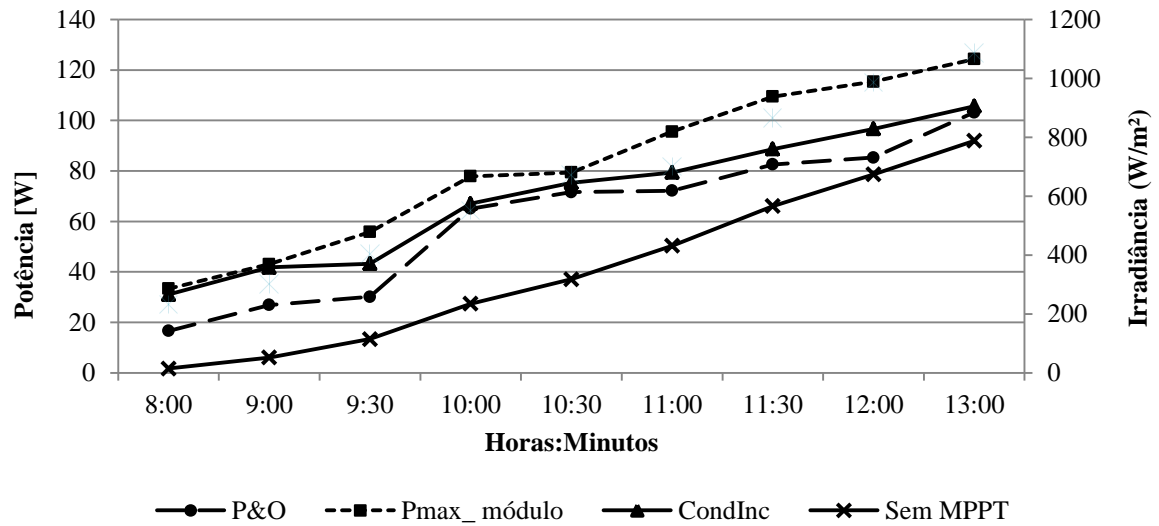
Sendo: $P_{max}Medida = P_{max}M$ – A potência máxima do módulo medida com o instrumento Mini-KLA.

$P_{max}E = P_{max}Estimada$ – A potência obtida na saída do conversor

A Figura 3.40 mostra os gráficos das potências obtidas para níveis diferentes de irradiância e as diferentes metodologias usadas para avaliar os ganhos que se obtém com o uso de técnicas de MPPT. Usando MPPT as potências obtidas estão bem próximas da

potência máxima do módulo FV obtidas. Mediante a Equação 3.29 foi calculado a eficiência dos métodos, onde o método *CondInc* apresenta uma eficiência média de 86,8% e P&O 72,0% no seguimento da potência máxima.

Figura 3. 40 – Potência máxima do módulo ($P_{max_módulo}$) FV e dos métodos P&O, CondInc, Sem MPPT- 16/09/2015.



Fonte: Elaborado pelo Autor

4 DESCRIÇÃO DA PLANTA DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA SALOBRA POR OR ALIMENTADA POR ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ORFV)

A planta ORFV sem o uso de banco de baterias usada para o estudo da viabilidade técnica da presente pesquisa está localizada no Laboratório de Energias Alternativas (LEA), situado no Campus do PICI da Universidade Federal do Ceará (UFC), em Fortaleza/CE - Brasil.

A configuração da planta foi adotada pela facilidade de adaptação da tecnologia de ORFV às características do semi-árido brasileiro, o qual dispõe de inúmeros poços com salinidade média por volta de 3.000 ppm de sólidos totais dissolvidos (OLIVEIRA, 2011) e apresenta um elevado potencial solar, com valores típicos entre 1752 kWh/m² a 2190 kWh/m² por ano (LOPEZ, 2012).

Este capítulo apresenta o princípio de funcionamento e descrição dos principais componentes da planta ORFV utilizada.

4.1 Descrição Geral da Planta de ORFV

A planta ORFV utilizada para o estudo é mostrada pelo esquema da Figura 4.1, cujo subsistema de bombeamento e de dessalinização: contempla 04 tanques: sendo tanque (1) para simular o poço com água salobra, tanque (2) a caixa d'água (tanque de armazenamento de água) para armazenar a água bombeada do "poço", tanque (3) para armazenar a água potável (permeado) e o tanque (4) para armazenar o concentrado; (5) sistema de pré-tratamento de água com filtros de sedimento, a carvão e de resina, para filtrar a água antes de entrar nas membranas; (6) duas membranas de osmose reversa (OR), associadas em paralelo para dessalinizarem a água de entrada; (7) válvula reguladora de pressão de ação direta instalada no fluxo do concentrado; (8) válvula de controle manual para apoio do ajuste de operação semiautomática da válvula (7); (9) dois sensores de pressão: sendo um para a água de entrada e outro para a de saída (no concentrado); (10) dois sensores de vazão: sendo um para a água de entrada e outro para a de saída (no concentrado), (11) motobomba para pressurizar a água da caixa d'água até as membranas; (12) motobomba para o bombeamento da água do poço; (13) válvulas manuais que permanecem fechadas e somente abertas quando se pretende fazer a lavagem dos tanques, (14) válvulas manuais que permanecem fechadas durante o funcionamento do sistema e são abertas quando os tanques 3 e 4 ficam cheios, repetindo-se desta forma o processo.

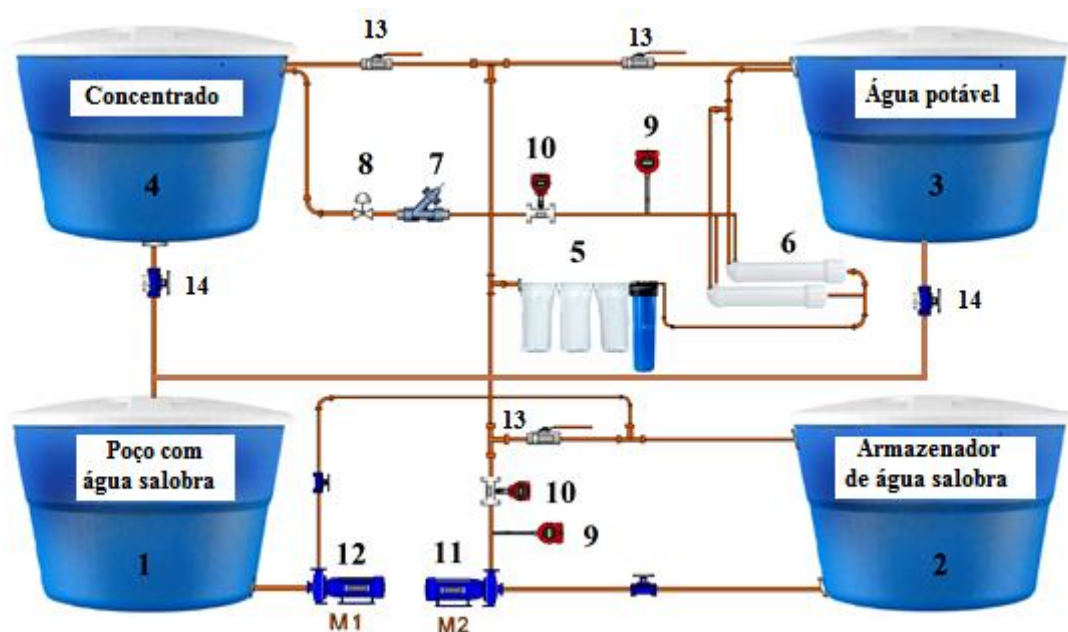
Duas chave-bóia unipolar para controle de nível de água, uma no tanque que simula o poço e outra no tanque que simula a caixa d'água, para desligar os motores-bomba quando os respectivos tanques secam, evitando o trabalho a vazio;

Todas as variáveis necessárias da planta ORFV são medidas, coletadas e armazenadas com o auxílio de diversos sensores e de um sistema supervisorio constituido por um Controlador Lógico Programável (CLP) e armazenados em um microcomputador.

É importante destacar que o sistema de aquisição de dados, com todos os sensores, não é necessário em uma planta de ORFV comercial, mas é essencial para o estudo em laboratório e para análise da viabilidade técnica.

Devido à característica laboratorial da planta e como se objetiva estudar a viabilidade técnica do sistema, foi testado o funcionamento da planta para diferentes concentrações de STD na água de entrada pela adição de quantidades controladas de cloreto de sódio (*NaCl*), comercialmente conhecido como sal de cozinha. No entanto, por razões ambientais, decidiu-se tornar a planta um sistema fechado, ou seja, os fluxos de permeado e de concentrado retornam ao tanque “poço”.

Figura 4. 1 - Esquemático geral da unidade de ORFV analisada



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2 Princípio de Funcionamento da Planta ORFV

O princípio do funcionamento da planta ORFV utilizada pode ser entendida através do esquemático da Figura 4.1, em que a motobomba (12) é utilizada para bombear a água salobra do primeiro tanque (poço) até o segundo tanque de armazenamento de água

(caixa d'água). A idéia deste bombeamento é armazenar energia potencial durante todo o período em que há sol, uma vez que a motobomba utilizada é projetada para trabalhar mesmo a baixos níveis de irradiação, com variação energética. A motobomba (11) é utilizada para pressurizar a água salobra até as membranas de OR, passando antes pelos elementos de pré-tratamento. Esses elementos evitam o desgaste prematuro das membranas, contendo: dois filtros de sedimento para remoção dos principais sólidos (dois primeiros cartuchos brancos da esquerda para a direita na Figura 4.1), um filtro de carvão para remoção do cloro e do odor (terceiro cartucho branco da esquerda para a direita na Figura 4.1) e um filtro de resina deionizadora para filtragem química de íons (cartucho azul na Figura 4.1).

Após o pré-tratamento, a água salobra pressurizada segue contra duas membranas de OR em paralelo, a qual produz dois fluxos de água, o permeado (com pequeno teor de sais) que é armazenado no tanque (3) e o concentrado (com grande teor de sais), o qual é guardado no tanque (4). Duas válvulas instaladas no concentrado controlam a pressão de entrada nas membranas, para evitar uma pressão superior à nominal, bem como evitar uma sobrecorrente na motobomba (11) para pressurização. A opção de se utilizar duas membranas em paralelo é para se obter uma maior produção de água potável.

Entretanto, após o tanque do fluxo do permeado e do concentrado ficarem cheios de água, os dois fluxos gerados retornam e se misturam no primeiro tanque (poço) mediante abertura das válvulas (14) para continuar as análises, ou seja, sem gastar água adicional para o estudo.

Na presente análise, $NaCl$ é adicionado no tanque do poço, aumentando, desta forma, a concentração de sólidos totais dissolvidos, objetivando estudar o desempenho do sistema a diferentes concentrações de entrada, controladas com o auxílio de um condutivímetro portátil. A planta de ORFV usada na experiência pode ser vista na Figura 4.2, seguindo toda descrição e princípio de funcionamento detalhado na Figura 4.1.

Figura 4. 2 - Planta de dessalinização de água salobra por OR utilizada



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3 Descrição dos principais componentes da planta ORFV

4.3.1 Conjunto Motobombas

Em unidades de dessalinização de água salobra por OR, é necessária a utilização de motobombas para pressionar a água salobra contra as membranas, produzindo água potável.

A escolha do conjunto motobomba depende da finalidade do sistema, potência requerida para atingir a altura manométrica desejada, volume de água e capacidade financeira. Foi escolhida na presente pesquisa a motobomba de deslocamento positivo do tipo diafragma, acionada por um motor de ímã permanente de 12 V CC. As motobombas de deslocamento positivo são indicadas para sistemas que necessitem de elevada pressão e baixa vazão (PINHO & GALDINO (2014) e CHILUNDO (2014)).

A unidade ORFV desenvolvida utiliza duas motobombas, sendo a motobomba do modelo SHURFLO 2088 utilizada para o bombeamento da água salobra do tanque que simula o poço até o tanque de armazenagem (caixa d'água), e a motobomba do modelo SHURFLO 8000 utilizada para pressurizar a água salobra armazenada contra as membranas de OR, ambas visualizadas, na Figura 4.3 (a) e (b) respectivamente.

Figura 4.3 - (a) Motobomba SHURFLO 8000



Figura 4.3 - (b) Motobomba SHURFLO 2088



Fonte: Elaborado pelo Autor

As partes que formam o conjunto motobomba são:

- i. Pressostato, válvulas e parte de entrada / saída do fluido;
- ii. Local de montagem da válvula;
- iii. Diafragmas;
- iv. Motor elétrico;

As principais especificações técnicas das motobombas utilizadas na planta estão descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Especificações técnicas dos motores-bomba utilizados

Parâmetro	SHURFLO 2088	SHURFLO 8000
Número do Modelo	2088-443-144	8000-443-136
Tipo de Bomba	Volumétricos 3 diafragmas	Volumétricos 3 diafragmas
Válvula de Segurança	1 Via - previne fluxo reverso	1 Via - previne fluxo reverso
Pressostato	Desligamento ajustável	Desligamento ajustável
Motor	Ímã permanente	Ímã permanente
Tensão Nominal	12 Volts CC	12 Volts CC
Pressão Nominal	45 psi	60 psi
Consumo para recalque em aberto	5,3 Ampère-hora	2,9 Ampère-hora
Vazão para recalque em aberto	800 litros/hora	490 Litros/hora
Consumo para recalque máximo (42,25m)	10,1 Ampère-hora	7,2 Ampère-hora
Vazão para recalque máximo (42,25m)	380 Litros/hora	340 Litros/hora
Temperatura Máxima do Líquido	54°C	77°C
Material dos Plásticos	Polipropileno	Polipropileno
Material das Válvulas	EPDM	EPDM
Material dos Diafragmas	Santoprene	Santoprene
Material da Base	Aço Zincado	Aço Zincado
Peso	2,18 kg	2,07 kg

Fonte: Adaptado de SHURFLO (2015)

O fabricante fornece, em seu manual, as curvas de desempenho típico dos motores-bomba SHURFLO 2088 e SHURFLO 8000, cujos valores estão, respectivamente, resumidos nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4. 2 - Especificações do desempenho típico da motobomba SHURFLO 2088.

Pressão (psi)	Vazão (Litros/min)	Rotação (RPM min/max)	Corrente (Ampère)	Tensão (Volts)
Aberto	13,2	2160/2210	5,3	12VCC
10	10,7	2130/2160	5,8	
20	9,7	2050/2110	7,0	
30	8,7	2015/2030	8,0	
40	7,6	1960/1975	9,1	
50	6,6	1915/1930	9,9	

Fonte: SHURFLO (2015)

Tabela 4. 3 - Especificações do desempenho típico da motobomba SHURFLO 8000.

Pressão (psi)	Vazão (Litros/min)	Rotação (RPMmin/max)	Corrente (Ampère)	Tensão (Volts)
Aberto	6,6	2290/2315	3,1	12VCC
10	6,3	2225/2255	3,4	
20	5,9	2170/2205	4,2	
30	5,6	2130/2155	4,9	
40	5,2	2045/2085	5,6	
50	4,9	2020/2045	6,9	
60	4,6	1893/1970	7,2	

Fonte: SHURFLO (2015)

Verificando as especificações das duas motobombas, nota-se que o 2088 possui uma vazão maior e uma pressão menor do que a de 8000, motivo pelo qual esta última é utilizada para pressurizar água para as membranas de OR e a 2088 para o bombeamento da água do poço com água salobra.

4.3.2 Tanques de água

A ORFV desenvolvida dispõe de quatro reservatórios em fibra de vidro, todos de 310 litros. Conforme manual do fabricante, as caixas utilizadas são fabricadas à base de resina, fibra de vidro e *gelcoat*, garantindo resistência e durabilidade e deixando o produto final imune à proliferação de fungos. As dimensões físicas dos tanques estão apresentadas na Figura 4.4.

Figura 4. 4 - Dimensões físicas das caixas FORTLEV 310 L



Fonte: FORTLEV (2015)

4.3.3 Sistema de Pré-tratamento de OR para Água Salobra

O sistema de pré-tratamento desempenha um papel crítico na remoção de constituintes da água fonte, como os sedimentos e micróbios, o que poderia dificultar o fluxo de OR no processo de dessalinização (HENTHORNE e BOYSEN, 2015).

Em sistemas nos quais não há um pré-tratamento, sólidos suspensos e outros elementos vão se sedimentando nas membranas, fechando alguns de seus poros, requisitando, desta forma, um grande volume de energia para a dessalinização. Além disto, esses elementos que se depositam nas membranas causam danos irreparáveis a estas estruturas.

Portanto, a unidade de ORFV desenvolvida utiliza quatro elementos pré-filtrantes, dispostos entre a motobomba de pressurização e as membranas, conforme Figura 4.5.

Figura 4. 5 - Elementos de pré-tratamento



1 – Filtro de Sedimento (10 micra), 2 – Filtro de Sedimento (5 micra), 3 – Filtro de carvão ativado, 4 – Filtro de Resina deionizadora.

Filtros de Sedimento. Os dois primeiros cartuchos do pré-tratamento contemplam

os filtros de sedimento, apresentados na Figura 4.6 (a) filtro de sedimento de 10 e 5 micra e (b) filtro de sedimento e cartucho, sendo um para filtragem de partículas com tamanho superior a 10 micra e o outro para partículas de até 5 micra. Micra é o plural de micron, unidade de tamanho utilizada para medir partículas pequenas, equivalendo a 1 milésimo de milímetro.

Figura 4. 6 - (a) Filtro de sedimentos de 10 micra e 5 micra (b) Filtro de sedimentos e cartucho



Fonte: *Sediment Cartridges* (2010)

Esses elementos filtrantes, feitos de polipropileno, material bastante resistente física e quimicamente, são destinados para a remoção de areia, lodo, sujeiras e partículas de ferrugem, cujos tamanhos não sejam inferior a 10 micra, para o primeiro, e 5 micra para o segundo.

A Tabela 4.4 descreve, resumidamente, as principais especificações técnicas dos filtros de sedimentos utilizados, conforme manual do fabricante.

Tabela 4. 4 - Especificações técnicas dos filtros de sedimento utilizados.

Parâmetro	Valor
Diâmetro interno	27,94 mm
Diâmetro externo	63,5 mm
Altura	228,6 mm
Temperatura máxima do líquido	60°C
Capacidade de retenção de partículas	>10 ou 5 micra (mm/1000)
Material do filtro	100% Polipropileno

Fonte: *Sediment Cartridges* (2010)

Filtro a Carvão. O terceiro cartucho do pré-tratamento contempla o filtro a carvão ativado, conforme visualizado na Figura 4.7. Esse componente é destinado para a remoção de sedimentos não inferiores a 5 micra, cloro e compostos orgânicos na água, reduzindo o sabor e o odor presentes.

Figura 4. 7 - Filtro de carvão ativado utilizado.



Fonte: Elaborado pelo Autor

As principais especificações técnicas, conforme manual do fabricante, estão resumidas na Tabela 4.5.

Tabela 4. 5 - Especificações técnicas do filtro de carvão ativado utilizado.

Parâmetro	Valor
Diâmetro interno	27,94 mm
Diâmetro externo	63,5 mm
Altura	228,6 mm
Temperatura máxima do líquido	52°C
Capacidade de retenção de partículas	>5 micra (mm/1000)
Material do filtro	Casca de Coco

Fonte: CARBON BLOCK (2015)

Filtro de resina. O quarto e último cartucho do pré-tratamento contempla o filtro de resina deionizadora, conforme visualizado na Figura 4.8. Esse componente é destinado para a filtragem químicas de íons, tais como fosfatos, nitratos e silicatos.

Figura 4. 8 -Filtro de resina deionizadora utilizado



Fonte: Elaborado pelo Autor

As resinas de troca iônica são granuladas, geralmente em gel, e possuem, em sua estrutura molecular, radicais ácidos ou básicos passíveis de troca por outros íons em solução, retendo cátions e ânions que passam pelo sistema de OR.

4.3.4 Membranas de OR

Na planta de ORFV do LEA foram utilizadas duas membranas de OR para água salobra do tipo TW30-1812-100HR, visualizadas na Figura 4.9 (a). Estas membranas atuam como peneiras moleculares que rejeitam seletivamente todas as moléculas dissolvidas, inclusive os sais, permitindo a passagem de água pura dependente do grau de rejeição de sais, gerando assim dois fluxos de água: o permeado, com concentração de sal menor que a água salobra inicial, e o concentrado, com concentração de STD maior que a água alimentada.

No intuito de dobrar a vazão de água potável, os elementos de OR são associados em paralelo, conforme Figura 4.9 (b).

Figura 4. 9 (a) Membranas de OR TW30-1812-100 utilizadas

Fig 4.9 (b) Membranas associadas em paralelo



Fonte: Elaborado pelo Autor

As principais especificações técnicas das membranas do tipo TW30-1812-100HR, estão apresentadas na Tabela 4.6:

Tabela 4. 6 - Especificações técnicas das membranas de OR utilizadas

Parâmetro para 1 membrana	Valor
A (Largura da membrana com conectores)	298 mm
B (Largura dos conectores)	22,2 mm
C (Diâmetro dos conectores)	17 mm
D (Diâmetro da membrana)	44,5 mm
E (Largura da membrana sem conectores)	254 mm
Pressão nominal de aplicação	3,4 bar (50 psi)
Taxa de fluxo de permeado	16 Litros/hora
Rejeição estabilizada de sais	90%
Taxa de recuperação	15%
Tipo de membrana	Filme Fino de Poliamida
Temperatura máxima de operação	45°C
Pressão máxima de operação	21 bar (300 psi)
Taxa máxima de fluxo de alimentação	456 Litros/hora
Tolerância de cloro livre	< 0,1 ppm

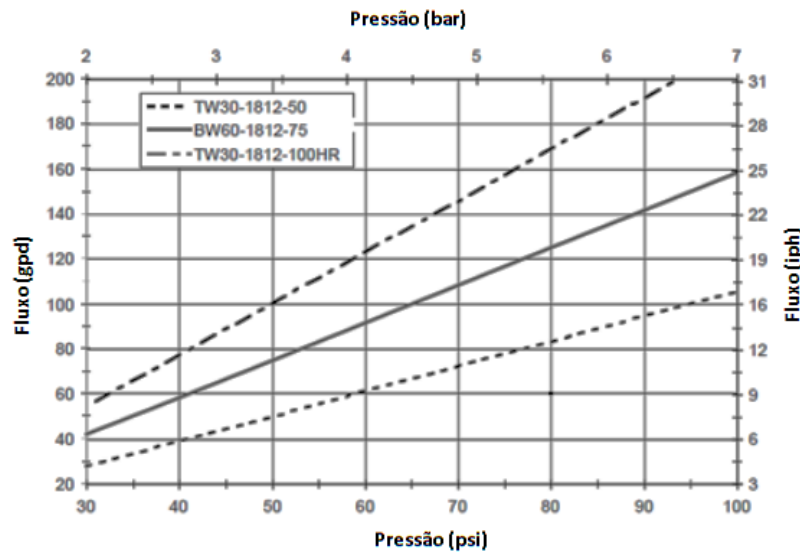
Fonte: *DOW FILMTEC™ Membranes* (2015)

Como a planta de ORFV desenvolvida utiliza duas membranas em paralelo, é de se esperar que o fluxo do permeado dobre.

O fabricante *DOW FILMTEC™ Membranes*, fornece na Figura 4.10, o impacto da pressão aplicada à membrana de OR para uma temperatura constante e o fluxo do permeado para diferentes membranas.

Para este projeto foi utilizada a membrana do modelo TW30-1812-50.

Figura 4. 10 - Impacto da pressão no fluxo de permeado gerado pela membrana.



Fonte: Adaptado de *DOW FILMTEC™ Membranes* (2015)

As membranas são projetadas para trabalharem a certas pressões ótimas, no sentido de dessalinizarem, de modo eficaz. Todavia, em plantas de dessalinização por OR alimentadas por energia solar FV sem baterias, uma característica marcante é a variação energética devido às variações na irradiância. Esta intermitência provoca uma mudança na potência entregue aos motores e conseqüentes alterações na pressão de entrada na membrana.

Essas alterações de pressão nas membranas afetam no desempenho das membranas, para tal deve se ajustar a pressão ótima através da válvula reguladora de pressão instalada na saída do concentrado. Esta válvula não só ajusta a pressão de serviço, também mantém constante a pressão osmótica nas membranas garantindo um fluxo constante do permeado pelo auto controle na ação direta regulando o fluxo do concentrado quando ocorre variação da potência elétrica entregue a motobomba.

4.3.5 Válvula de Auto Controle de Pressão de Ação Direta

Na planta foi utilizada uma válvula auto reguladora de pressão de ação direta do modelo 0075 PRV BERMAD, na saída do concentrado, conforme Figura 4.12. Estas válvulas, foi especialmente concebida no projeto para o controle exato e estável da pressão do concentrado, reduzindo a influência das flutuações da pressão e/ou da vazão. Esta característica de autocontrole otimiza o processo manual de controle de pressão ideal de funcionamento da motobomba causada pela intermitência da fonte de energia solar FV.

Estas válvulas possuem as seguintes características:

- O uso de um diafragma flexível e dobrável proporciona:
 - Completa separação entre o mecanismo e a vazão, o que assegura um longo serviço livre de manutenções.
 - Atrito mínimo de resistência ao movimento do mecanismo, resultando em um funcionamento preciso.
- O intervalo de pressão na qual a válvula pode atuar é escolhido pela mola, como mostrado na Figura 4.11.

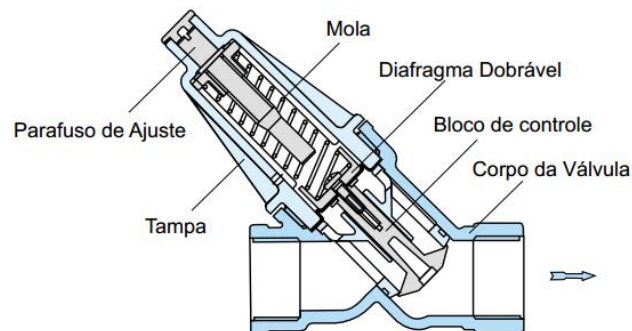
Figura 4. 11 - Válvula de controle de pressão à saída do concentrado



Fonte: Elaborado pelo Autor

A configuração e os elementos internos da válvula podem ser vistos na Figura 4.12.

Figura 4. 12 - Montagem da válvula básica



Fonte: BERMAD (2015)

Diagrama de Seleção da Mola. A seleção da mola é um fator crucial para o funcionamento do diafragma da válvula e o ajuste da pressão de serviço. O intervalo de pressão de operação da válvula tendo em conta a pressão da motobomba a usar é escolhida pela mola interna segundo a Tabela 4.7. Nesta planta foi escolhida a mola C, porque a motobomba em uso opera com máximo de 4,136 bar.

Tabela 4. 7 - Intervalo de pressão (bar)

Mola	Mínima	Máxima
A	0,5	1,2
B	0,8	2,5
C	2,0	4,0
D	3,5	6,0

Fonte: BERMAD (2015)

As características técnicas da válvula são apresentadas na Tabela 4.8.

Modelo 0075 PRV	
Limites da capacidade de vazão	
Normal: 0,2 – 5,0 m ³ /h	Alta e baixo: 0,01 – 5,0 m ³ /h
Limites de pressão	
Pressão de trabalho mínima:	Pressão de trabalho máxima
0,7 bar (10psi)	9 bar (130 psi)

Fonte: BERMAD (2015)

Para o correcto funcionamento da válvula reguladora de pressão de ação direta do modelo 0075 PRV BERMAD, uma válvula de controle manual, modelo DN15 PN20, foi instalada após a válvula 0075 PRV BERMAD, facilitando a fixação duma pressão capaz de mover o embolo desta válvula e posteriormente a auto regulação ser feita pelo ajuste do parafuso na válvula 0075 PRV BERMAD. O arranjo descrito pode ser visto na Figura 4.13 onde mostra o ramo com a válvula DN15 PN20.

Figura 4. 13 - Válvula DN15 PN20 instalada após a valvula 0075PRV BERMAD



Fonte: Elaborado pelo Autor

De acordo com as características descritas no catálogo do fabricante, a válvula DN15 PN20 possui uma altura máxima (aberta) de 113 mm e um diâmetro do volante de 65 mm, suportando uma pressão máxima de 14 bar (200 psi) a uma temperatura de 180°C do fluido utilizado.

4.3.6 Sensores de Medição

Nesta seção são descritos os sensores utilizados na planta ORFV, com a finalidade de aferir os diversos parâmetros de operação da planta e o estudo da viabilidade técnica.

Piranômetro. Para fazer a avaliação do recurso solar, um piranômetro do modelo LP02 Hukseflux, que fornece valores de irradiância global em W/m^2 , está instalado no LEA em cima do teto, conforme Figura 4.14. O dispositivo fornece um sinal de tensão de saída em função da irradiação presente, limitada a $2.000 W/m^2$, com uma sensibilidade de $18,61 \mu V/W/m^2$, possuindo um diâmetro de 76,2 mm e pesando 0,5 kg. Os valores são coletados pelo CLP e armazenados a cada minuto num computador.

Figura 4. 14 – Piranômetro LP02



Fonte: Elaborado pelo Autor

Sensores de vazão. Para efetuar medições de vazão, foram utilizados dois sensores de fluxo volumétrico, SU7000 e SM6000, instalados, respectivamente, na saída da motobomba utilizado para a dessalinização, conforme a Figura 4.15 (a), medindo a vazão do fluxo de entrada, e na tubulação após as membranas de OR, conforme a Figura 4.15 (b), medindo a vazão do fluxo de concentrado.

Figura 4. 15 - (a) Sensor de vazão na entrada,

Fig.4.15 (b) Sensor de vazão do concentrado



Fonte: Elaborado pelo Autor

Segundo o manual do fabricante *Instruction Manual - Flow Sensors* (2015), tanto o sensor de fluxo SU7000 quanto o SM6000 possuem duas saídas de monitoramento

simultâneas, podendo-se monitorar a vazão instantânea e o fluxo acumulado em certo período de tempo, em uma faixa de 0 a 50 L/min (SU7000) e de 0 a 25 L/min (SM6000), com uma resolução de 0,1 L/min (SU7000) e 0,05 L/min (SM6000), e um sinal de saída de 4 a 20 mA ou de 0 a 10 V para ambos. Os sensores, necessitando de alimentação entre 19 a 30 VCC, suportam uma pressão máxima de 16 bar (233 psi) e uma variação máxima de temperatura do fluido entre -25 e 80°C.

Sensores de Pressão. Para as medições de pressão foram utilizados dois sensores de pressão PN2024, instalados, um na saída da motobomba responsável para a pressurização da água de alimentação para as membranas, conforme Figura 4.16 (a), medindo a pressão do fluxo de entrada, e outro instalado após as membranas de OR para medição da pressão do fluxo de concentrado, conforme Figura 4.16 (b).

Figura 4. 16 - (a) Sensor de pressão na entrada;



Fig. 4.16 (b) Sensor de pressão na saída do concentrado



Fonte: Elaborado pelo Autor

O manual do fabricante indica que (*Instruction Manual - Pressure Sensors*, 2015) o sensor de pressão PN2024 efetua medições entre -1 e 10 bar (-14,5 e 145 psi), em degraus de 0,02 bar (0,2 psi), gerando um sinal de 4 a 20 mA ou 0 a 10 V como saída. Este sensor é alimentado por uma tensão de 20 a 30 VCC, suporta uma temperatura entre -25 e 80°C. Com o *display* demonstrativo presente nos sensores, pode-se rapidamente ajustar a pressão de entrada no limite desejado a partir da válvula instalada na saída do concentrado.

Condutímetro Portátil. Utilizado para efetuar as medições de condutividade devido à presença de STD (sólidos totais dissolvidos) na água de alimentação, no concentrado e no permeado, foi utilizado um condutímetro PHTek CD203, visualizado na Figura 4.19.

Figura 4. 17 - Condutivímetro PHTek CD203



Fonte: Elaborado pelo Autor

Termómetro Digital Tipo Vareta. Conforme descrito no capítulo 2, o processo de dessalinização depende também da temperatura da água a dessalinizar, pois existe uma proporção direta entre temperatura e STD. Para o controle da temperatura foi usado um termómetro digital portátil, tipo vareta, mostrado na Figura 4.20.

Este termómetro realiza medida de temperatura na faixa de -10°C a 200°C ou 14°F a 392°F , com precisão básica de 3°C e resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$ ou $0,1^{\circ}\text{F}$ (Minipa, 2015).

Figura 4. 18 - Termômetro utilizado



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3.7 Sistema de Aquisição de Dados

Todas as medições efetuadas pelos sensores descritos na seção anterior são coletadas por um sistema supervisorio composto por controladores lógicos programáveis, conforme a Figura 4.19. Após coletados, os dados são armazenados em um computador, em períodos de 1 segundo, obtendo-se, desta forma, uma vasta quantidade de dados armazenados.

Os dados armazenados são posteriormente processados e tratados para o estudo da viabilidade técnica do projeto.

Figura 4. 19 - Sistema supervisório para coletar e armazenar os dados da ORFV



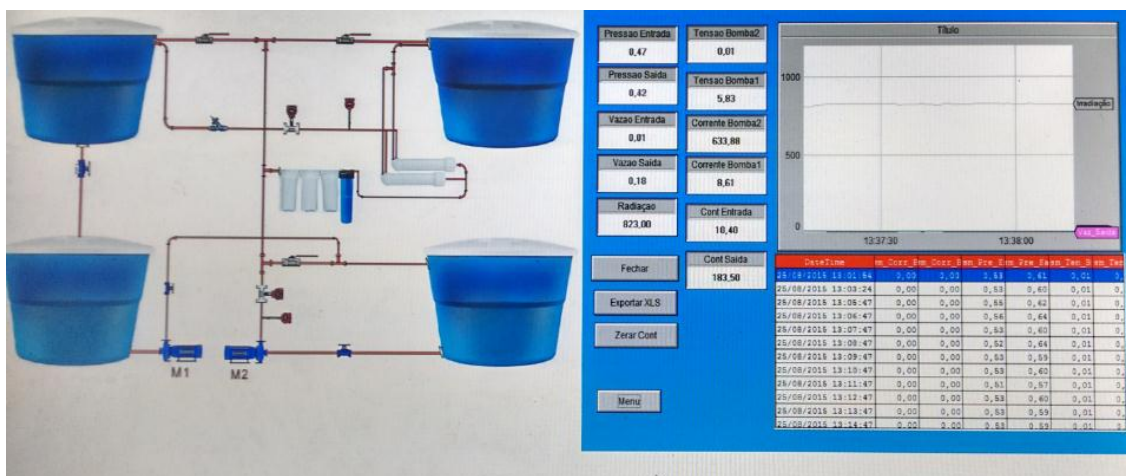
Fonte: Elaborado pelo Autor

O sistema de supervisão e aquisição de dados utilizado comporta um *software* para monitorar, supervisionar e armazenar as variáveis e os dispositivos de sistemas de controle conectados através de *drivers* específicos, utilizando controladores lógicos programáveis (CLP) como protocolo de comunicação.

A programação do CLP é efetuada pelo *software TwidoSuite V2.20*, sendo a interface com o computador efetuada através do *Driver Modicon Modbus*, que serve para implementar o protocolo de comunicação (NETO; CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

Para capturar e armazenar as informações dos sensores coletadas pelo sistema supervisório, foi desenvolvido um aplicativo utilizando-se o *software ELIPSE*, conforme tela apresentada na Figura 4.22. O aplicativo coleta e armazena as informações de 1 em 1 segundo, capturando os seguintes parâmetros: tensão e corrente dos motores-bomba, pressão e vazão de entrada, pressão e vazão de saída, quantidade de litros acumulada e irradiância global. Depois de capturadas, todas as informações são exportadas para um arquivo em Excel, podendo ser trabalhadas e devidamente analisadas.

Figura 4. 20 - Tela do aplicativo desenvolvido para captura de dados



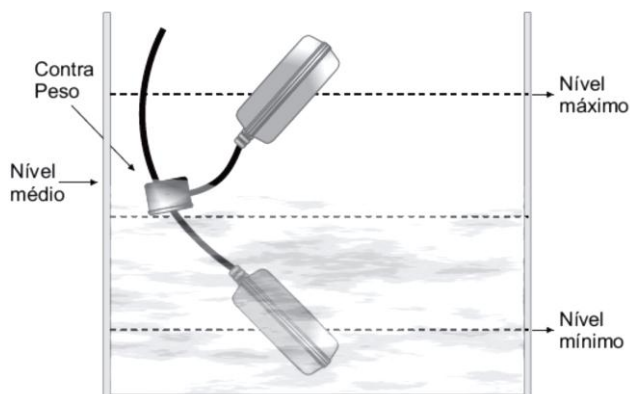
Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3.8 Chave Bóia Unipolar

A chave-bóia unipolar é aplicada para o controle de nível do líquido é um dispositivo mecânico unipolar utilizado para autocontrole de nível e proteção em caso de falta ou excesso de água (ou outro líquido) em tanques e/ou reservatórios.

O funcionamento baseia-se na abertura e fechamento do circuito elétrico que alimenta a bomba responsável por levar a água para o poço, através do contato mecânico que uma parte móvel no interior da bóia faz com uma parte fixa, na medida em que a estrutura externa é movimentada conforme varia o nível do líquido, na forma visualizada na Figura 4.23.

Figura 4. 21 - Princípio de funcionamento da chave-bóia unipolar



Fonte: Oliveira (2011)

Efetua-se a ligação em série com os motores-bomba, de forma que quando a água fica abaixo do nível mínimo, o contator interno à chave-bóia é desconectado, abrindo o circuito elétrico e desligando o motor, garantido que a bomba não trabalhe sem água. Há ainda um contrapeso, conforme pode ser verificado na Figura 4.24, com a função de calibrar o nível ideal em que a carga é desligada. Na planta em estudo foram utilizadas duas chaves-bóias do modelo CB-2000, com especificações estão descritos na tabela 4.8.

Figura 4. 22 - Chave-bóia unipolar



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 4. 8 - Especificações técnicas da chave-bóia usada no controle de nível

Parâmetro	Valor
Comprimento	102,5 mm
Largura	80 mm
Altura	38,5 mm
Peso	0,305 kg
Capacidade elétrica	15 Ampères
Temperatura de operação	0° a 60°C
Tipo de controle (isenta de mercúrio)	Eletromecânico
Material da bóia	Polipropileno

Fonte: Phtek - Condutivímetro Portátil CD203 (2015)

4.3.9 Dispositivos Auxiliares

Neste item são citados alguns componentes não mencionados anteriormente, mas que são dispositivos gerais necessários ao funcionamento da unidade de ORFV desenvolvida,

tais como:

- Disjuntores de proteção utilizados como chave geral da unidade;
- Cabos flexíveis 6 mm² utilizados em todo o circuito de alimentação dos motores-bomba e chaves-bóia, supridos pelos painéis FV;
- Cabos flexíveis 1 mm² utilizados para alimentação dos sensores de medição;
- Cabos UTP utilizados para levar o sinal fornecido pelos diversos sensores ao sistema supervisorio;
- Eletrocalhas utilizadas para acomodação dos condutores a todas as partes do laboratório e da planta;
- Canos de PVC de ½” utilizados na parte hidráulica da unidade;
- Válvulas esféricas e conectores para auxiliar o circuito hidráulico na limpeza dos tanques;

5 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA UNIDADE DE ORFV DO LEA-UFC

Para a análise da técnica da unidade de dessalinização por OR acionado por módulos FV sem uso de banco de baterias foram utilizadas variáveis relativas à corrente eléctrica, tensão da unidade de condicionamento de potência à carga, pressão aplicada às membranas de OR, vazão de entrada, vazão e pressão do concentrado e a irradiação média diária. Estes dados foram armazenados no CLP e posteriormente processados em intervalos de 10 em 10 minutos. Com esses dados, calcula-se a potência eléctrica (W), o consumo de energia por metro cúbico produzido de água potável (kWh/m³), taxa de recuperação do sistema (%) a partir das Equações 2.5, 2.6, 2.7, respectivamente.

O desempenho da unidade foi verificada para água de fonte com concentrações salinas de 1000 a 1500 mg/L de STD, o sistema operou com pressões variáveis de acordo com a oferta da irradiação diária.

5.1 Resultados Experimentais

Os resultados obtidos para análise do presente projeto passaram por duas configurações que são apresentadas na Tabela 5.1:

Tabela 5. 1 Tipos de configuracao de operacao da planta ORFV

Tipo de configuração			
Sem a presença da válvula auto-reguladora de pressão de ação direta no concentrado		Com a presença da válvula auto-reguladora de pressão de ação direta no concentrado	
Datas de operação			
23/11/2015	25/11/2015	01/12/2015	02/12/2015
Nível de concentração salina (mg/L de STD)			
1017	1561	1561	1095

Ressalta-se que, para obter os resultados apresentados a seguir, adicionou-se sal de cozinha na água de entrada até se chegar a uma concentração de STD próxima da estratégia em questão. Calibrou-se a pressão de entrada a aproximadamente 55 psi mediante ajuste da válvula fixa e da válvula de controle de ação direta mostrada na Figura 4.12 e 4.13 do capítulo 4, efetuou-se a coleta dos parâmetros para a avaliação técnica pelo CLP.

O CLP faz aquisição de dados a cada 1 min e armazena num computador. Após o armazenamento os dados foram tratados em médias de 10 min, com objetivo de analisar os gráficos eliminando os efeitos das variações abruptas, provocadas pelas variações na

irradiância. Os resultados apresentados a seguir serão apresentados em formas de gráficos e tabelas, contendo principalmente, as seguintes informações:

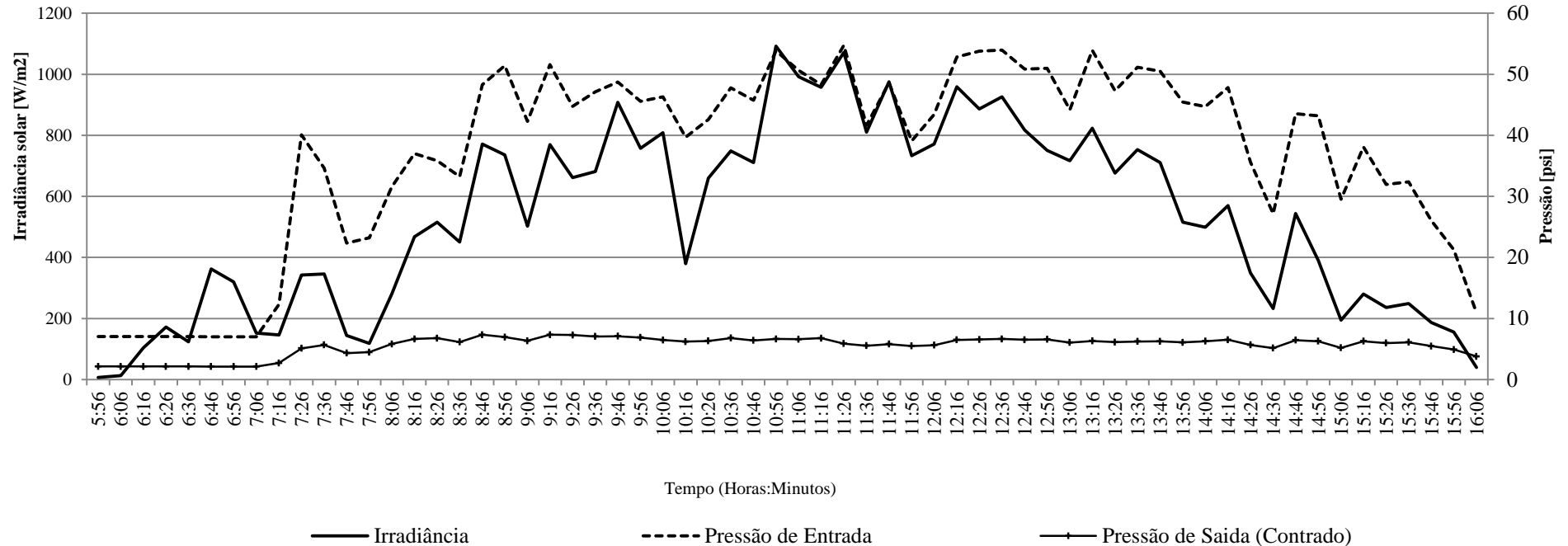
- Salinidade média da água de entrada: concentração, em mg/L de STD da água de entrada;
- Temperatura da água de entrada;
- Salinidade do permeado produzido: concentração, em mg/L de STD da água da água potável produzida;
- Percentual médio de rejeição de sais: relação percentual entre a quantidade de sais barrados pela membrana e a quantidade de sais da água de entrada.
- Permeado produzido: produção diária de litros de água potável;
- Taxa média de recuperação: relação percentual entre a quantidade de água potável e a quantidade de água de entrada para dessalinizar. Uma taxa de recuperação adequada garante que não haja deposição elevada de sais sobre as membranas;
- Consumo específico médio: quantidade de energia útil gasta para produzir 1 m³ de água potável;
- Pressão média de entrada: pressão média, em psi, com que a água de entrada foi aplicada às membranas, fornecida pela motobomba responsável pela pressurização da água para as membranas de OR;
- Tempo médio de operação: o tempo médio, em horas diárias, em que a planta opera;
- Irradiação média diária: irradiação global média diária colectada pelo piranômetro.

5.1.1 Resultados de Operação da Planta sem a Válvula Auto Reguladora de Pressão no Concentrado.

Foi acionada a planta de ORFV no dia 23/11/2015, com nível de salinidade de entrada de 1017 mg/L de STD e o nível de concentração salina do permeado foi de 105 mg/L de STD. A planta operou sem presença da válvula auto-reguladora de pressão no concentrado e a planta operou durante 10 horas, a Figura 5.1 apresenta o perfil do comportamento diário da irradiância, pressão de saída e pressão de entrada que foram obtidos pelos valores armazenados no CLP a cada minuto e posteriormente processados em Excel em intervalos médios de 10 em 10 min. O sistema apresentou uma variação da pressão, vazão e corrente elétrica em função da irradiância. .

A irradiação média diária foi de $5,382 \text{ kWh/m}^2$, com produção de $160,79 \text{ L}$ de água e o consumo médio específico foi de $2,54 \text{ kWh/m}^3$.

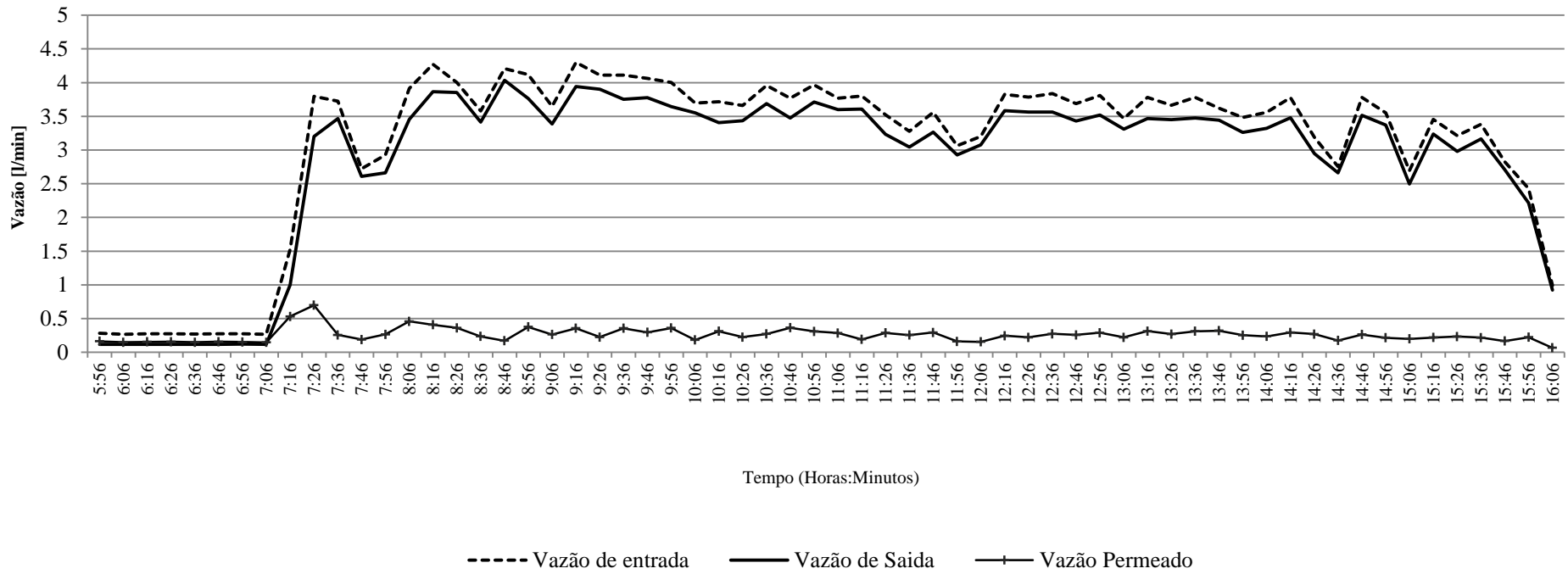
Figura 5. 1 - Irradiância, pressão de entrada, pressão do concentrado - 23/11/2015



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 5.2 representa a vazão de entrada, vazão do concentrado e a vazão do permeado, obtida pela diferença entre a vazão de entrada e vazão do concentrado. Verifica-se que a vazão de saída depende diretamente da vazão de entrada.

Figura 5. 2 - Vazão de água de entrada, vazão do concentrado, vazão do permeado - 23/11/2015

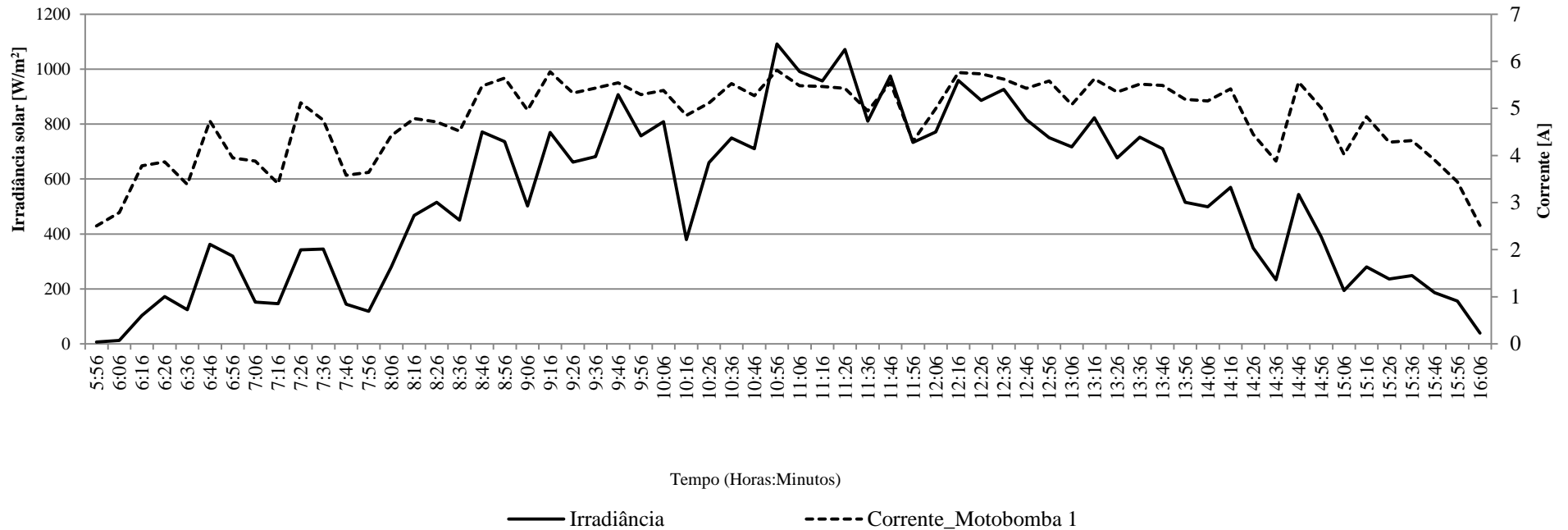


Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 5.3, está representada a corrente na motobomba 11, responsável por pressurizar água nas membranas de OR. Observa-se a variação da corrente no gráfico acompanhando a variação da irradiância. As variações da irradiação solar ocorridas no

período do meio-dia afetam na potência entregue à motobomba 11, causando pressões acima da nominal da motobomba e fazendo com que o pressostato atue. O valor médio da corrente foi de 4,8 A e a tensão média foi de 8,5 V.

Figura 5.3 - Corrente na motobomba 11 e a irradiância - 23/11/2015

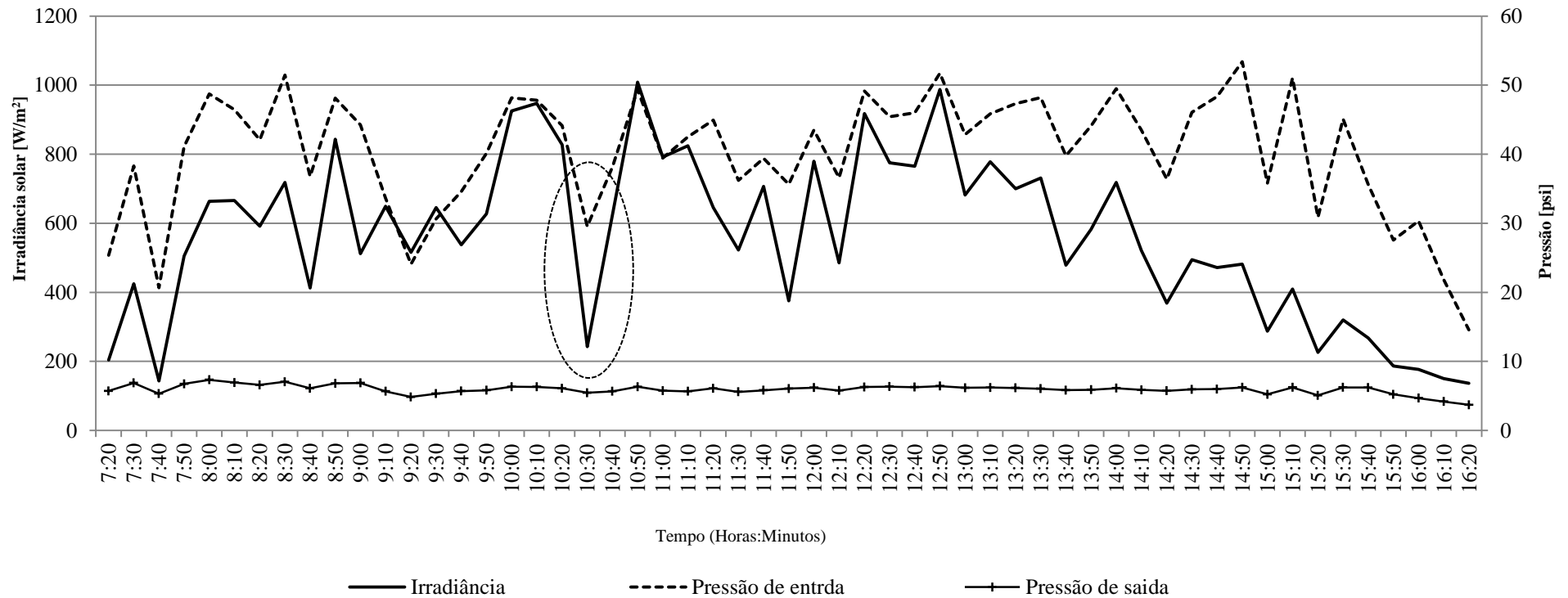


Fonte: Elaborado pelo Autor

No dia 25/11/2015, foi utilizada a planta ORFV com a concentração de 1561 mg/L de STD na água de alimentação; o permeado apresentou um nível de salinidade de 155 mg/L de STD. A Figura 5.5 apresenta a irradiância, pressão de entrada (água de alimentação), pressão de saída do concentrado. A irradiância média diária foi de 5,679 kWh, com a produção de 142,6 L e consumo médio específico foi de 2,82

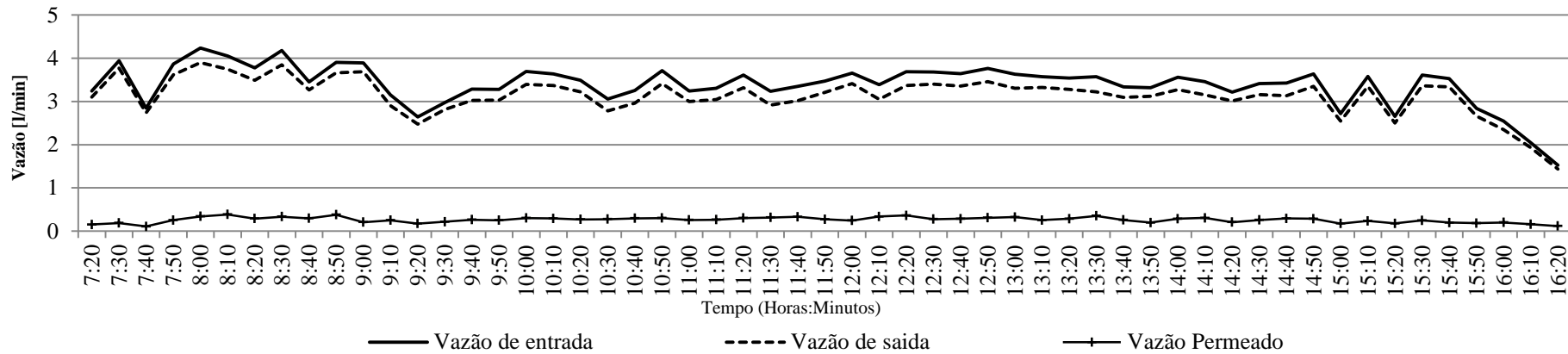
kWh/m³. Porém as 10horas e 30 min ocorreu uma queda de irradiância e mesmo assim verifica-se que a pressão na motobomba 11 na sofre a queda acentuada, isto porque a unidade de potência desenvolvida consegue fornecer a potência mesmo para níveis baixos de irradiância (200 Wp).

Figura 5. 4 - Curva da irradiância, pressão de entrada, pressão do concentrado - 25/11/2015



A Figura 5.6 apresenta a vazão da água de entrada, vazão do concentrado e vazão do permeado, e vazão do permeado obtido pela diferença entre a vazão de entrada e do concentrado. Observa-se que a vazão de saída acompanha o comportamento da vazão de entrada.

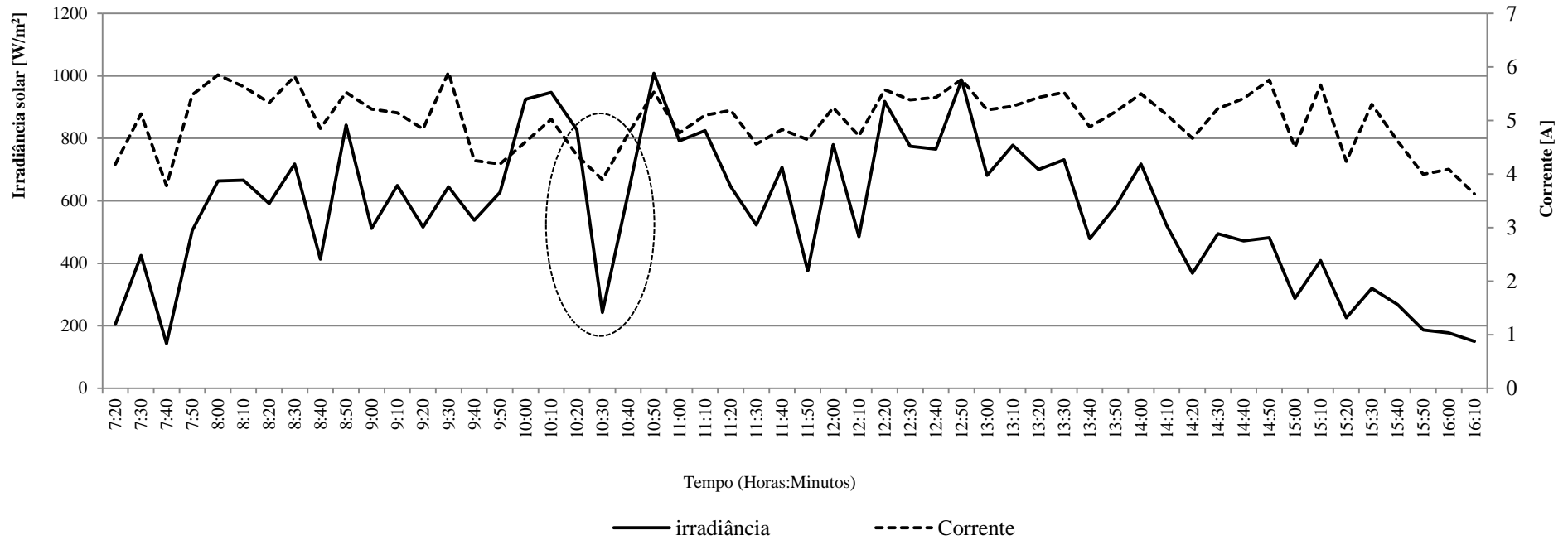
Figura 5. 5 - Vazão de entrada, Vazão do concentrado, Vazão do permeado - 25/11/2015.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5.7 apresenta a corrente na motobomba 11, responsável por pressurizar água nas membranas de OR. Observa-se a variação da corrente no gráfico acompanhando a variação da irradiância e as 10 horas e 30 min ainda que o pico de que da irradiância seja muito acentuado o conversor consegue assegurar a corrente. As variações da irradiância ocorridas no período do meio-dia afetam na potência entregue à motobomba 1, causando pressões acima do nominal da motobomba fazendo com que pressostato da motobomba atue como proteção à motobomba. O valor da corrente média para o perfil de irradiância foi usado para o cálculo da potência elétrica e o consumo específico da motobomba responsável por pressurizar água para as membranas OR. A tensão média foi de 10 V, fixada na tensão de saída do conversor *Buck*.

Figura 5. 6 - Comportamento da corrente na motobomba 11 e a irradiância - 25/11/2015



5.1.2 Resultados de Operação da Planta ORFV com a Válvula Auto Reguladora de Pressão do Concentrado.

Uma segunda etapa foi testada nos dias 01/12/2015 e 02/12/2015, no qual a planta de ORFV utilizou uma válvula auto-reguladora de pressão de ação direta no fluxo.

Foi acionada a planta no dia 01/12/2015 com uma concentração salina de água de entrada de 1561 mg/L de STD e o permeado apresentou 143 mg/L de STD. A produção foi de 179,24 L e a irradiância média diária foi de 5,96 kWh e consumo médio específico foi de 2,52 kWh/m³.

A Figura 5.9 apresenta a irradiância, pressão de entrada e pressão do concentrado. Observa-se nesta figura que a pressão de entrada apresenta menor variação comparado com os dias que a planta operou sem a presença da válvula auto-reguladora de pressão no concentrado. Esta vantagem de auto regulação faz com que o sistema opere por um período maior com pressões elevadas e a menor índice de variação de pressão e corrente na motobomba.

Figura 5. 7 - Irradiância, pressão de entrada, pressão do concentrado - 01/12/2015

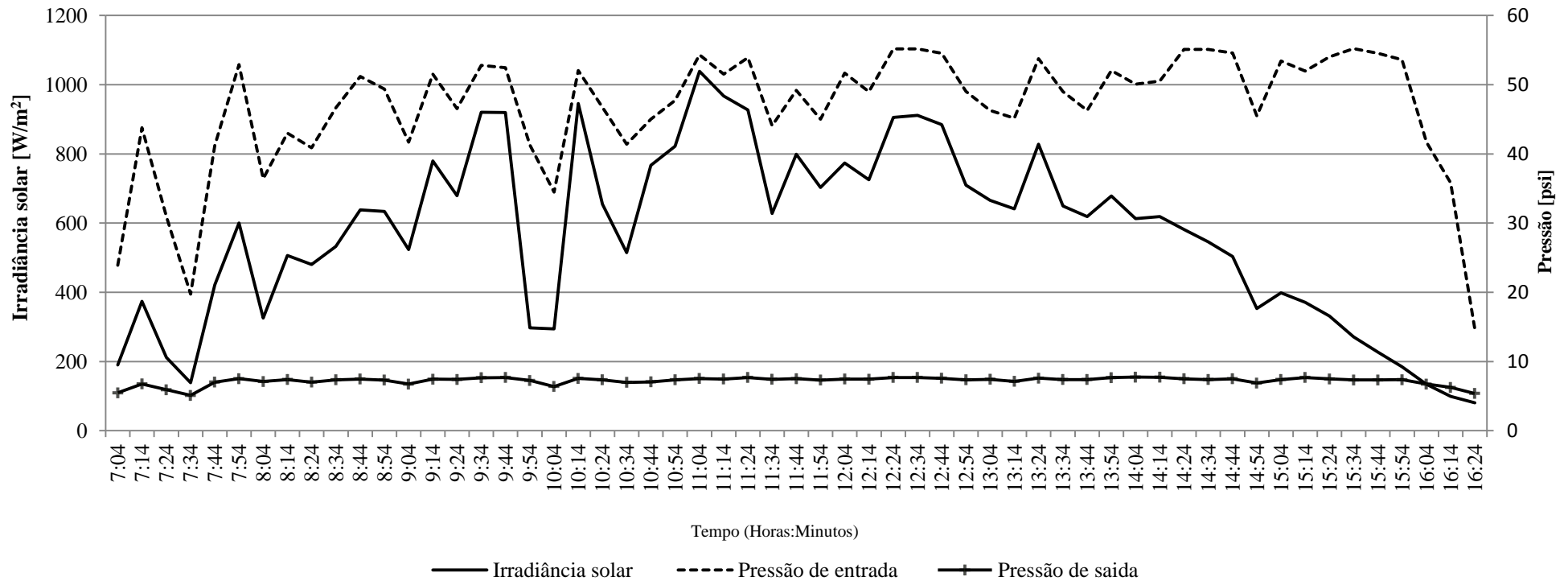
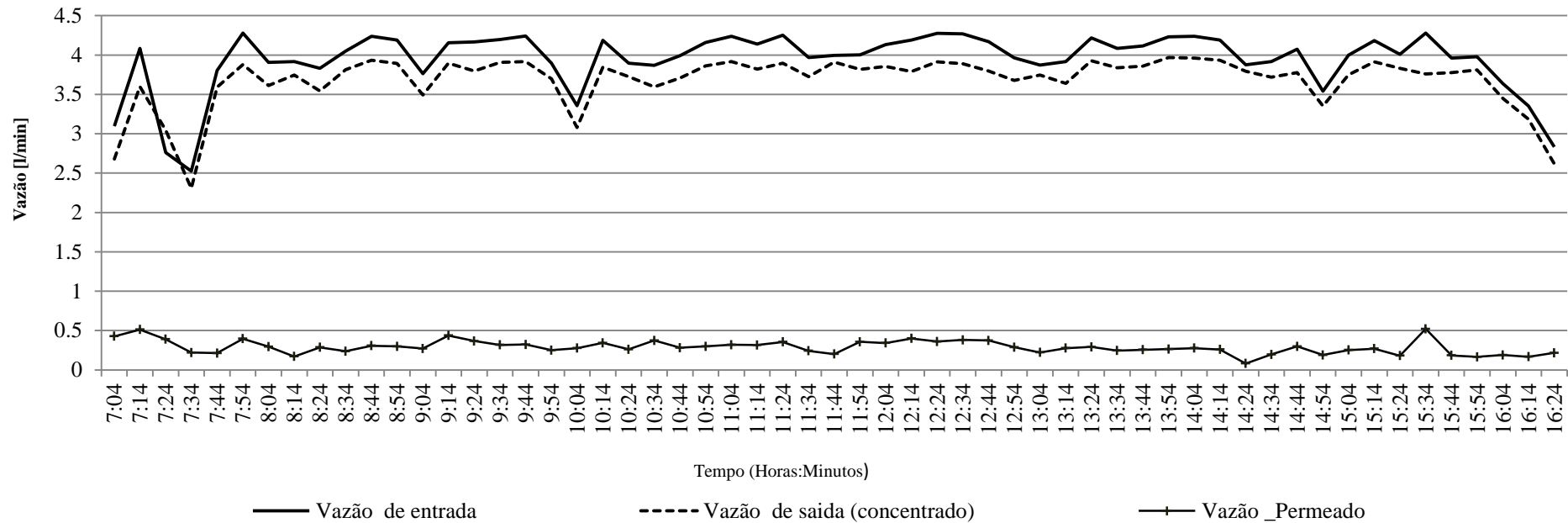


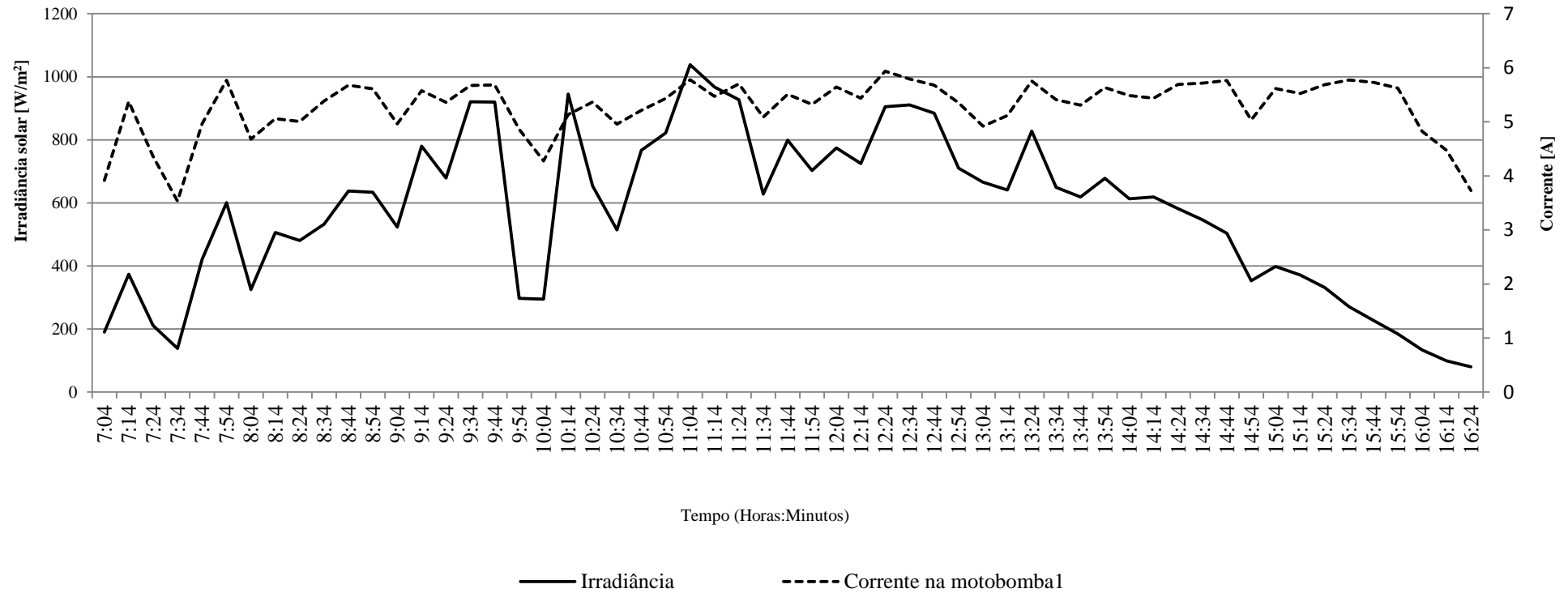
Figura 5.8 mostra a vazão da água de alimentação, vazão na saída do concentrado e vazão na saída do permeado, podendo se observar que a vazão de saída acompanha a vazão de entrada.

Figura 5. 8 - Vazão de entrada, vazão do concentrado, vazão do permeado - 01/12/2015.



A Figura 5.9 apresenta a corrente na motobomba 11, responsável por pressurizar água para as membranas. A corrente média foi de 5,3 A e a tensão média foi de 9,2 V, a corrente apresenta menor variação comparado com o comportamento da mesma grandeza nos dias em que a planta operou sem a válvula auto-reguladora de pressão no fluxo do concentrado.

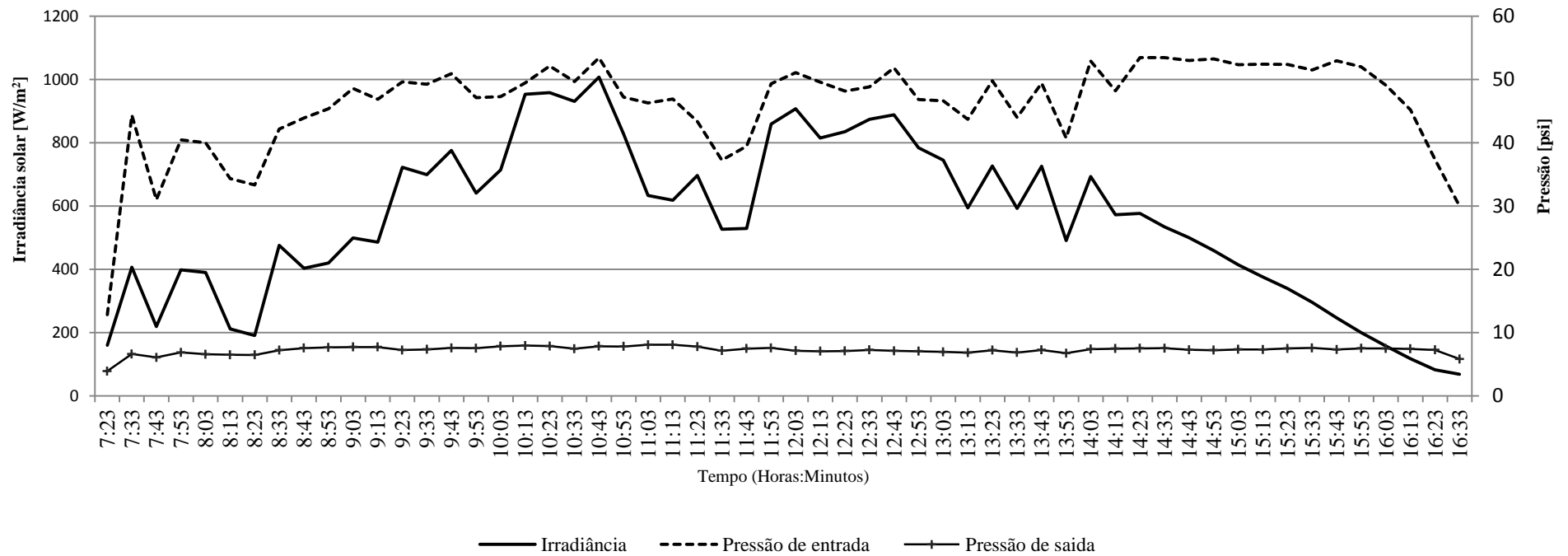
Figura 5. 9 - Corrente na motobomba 1 e a irradiância - 01/12/2015



Foi acionada a planta de ORFV no dia 02/12/2015, com a concentração de 1095 de STD na água de alimentação e o permeado com um nível de salinidade de 98 de STD.

A Figura 5.10 apresenta a curva de irradiância, pressão de entrada, pressão do concentrado. A irradiância média diária foi de 5,69 kWh, produzindo 171,37 L e o consumo médio específico foi de 2,6 kWh/m³. O comportamento da pressão de água de entrada apresenta menor variação comparando com os dias em que a planta operou sem a presença da válvula auto-reguladora de pressão.

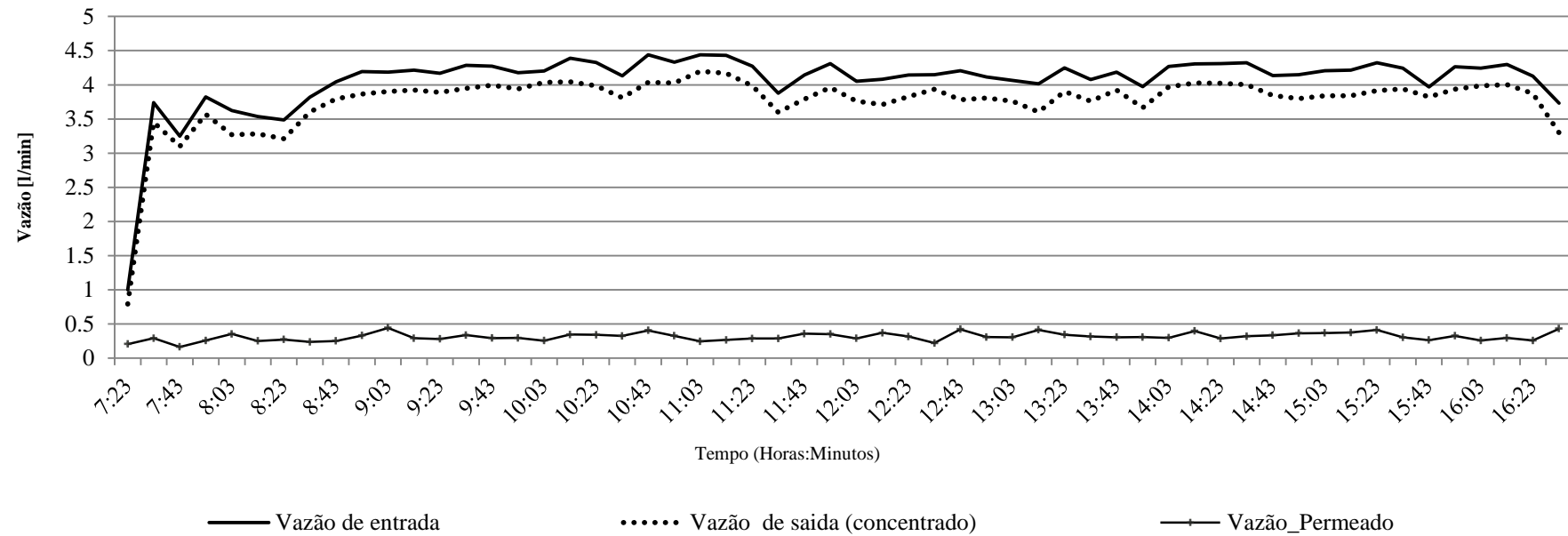
Figura 5. 10 - Curva da irradiância, pressão de entrada, pressão do concentrado - 02/12/2015



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na figura 5.11 mostra o perfil da vazão da água de alimentação, vazão do concentrado e vazão do permeado, podendo se observar que a vazão de saída acompanha a vazão de entrada.

Figura 5. 11 – Vazão de entrada, Vazão do concentrado, Vazão do permeado - 02/12/2015.



A Figura 5.12 apresenta a corrente na motobomba 11, responsável por pressurizar água para as membranas. A corrente média foi de 5,33 A, e a tensão média foi de 9.3 V.

Figura 5. 12 - Corrente na motobomba 11 e a irradiância - 02/12/2015



5.1.3 Influência da válvula auto reguladora de pressão no sistema ORFV

Para evidenciar a influência da válvula auto reguladora de pressão no concentrado, é apresentada uma comparação do perfil dos gráficos de pressão de entrada, irradiância e pressão de saída nos dias 23/11/2015, Figura 5.13 a) onde a planta operou sem a presença da válvula auto reguladora de pressão e no dia 02/12/2015 b) Figura 5.13 b) onde a planta operou com a presença da válvula auto reguladora. Observa-se que na Figura 5.1 b) o perfil da pressão de entrada apresenta menor variação em relação a Figura 5.16 a).

Figura 5.13 a) Pressão de entrada, saída e irradiância 23/11/2015

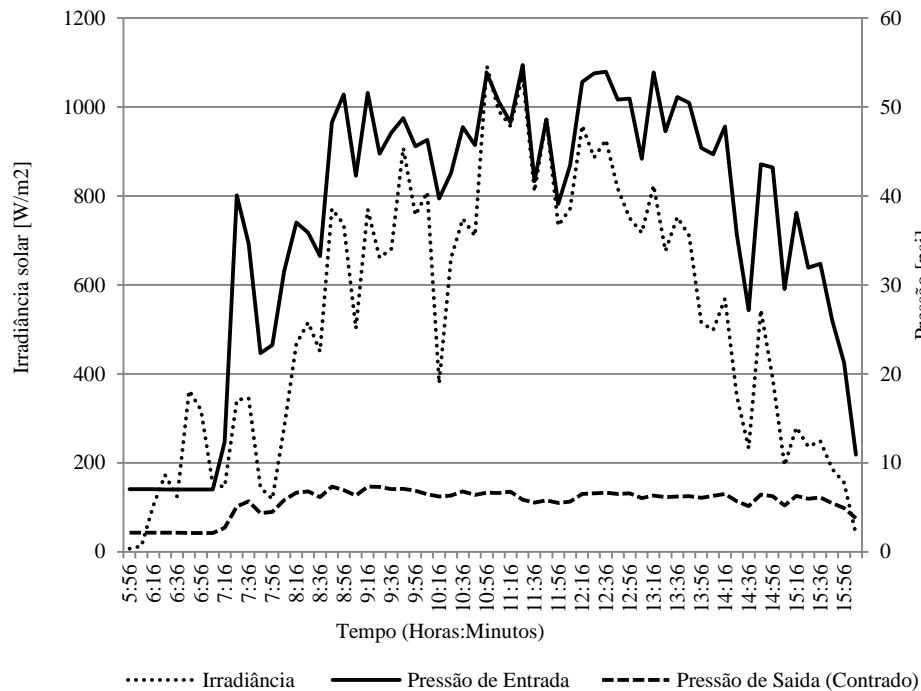
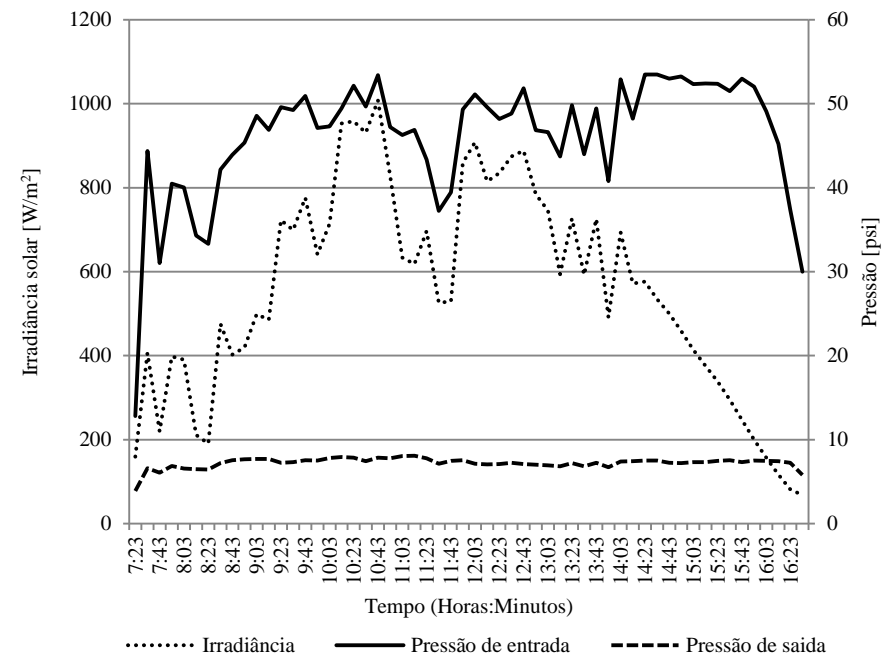


Figura 5.13 b) Pressão de entrada, saída e irradiância 02/12/2015



Para os dias em comparação também foi verificada o perfil de corrente na motobomba nos dias 23/11/2015, Figura 5.14 a) onde a planta operou sem a presença da válvula auto reguladora de pressão e no dia 02/12/2015 b) Figura 5.14 b) onde a planta operou com a presença da válvula auto reguladora. Observa-se que na Figura 5.14 b) a corrente na motobomba 1, apresenta menor variação em relação ao dia em que a planta operou sem a válvula auto reguladora de pressão no concentrado.

Figura 5.14 a) - Corrente na motobomba 1 e irradiância 23/11/2015

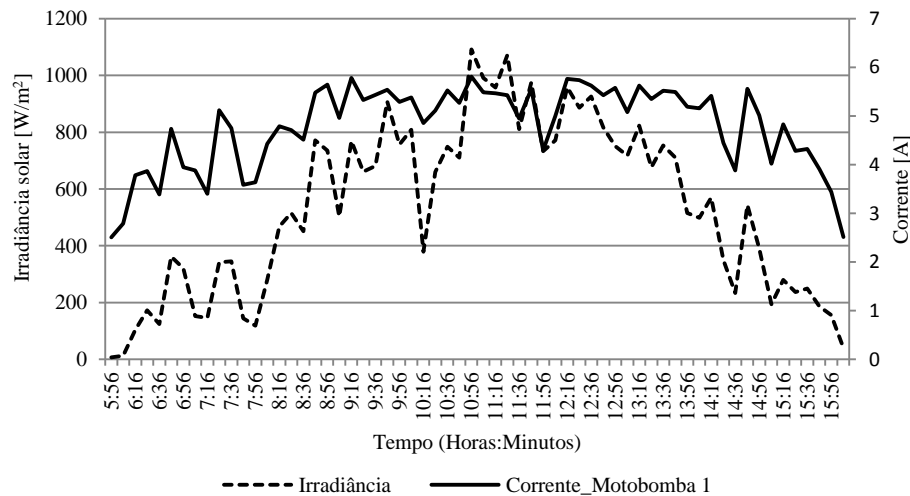
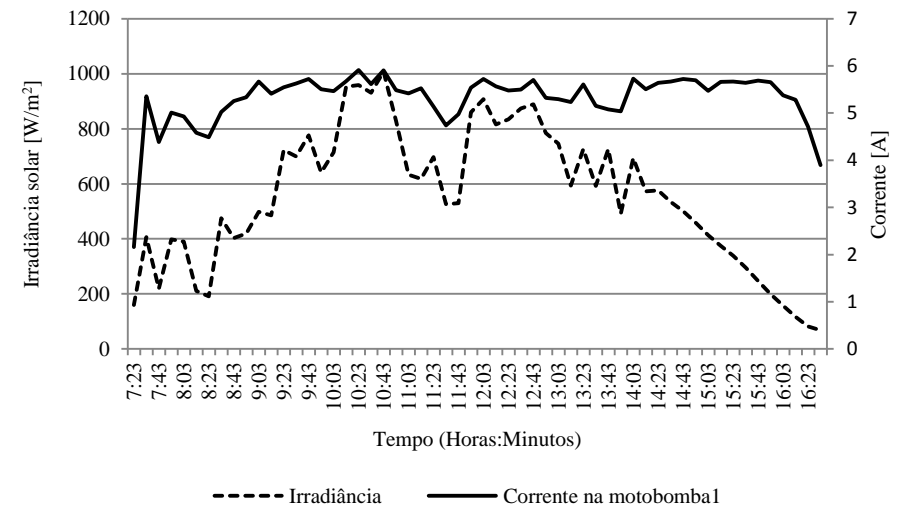


Figura 5.14 b) Corrente na motobomba 1 e irradiância 02/12/2015



Os resultados obtidos para diferentes níveis de concentração salina adotados em cada estratégia de operação estão resumidos na tabela 5.1.

Tabela 5. 2 - Resumo dos resultados obtidos para as estratégias de operação adoptadas para estudo da viabilidade técnica da planta ORFV

Estratégia de operação	Com a válvula auto-reguladora de pressão		Sem a válvula auto-reguladora de pressão	
	23/11/15	25/11/15	1/12/2015	2/12/2015
Data				
Salinidade da água de entrada (mg/L) STD	1017	1561	1561	1095
Salinidade da água do permeado (mg/L) STD	105	155	143	98
Temperatura da água de entrada (°C)	29,1	30,2	28,9	27,5
Percentual de rejeição de sais (%)	89,7	90,1	90,8	91,1
Permeado produzido (L/dia)	160,79	142,6	179,24	171,37
Taxa média de recuperação (%)	8,38	7,69	8,62	7,66
Consumo médio específico (kWh/m ³)	2,54	2,82	2,52	2,60
Tempo médio de operação (h)	10	9	9,26	9
Irradiação média diária (kWh/m ²)	5,382	5,679	5,964	5,696
Pressão média de entrada (psi)	37,32	40,5	47,14	46,40
Corrente média _Motobomba B1 (A)	4,8	4,96	5,30	5,33
Tensão Média (V)	8,5	9,00	9,20	9,30
Potência Motobomba 2 (W)	5613	7712,67	8377,68	7583,78
Vazão entrada _Água de alimentação (L/min)	1918,4	1854,39	2079,62	2237,67
Energia_MotoB1 (Wh)	408,0	401,76	451,18	445,95

6 CONCLUSÃO

A selecção de um processo de dessalinização deve ser baseada em um estudo cuidadoso das condições e aplicações do local. A utilização de energias renováveis para a dessalinização é uma opção tecnicamente viável e os avanços tecnológicos tendem a melhorar a eficiência destas duas tecnologias, tornando-as cada vez mais competitivas em relação aos sistemas convencionais que utilizam combustíveis fósseis, principalmente em áreas remotas sem acesso à electricidade.

Uma cuidadosa revisão bibliográfica foi realizada sobre o estado da arte de unidades de dessalinização osmose reversa acionadas por energia solar fotovoltaica (ORFV) no Brasil e outros Países.

Os resultados apontam crescimento significativo na ordem de 62% das plantas de dessalinização por osmose reversa accionada por energias renováveis.

Foi desenvolvido um conversor Buck e duas técnicas de MPPT foram testadas, nomeadamente perturbar e observar (P&O) e o método da condutância incremental (CondInc). Os resultados experimentais foram obtidos com uma carga resistiva constituída por três lâmpadas de 12V e 50 W cada, ligadas em paralelo dando uma resistência de 0,9 Ω ; o método de P&O apresentou uma eficiência de 72,0% e o método de CondInc de 86,8%. Este último foi escolhido para o controle do conversor e acionar a unidade de dessalinização utilizada na presente pesquisa.

A análise da operação e da viabilidade técnica da ORFV com seguimento de potência máxima instalada no Laboratório de Energias Alternativas da UFC (LEA-UFC) foi efetuada ao longo de 5 dias, com duas etapas:

- Sem a presença da válvula auto-reguladora de pressão na saída do concentrado;
- Com a presença da válvula auto-reguladora na saída do concentrado.

Nos dias 23/11/2015 e 25/11/2015, foi acionada a planta ORFV sem a presença da válvula auto-reguladora de pressão e o perfil dos gráficos mostra que as variáveis pressão de entrada e corrente na motobomba 1 apresentaram maior variação em relação aos dias 01/12/2015 e 02/12/2015, que a planta foi acionada com presença da válvula auto-reguladora de pressão.

No entanto os melhores resultados de produção de água, consumo médio específico e taxa de recuperação apresentaram melhores resultados na configuração em que a planta operou com a presença da válvula auto reguladora de pressão no concentrado.

Comparando com os dados de consumo específico de energia, entre 1,5 e 4 kWh/m³, das experiências mundiais em plantas de dessalinização por OR e energia solar FV sem recuperação de energia, observa-se que os resultados da planta desenvolvida se situam no intervalo apresentado a nível mundial.

Uma contribuição inovadora na planta desenvolvida foi a introdução de uma válvula de auto-reguladora de pressão de ação direta instalada no fluxo do concentrado, para reduzir a variação do gradiente de pressão nas membranas de OR. Observa-se que com a adição desta válvula ocorre menor variação de pressão e corrente na motobomba 1 em relação ao comportamento verificado nas mesmas grandezas para a planta sem a presença desta válvula.

7 Sugestões e Recomendações Para Trabalhos Futuros

- Uso de um dispositivo de recuperação de energia na saída do concentrado, para reduzir o consumo específico de energia;
- Mudança da motobomba responsável pela pressurização da água para as membranas por uma de maior pressão (150psi) disponível no mercado.
- Estudar estratégias visando operação contínua da planta de dessalinização por OR, como forma de prevenção ao surgimento de biofilme nas membranas de OR;
- Estudar o desempenho do sistema proposto conectado a um mecanismo de seguimento solar;
- Estudo de outras técnicas de MPPT para a unidade de potência.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELJAWAD, M.; ALSHAMMARI, S.; ALSULAIMI, J. Non-conventional treatment of treated municipal wastewater for reverse osmosis. *Desalination*, 2002.

AL-KARAGHOULI, A. A; KAZMERSKI, L. L. Renewable Energy Opportunities in Water Desalination. *Desalination, Trends and Technologies*, 2007.

ARAÚJO, A. P. S. A. Contribuição para o Estudo da Viabilidade / Sustentabilidade da Dessalinização enquanto Técnica de Tratamento de Água, 2013.

BARBI, I.; MARTINS, CONVERSORES CC-CC BÁSICOS NÃO ISOLADOS. Edição dos ed. Florianópolis.

BEN SALAH, C.; OUALI, M. Comparison of fuzzy logic and neural network in maximum power point tracker for PV systems. *Electric Power Systems Research*, 2011.

Catálogo Técnico Válvulas de Controle de ação direta BERMAD, 2015.

BHATNAGAR, P.; NEMA, R. K. Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.

BILTON, A. M. et al. On the feasibility of community-scale photovoltaic-powered reverse osmosis desalination systems for remote locations. *Renewable Energy*, 2011.

BORGES NETO, M. R. & CARVALHO, P. C. M. Introdução À Geração de Energia Elétrica, Petrolina, IF Sertão Pernambucano, 2011.

BURN, S. et al. Desalination techniques — A review of the opportunities for desalination in agriculture. *Desalination*, 2015.

Owner's Manual - Carbon Block Filter Cartridges, Environmental World Products (EWP). 2015.

Owner's Manual - SF Sediment Cartridges, Environmental World Products (EWP). 2010.

CARVALHO, P. C. M. DE et al. The Brazilian Experience with a Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant, Applications, December 2004.

CARVALHO, P. C. M. DE et al. Control method of a photovoltaic powered reverse osmosis plant without batteries based on maximum power point tracking, IEEE, 2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (IEEE Cat. No. 04EX956), October 2005.

CARVALHO, P.; JUCÁ, S. Métodos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos: Aplicações em dessalinização. 1ed, 2013

CATÁLOGO TÉCNICO - CONDUTIVÍMETRO PORTÁTIL CD203, P. Catálogo Técnico - Condutivímetro Portátil CD203, PHTEK, 2015.

CHILUNDO, R. J. Sistema Fotovoltaico Aplicado À Irrigação de Uma Unidade Agrícola de Produção Familiar, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2014.

COELHO, R. F. Estudo dos Conversores Buck E Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

Catálogo Técnico - Condutivímetro Portátil CD203, PHTEK. Journal of Chemical Information and Modeling, 2015.

COOLEY, H.; GLEICK, P. H.; WOLFF, G. DESALINATION , WITH A GRAIN OF SALT A California Perspective.

DANIEL W.HART. Power Electronics, The McGraw-Hill Companies 2011

DOW FILMTEC™ MEMBRANES. DOW FILMTEC™ Membranes, 2015.

ELGENDY, M. A.; ZAHAWI, B.; ATKINSON, D. J. Analysis of the performance of DC photovoltaic pumping systems with maximum power point tracking. 4th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2008), 2008.

ELTAWIL, M. A.; ZHENGMING, Z.; YUAN, L. A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009.

ENRIQUE, J. M. et al. Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies. Solar Energy, , 2007.

ESRAM, T.; CHAPMAN, P. L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007.

FARAHAT, M. A.; METWALLY, H. M. B.; ABD-ELFATAH MOHAMED, A. Optimal choice and design of different topologies of DC–DC converter used in PV systems, at different climatic conditions in Egypt. *Renewable Energy*, 2012.

Catálogo Técnico - Caixas de água. FORTLEV. 2015.

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

GREENLEE, L. F. et al. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*, 2009.

HEE, S.; TANSEL, B. Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment : A review. *Journal of Environmental Management*, 2015.

HENTHORNE, L. Desalination – a critical element of water solutions for the 21st century. *Water*, 2009.

HENTHORNE, L.; BOYSEN, B. State-of-the-art of reverse osmosis desalination pretreatment. *Desalination*, 2015.

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

Instruction Manual - Pressure Sensors, I. E. Sensor de pressao, 2015.

LATTEMANN, S. et al. Global Desalination Situation. In I. C. Escobar, & A. I. Schafer (Eds.), *Sustainable Water for the Future: Water Recycling Versus Desalination* (Vol. 2, pp. 7-38). Oxford, U.K.: Elsevier B.V. 2010.

LIMA, G. D. A. L. Sistema de Dessalinização Por Osmose Reversa Acionado Por Gerador Fotovoltaico Com Conversor De Frequência. *Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO*, 2006.

LOPEZ, R. A. *Energia Solar Para Produção de Eletricidade*. São Paulo: Artliber, 2012.

MILLER, S.; SHEMER, H.; SEMIAT, R. Energy and environmental issues in desalination. Desalination, 2015.

Catalogo Técnico, Termometro digital minipa, 2015.

MOURA, J.P.; MONTEIRO, G.S.; SILVA, J.N.; PINTO, F.A.; FRANÇA, K. P. Aplicações do Processo de Osmose Reversa para o Aproveitamento de Água Salobra do Semi-Árido Nordeste, 2008.

NETO, J. S. P.; CARVALHO, P. C. M.; OLIVEIRA, R. S. H. SISTEMA DE AUTOMAÇÃO , CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS. 2012.

OLIVEIRA, R. S. H. DE, Planta Laboratorial de Dessalinização Via Osmose Reversa Alimentada por Energia Solar Fotovoltaica Com Ou Sem Baterias. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará - UFC, 2011.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Grupo CEPEL – DTE - CRESESB, 2014.

RALUY, G.; SERRA, L.; UCHE, J. Life cycle assessment of MSF, MED and RO desalination technologies. Energy, 2006.

RENEWABLE, I.; AGENCY, E. Water Desalination Using Renewable Energy. n. March, 2012.

REZA REISI, A.; HASSAN MORADI, M.; JAMASB, S. Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013.

RIFFEL, D. B. Unidade de Osmose Reversa Acionada por Energia Solar Fotovoltaica Sem Baterias: Simulação , Projeto e Validação Experimental. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2005.

SANDIA. Desalination and Water Purification Roadmap – A Report of the Executive Committee. DWPR Program Report. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation and Sandia National Laboratories, 2003.

SCHNEIDER, R.P.; TSUTIYA, M. . Membranas Filtrantes para o Tratamento de Água, Esgoto e Água de Reuso. ABES, n. Sao Paulo, 2001.

SEGUEL, J. I. L. Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

Catálogo Técnico - Bombas de Diafragma, SHURFLO, 2015.

TAGHVAEE, M. H. et al. A current and future study on non-isolated DC–DC converters for photovoltaic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.

TENG, T. P. et al. Research and development of maximum power transfer tracking system for solar cell unit by matching impedance. *Renewable Energy*, 2010.

UNESCO. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (WWDR4). 2015.

WHO. European Standards for Drinking-Water. World Health Organization, Geneva. Available from: [http:// whqlibdoc.who.int/publications/European_standards_for_ drinking-water.pdf](http://whqlibdoc.who.int/publications/European_standards_for_drinking-water.pdf) (Acessado em 12 de Junho de 2015). 1970.

APÊNDICE A

Algoritmo MPPT desenvolvido

```

/*****
**
/*      Método Condutancia Incremental e Saida Limitada      */
/*      PIC 18F4550                                          */
/*      Autor: Anderson Marinho e Doglasse Mendonca        */
/*      Universidade Federal do Ceará (UFC)                 */
/*****
**/
#include <SanUSB.h>

float Vsen, Isen; //Leitura dos sensores de tensão e corrente

float V, I, P;    //tensão, corrente e potência do módulo

float Va, Ia, Pa; //tensão, corrente e potência anteriores do módulo

float dV, dI, dP; //variação de tensão, corrente e potência do módulo

//Constante de passo do metodo cond inc

float k = 0.1;

//Resistencias do Sensor de Tensão

int32 R1 = 165000;

int16 R2 = 18000;

// Contador media tensao de saida

int k2 = 0;

//Offset e Resolução do Sendor de Corrente

float offset_senc=2.32;

float resolucao_senc=0.18;

//Relacao tensao no sensor / tensao de saida

float A = 0.3;

float b = 0;    //le a tensao de saida instantanea

```

```

int c = 10; // quantidade de leituras da tensao de saida

float Vo = 0; // armazena a tensao de saida

float Vomax = 12.0; //tensao de saida alvo

float dVo = 0.5;

float Vomed = 0; // tensao de saida media

int16 step = 3; //Passo = .5% do Duty Cicle

//Dat = 0 -> Duty Cicle = 0%

//Dat = 600 -> Duty Cicle = 100%

int16 Dmin = 60; // Duty Cicle mínimo = 10%

int16 Dmax = 480; // Duty Cicle mínimo = 80%

int16 D = 60; // Dat inicial = 240 -> Duty Cicle = 40%

int16 dD; // Variação do pas

void main()
{

//Módulo CCP funcionando como PWM

setup_ccp1(CCP_PWM);

//Configura a frequencia do PWM

setup_timer_2(T2_DIV_BY_4,149,1);

//Configura o Duty Cicle

set_pwm1_duty(D);

//Configura o conversor analogico digital

setup_adc_ports(AN0_TO_AN1|VSS_VDD);

setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);

while (true)

```

```

{
    // Leitura de Tensao de saida do Conversor

    set_adc_channel(2);

    delay_us(100);

    b = read_adc();

    b = (float)b*0.00488758553274; //Vcc/1023

    b = b/A;

    Vo = Vo + b;

    if (k2 == c)
    {
        Vomed = Vo/c;    // tensao de saida media

        // Se tensao maior que Vomax + dVo, diminui o Pwm
        if (Vomed > (Vomax + dVo))
        {
            D = D - step;

            set_pwm1_duty(D);

            //Liga o Led

            //output_high(pin_b7);

            delay_ms(1000);
        }

        // Se tensao entre 10 V e 11 V, nada faz
        else if (Vomed > (Vomax - dVo))
        {
            // Pisca o Led na Frequencia do MPPT (aprox. 5Hz)

```

```

output_high(pin_b7);

delay_ms(20000);

output_low(pin_b7);

delay_ms(20000);

}

// Metodo cond inc

else {

    // Leitura de Tensão do Módulo

set_adc_channel(0);

delay_us(100);

Vsen = read_adc();

Vsen = (float)Vsen*0.00488758553274; //Vcc/1023

V = Vsen*(R1 + R2)/R2;

    // Leitura de Corrente do Módulo

set_adc_channel(1);

delay_us(100);

Isen = read_adc();

Isen = (float)Isen*0.00488758553274; //5A/1023

I = (Isen - offset_senc)/resolucao_senc;

P = V*I;

dV = V - Va;

dI = I - Ia;

dP = P - Pa;

dD = k*abs(dP/dV);

```



```

if (dV==0)
{
    if (dI > 0)

        D = D + dD;

    if (dI < 0)

        D = D - dD;
}
else
{
    if ((dI/dV + Ia/Va) > 0)

        D = D - dD;

    if ((dI/dV + Ia/Va) < 0)

        D = D + dD;
}

if (D > Dmax)

    D = Dmax;

if (D < Dmin)

    D = Dmin;

set_pwm1_duty(D);

//printf("Vmod = %f \n Imod = %f \n Pmod = %f \n", V, I, P);

Ia = I;

Va = V;

Pa = P;

// Pisca o Led na Frequencia do MPPT (aprox. 10Hz)

```

```
output_high(pin_b7);  
delay_ms(50);//500  
output_low(pin_b7);  
delay_ms(10);//100  
}  
Vo = 0;          // reseta Vo e k;  
k2 = 0;  
}  
k2++;  
}  
}
```

APÊNDICE B

Artigos Gerados

- 1. Desenvolvimento de um Seguidor MPPT para um Sistema FV Aplicado a Planta de Dessalinização por Osmose Reversa**
Autor Principal, CBENS 2016

- 2. Technical Feasibility of a Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant Without Batteries for Brackish Water Desalination**
Autor Principal, ICREPQ'16

- 3. Sistema de Seguimento Solar com Seguimento do Ponto de Potência Máxima para Módulos Fotovoltaicos**
Co Autor, CBENS 2016