

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

DOUGLAS BRESSAN RIFFEL

UNIDADE DE OSMOSE REVERSA ACIONADA POR ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA SEM BATERIAS:
Simulação, Projeto e Validação Experimental

Segunda Versão

Alterada as páginas: 66, 97, 98, 100, 103,
107, 108, 109, 112, 115.

FORTALEZA

2005

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

UNIDADE DE OSMOSE REVERSA ACIONADA POR ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA SEM BATERIAS:
Simulação, Projeto e Validação Experimental

Dissertação submetida à
Universidade Federal do Ceará
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

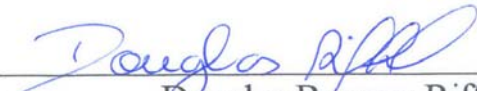
DOUGLAS BRESSAN RIFFEL

FORTALEZA, FEVEREIRO DE 2005.

UNIDADE DE OSMOSE REVERSA ACIONADA POR ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA SEM BATERIAS: Simulação, Projeto e Validação Experimental

DOUGLAS BRESSAN RIFFEL

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos, Linha de Pesquisa em Fontes Renováveis de Energia, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.



Douglas Bressan Riffel


Banca Examinadora:



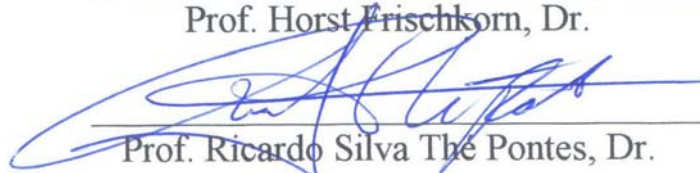
Prof. Paulo Cesar Marques de Carvalho, Dr.



Prof. Naum Fraidenaich, Dr.



Prof. Horst Frischkorn, Dr.



Prof. Ricardo Silva The Pontes, Dr.

Fortaleza, 28 de fevereiro de 2005.

DEDICATÓRIA

**Aos meus pais e à minha irmãzinha,
que sempre me incentivaram a buscar meus sonhos,
mesmo que para isso eles tivessem que se abdicar da minha presença.**

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador e amigo professor Paulo Cesar Marques de Carvalho, pela sua sábia forma de incentivar, observar e acompanhar o desenvolvimento desta dissertação, que, sem dúvida, muito influenciou na minha decisão de adentrar na maravilhosa carreira acadêmica.

Ao pesquisador Demercil de Souza Oliveira Jr, pela essencial ajuda em todas as questões referentes à Eletrônica de Potência. Agradeço, também, ao Ricardo Gildo de Oliveira e ao Samuelson Mesquita pelo apoio no desenvolvimento e na implementação do conversor.

Ao professor Adunias dos Santos Teixeira, Dpto. Engenharia Agrícola, pelos valiosos encontros e debates; além do fundamental empréstimo do sensor de pressão.

À todos os professores e alunos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, em especial aos professores Ricardo Thé Pontes, e Fernando L. M. Antunes, pelas valiosas contribuições dadas a esta pesquisa.

À CAPES, pela preciosa bolsa de mestrado concedida e pelo Portal Periódicos.

Ao Instituto Joazeiro de Desenvolvimento Sustentável, pelo vital empréstimo do motor-bomba.

À ASTEF e aos alunos de Engenharia Elétrica, Renato Sampaio, Levi Gurgel, Ciro Lima, Marcelo Vieira e Mohand Tomé, que muito auxiliaram na confecção e na motivação em implementar a unidade em campo.

Ao Firmino Canafistula, ao Kleber Lima, ao Jancarle Santos, ao Ubirajara Bandeira Jr, ao Jorge Harisson e ao Pedro, pelo apoio técnico em laboratório, estendendo, meus agradecimentos, à todo o GPEC.

Ao professor Horst Frischkorn e aos mestrandos Thorsten Wolf e José Lucena pelos estimados ensinamentos na área de Osmose Reversa.

Ao professor Naum Fraidenaich, pela valiosa revisão deste trabalho.

À minha esposa Clarice Tavares Riffel, pela paciência e amor.

À minha sogra e sua mãe, pelos ensinamentos valiosos da área pedagógica.

Ao professor Luiz Tavares, pela revisão ortográfica.

À todas as demais pessoas, que me ajudaram nesta dissertação, fica o meu muito obrigado!

*"A mente que se abre a uma nova idéia
jamais volta ao seu tamanho original"*
Albert Einstein (1879-1955)

RESUMO

RIFFEL, D.B.; 2005. **Unidade de Osmose Reversa acionada por Energia Solar Fotovoltaica sem Baterias: Simulação, Projeto e Validação Experimental.** Fortaleza. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará.125p.

Este trabalho analisa a interação entre a tecnologia fotovoltaica e a de osmose reversa para o suprimento de água potável através da dessalinização da água salobra oriunda de poços profundos, no semi-árido nordestino brasileiro, sem a utilização de baterias. Observa-se que o abastecimento de água potável e energia elétrica ainda é uma questão não resolvida para uma grande parcela da população mundial. O estado do Ceará, onde se localizou esta pesquisa, reflete bem essa realidade. Uma unidade de osmose reversa acionada por energia solar fotovoltaica sem baterias foi instalada em laboratório. A ausência do banco de baterias proporciona uma redução dos custos e da necessidade de manutenção; ao mesmo tempo em que altera, sobremaneira, a operação da unidade, tornando-a totalmente subordinada às condições instantâneas da radiação solar e da temperatura ambiente. Um método foi desenvolvido para projetar esse tipo de unidades, utilizando, como parâmetros de projeto, dados estatísticos da radiação 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 motor-bomba acoplado diretamente a 2 módulos FV de 55 Wp cada. Para o Sistema 2 foram acrescentados 1 módulo fotovoltaico de mesma potência e um conversor CC-CC abaixador 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 a comparação entre os dois sistemas, realizada em duas situações: com e sem a inserção de uma válvula de alívio no Sistema 1. 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, no caso de diafragma, foram aprovadas para aplicações em unidades de osmose reversa. No entanto, para virem a ser alimentadas via arranjos fotovoltaicos, torna-se necessário a adoção dos seguidores de máxima potência. Salienta-se, ainda, que um acréscimo na capacidade de geração de 50 % pôde melhorar em mais de 90 % a performance da unidade.

Palavras-chave: painel fotovoltaico, osmose reversa, energia solar, dessalinização, seguidor de máxima potência.

ABSTRACT

RIFFEL, D.B.; 2005. **Photovoltaic-powered Reverse Osmosis Plant without Batteries: Simulation, Design and Experimental Validation.** Fortaleza. Thesis (Master degree) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará.125p.

This research analyzes the combination of photovoltaic generation with reverse osmosis desalination of brackish water for the supply of drinking water. Access to potable water and electric power is still an unresolved problem for many people around the world. The State of Ceará, where this research was carried out, represents well this reality. A photovoltaic-powered reverse osmosis plant was installed in laboratory. Through the elimination of the battery, investment costs and maintenance need could be reduced. At the same time, this changes completely the operation of the unit, being totally subordinate to the instantaneous conditions of solar radiation and temperature. A plant design procedure was elaborated that uses solar radiation statistical data and the seasonal availability of water from cisterns as design parameters. Two systems were mathematically modeled and validated by experiment. System 1 uses a motor-pump directly coupled to two 55 Wp photovoltaic modules. System 2 disposes of one additional module and a DC-DC buck converter with maximum power point tracking between the photovoltaic array and the load. The necessity to regulate the power transferred to the load in System 2, led to the development of the converter and the tracking algorithm specially for this application. The simulations allowed the comparison between the two systems in two conditions: with and without a pressure relief valve coupled to system 1. Results shown that the System 2 has always a better performance, as a daily permeate water production, time operation, specific consumption and in the relationship photovoltaic installed capacity per produced water liter. It was observed that volumetric pumps, of the diaphragm type in the case, are suitable for reverse osmosis applications. But, when combined with a photovoltaic array, maximum power point tracking is necessary. It is important to state that with a 50 % increment in generation capacity a 90% increase in permeate production is achieved.

Key-words: photovoltaic generation, reverse osmosis, brackish water desalination, solar energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Complementaridade sazonal entre o regime pluviométrico e a energia solar no estado do Ceará	1
Figura 1.2 – Processos de osmose, equilíbrio osmótico e osmose reversa.....	4
Figura 2.1 – Dessalinizadores: Capacidade instalada no mundo por tipo de tecnologia	9
Figura 2.2 – Secção esquemática da membrana de osmose reversa em espiral.....	11
Figura 2.3 - Vista noturna da Terra a partir de imagens de satélite	15
Figura 2.4 – Evolução da produção mundial de módulos FV	17
Figura 2.5 – Campo elétrico (E), junção PN	20
Figura 2.6 – Curva característica da junção PN	22
Figura 2.7 – Circuito equivalente da célula solar.....	23
Figura 2.8 – Fatores que influenciam a curva característica dos módulos fotovoltaicos...	24
Figura 2.9 – Curva característica I x V, com definição do FF, e a curva de potência do módulo FV	25
Figura 2.10 – Configuração básica da unidade OR-FV pioneira no Brasil	27
Figura 2.11 – Operação da unidade OR-FV com baterias nos dias 14 e 15/02/2001	29
Figura 3.1 – Médias a cada 30 s da radiação solar em Fortaleza, dia 17/03/04	39
Figura 3.2 – Energia diária média entre abril de 2003 a março de 2004 em Fortaleza.....	42
Figura 3.3 – Energia diária média para meses comparativos em Fortaleza	42
Figura 3.4 – Período contínuo de operação máximo em setembro de 2001 em Fortaleza	42
Figura 3.5 – Período contínuo máximo em fevereiro de 2004 em Fortaleza.....	43
Figura 3.6 – Histograma de radiação solar em setembro de 2003 e 2001 em Fortaleza..	43
Figura 3.7 – Histograma de radiação solar em fevereiro de 2004 e 2001 em Fortaleza...	43
Figura 3.8 – Gráfico do período de funcionamento acumulado em setembro de 2001.....	45
Figura 3.9 – Gráfico do período de funcionamento acumulado em fevereiro de 2004.....	45
Figura 3.10 – Esquema hidráulico da unidade de osmose reversa.....	47
Figura 3.11 – Esquema elétrico da unidade OR-FV desenvolvida.....	48
Figura 3.12 – Característica construtiva da bomba de diafragma	50
Figura 3.13 – Vistas superior, lateral e frontal do motor-bomba utilizado	50
Figura 3.14 – Medições do osciloscópio da corrente de alimentação do motor-bomba....	52
Figura 3.15 – Célula, módulo e arranjo fotovoltaico	54
Figura 3.16 - Conversor CC-CC abaixador com a chave fechada	56
Figura 3.17 - Conversor CC-CC abaixador com a chave aberta.....	56
Figura 3.18 – Formas de onda típicas no modo de condução contínua.....	57
Figura 3.19 – Circuito da chave PWM de Vorpérian para perturbações d(s)	63

Figura 3.20 – Circuito do conversor CC-CC com a chave PWM para análise CA	64
Figura 3.21 – Tempo de resposta do sistema de controle	66
Figura 3.22 – Fluxograma do algoritmo MTF desenvolvido	68
Figura 3.23 – Local das raízes e diagrama de Bode do conversor com o compensador..	70
Figura 3.24 – Circuito do compensador usado no controle da tensão de entrada	70
Figura 3.25 – Sistema de Aquisição de Dados.....	72
Figura 3.26 – Sensor de Vazão utilizado.....	73
Figura 3.27 – Piranômetro modelo CM3 utilizado	74
Figura 4.1 – Diagrama de blocos da Geração FV	75
Figura 4.2 – Diagrama de blocos do compensador de saída.....	76
Figura 4.3 – Diagrama de blocos do compensador de entrada.....	76
Figura 4.4 – Diagrama de blocos do conversor CC-CC abaixador	77
Figura 4.5 – Diagrama de blocos do motor CC	78
Figura 4.6 – Diagrama de blocos do motor CC modificado.....	78
Figura 4.7 – Diagrama de blocos do motor-bomba	79
Figura 4.8 – Curva característica da bomba de diafragma à tensão nominal	79
Figura 4.13 – Relação encontrada entre a corrente e a pressão	80
Figura 4.14 – Diagrama de blocos da membrana de OR.....	80
Figura 4.15 – Pressão de alimentação x vazão de permeado	81
Figura 4.16 – Vazão de alimentação x salinidade do permeado.....	81
Figura 4.17 – Validação do modelo da membrana de OR: vazão do permeado.....	82
Figura 4.18 – Validação do modelo da membrana de OR: salinidade do permeado	82
Figura 4.19 – Diagrama de blocos da simulação do conversor CC-CC abaixador	83
Figura 4.20 – Resposta do conversor CC-CC a um degrau na corrente de alimentação .	84
Figura 4.21 – Resposta do conversor CC-CC a um degrau na carga.....	84
Figura 4.22 – Resposta do conversor CC-CC a um degrau na carga.....	84
Figura 4.23 – Conversor CC-CC abaixador desenvolvido.....	85
Figura 4.24 – Validação do modelo: valores simulados (com marcas) e medidos.....	85
Figura 4.25 – Controle de entrada: medições relativas ao incremento de 1 módulo FV...	86
Figura 4.26 – Controle de entrada: medições relativas à desconexão de 1 módulo FV ...	86
Figura 4.27 – Controle de saída: medições da desconexão/conexão de 1 módulo FV	87
Figura 4.28 – Unidade de OR-FV desenvolvida	88
Figura 4.29 – Sistema 1: diagrama de blocos da unidade OR-FV sem SMP.....	89
Figura 4.30 – Sistema 1: Pressão e vazão de alimentação e permeado - 30/11/04.....	90
Figura 4.31 – Sistema 1: Potência útil medida e calculada e no PMP - 30/11/04.....	91
Figura 4.32 – Sistema 1: Consumo específico - 30/11/04.....	91

Figura 4.33 – Sistema 1: Pressão; Salinidade e vazão do permeado - 30/11/04.....	92
Figura 4.34 – Sistema 1: Taxa de recuperação - 30/11/04	93
Figura 4.35 – Sistema 2: diagrama de blocos da unidade usando o SMP	94
Figura 4.36 – Sistema 2: Pressão e vazão medidas dia 19/11/04 e calculadas (marcas) 95	
Figura 4.37 – Sistema 2: Pressão e vazão medidas dia 04/12/04 e calculadas (marcas) 96	
Figura 4.38 – Sistema 2: Validação da potência útil entregue à carga - 04/12/04	97
Figura 4.39 – Sistema 2: Potência gerada, útil e no PMP - 04/12/04.....	97
Figura 4.40 – Sistema 2: Consumo específico e pressão de alimentação - 04/12/04.....	98
Figura 4.41 – Sistema 2: Vazão de permeado, taxa de recuperação e pressão.....	99
Figura 4.42 – Sistema 2: Vazão de permeado, salinidade e pressão - 04/12/04	99
Figura 4.43 – Sistema 1: Pressão e vazão de alimentação e permeado - 30/11/04	101
Figura 4.44 – Sistema 2: Pressão e vazão de alimentação e permeado - 30/11/04	102
Figura 4.45 – Comparação 1: Taxa de recuperação - 30/11/04.....	102
Figura 4.46 – Sistema 1 modificado: Pressão e vazão de alimentação e permeado.....	105
Figura 4.47 – Sistema 2: Pressão e vazão de alimentação e permeado	106
Figura 4.48 – Sistema 1 modificado: Potência útil e no PMP - 27/11/04.....	106
Figura 4.49 – Sistema 2: Potência gerada, útil e no PMP - 27/11/04.....	107
Figura 4.50 – Comparação 2: Potência útil - 27/11/04	108
Figura 4.51 – Comparação 2: Pressão de alimentação e vazão de permeado.....	108
Figura 4.52 – Comparação 2: Consumo específico - 27/11/04	109
Figura 4.53 – Comparação 2: Salinidade do permeado - 27/11/04.....	110
Figura 4.54 – Comparação 2: Taxa de recuperação - 27/11/04.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Experiências mundiais de unidades OR-FV: dados operacionais.....	26
Tabela 4.1 – Resultados do dia 30/11/04: índices de operação.....	93
Tabela 4.2 – Resultados do dia 04/12/04: índices de operação.....	100
Tabela 4.3 – Resultados do dia 30/11/04: índices de operação.....	103
Tabela 4.4 – Resultados do dia 27/11/04: índices de operação.....	112

LISTA DE ACRÔNIMOS

A/D	conversor analógico-digital
ABAS	Associação Brasileira de Águas Subterrâneas
AM	massa de ar
ASTEF	Associação Técnico-Científica Engenheiro Paulo Frontin
CC-CC	corrente contínua – corrente contínua
COELCE	Companhia Energética do Ceará
CP	capacitância parasita (algoritmo usado em SMP)
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
FF	fator de forma da curva característica da célula FV
FV	arranjo fotovoltaico
GPEC	Grupo de Processamento e Controle
GTZ	Sociedade Alemã para Cooperação Técnica
INC	incremento na condutância (algoritmo usado em SMP)
MME	Ministério de Minas e Energia
MTF	melhor tensão fixa (algoritmo usado em SMP)
OR	osmose reversa
OR-FV	unidade de osmose reversa alimentada por painel fotovoltaico
P&O	perturbação e observação (algoritmo usado em SMP)
PMP	ponto de máxima potência
PWM	<i>Pulse Width Modulated</i>
SAD	sistema de aquisição de dados
SMP	seguidor de máxima potência
STD	sólidos totais dissolvidos
TC	tensão constante (algoritmo usado em SMP)

LISTA DE SÍMBOLOS

δ_m	espessura efetiva da membrana
γ	peso específico
$\Delta\pi$	pressão osmótica
$\Delta I_{\text{máx}}$	ondulação na corrente de saída
ΔP	perda de carga
ΔV_0	ondulação na tensão de saída
ΔV_e	ondulação na tensão de entrada
μ	viscosidade absoluta da água
b	constante da pressão osmótica
c	velocidade da luz no vácuo [$3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$]
d, D	razão cíclica
E	força contra-eletromotriz [V]
E_0	carga elementar de um elétron [$1,6021 \times 10^{-19} \text{ As}$]
f	porosidade da membrana
F	freqüência de chaveamento [Hz]
g	aceleração da gravidade [m.s^{-2}]
h	constante de Planck [$6,6 \times 10^{-34} \text{ Ws}^2$]
H	altura manométrica [m]
I_0	corrente de saída do conversor CC-CC
I_a	corrente de armadura (requerida pelo motor-bomba)
I_{C0}	corrente que passa pelo capacitor de saída
I_{CC}	corrente de curto-circuito
I_{CC}	corrente de curto-circuito da célula
I_{Ce}	corrente no capacitor de entrada
I_E	corrente gerada pela fonte ou de entrada do conversor CC-CC
I_L	corrente que passa pelo indutor
I_{MP}	e corrente de máxima potência
I_{PH}	fotocorrente
J	inércia total do motor [kg.m^2]
J	densidade de corrente
j_0	densidade de corrente de saturação do diodo
j_{PH}	densidade de portadores de cargas livres
k	constante de Boltzmann [$1,3854 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$]
K_m	constante do motor [N.m/A]
ρ	densidade da água [kg.m^{-3}]
P_a	pressões de alimentação [kPa]
P_f	pressão de filtração [kPa]
P_{FV}	potência total do arranjo FV
$P_{\text{mín}}$	potência mínima para o sistema operar
P_{ot_e}	potência elétrica absorvida pelo motor-bomba [W]
P_p	pressão de permeado [kPa]
P_r	pressões do concentrado [kPa]
$q(t)$	função que representa o estado da chave CH
Q_a	vazão da água de alimentação [L/min]
Q_p	vazão de água permeada pela membrana [L/min]
R_a	resistência de armadura
R_{ad}	radiação solar global

$Rad_{\text{mín}}$	radiação solar global mínimo [$W.m^{-2}$]
$Rad_{\text{padrão}}$	radiação solar global padrão [$1000 W.m^{-2}$]
r_p	raio médio dos poros
r_P	resistência paralelo
r_S	resistência série
R_{se}	resistência série equivalente
T	temperatura da célula [K]
T	período de chaveamento
TaC	temperatura ambiente
T_{carga}	torque carga [N.m]
T_e	torque elétrico [N.m]
$T_{\text{móduloFV}}$	temperatura no módulo FV
t_T	período de tempo em que a chave CH permanece fechada
T_{vazio}	torque a vazio [N.m]
V_0	tensão de entrada do motor ou de saída do conversor CC-CC
V_C	tensão da célula [V]
V_{CO}	tensão de controle da realimentação da saída (carga)
V_{Ce}	tensão do capacitor de entrada
V_{Ci}	tensão de controle da malha de tensão de entrada (fonte)
V_d	queda de tensão sobre diodo
V_e	tensão sob os terminais do módulo FV (entrada do conversor)
V_{gap}	diferença de potencial entre a banda de condução e a de valência
V_{MP}	tensão de máxima potência
V_{OC}	tensão de circuito aberto
V_{OC}	tensão de circuito aberto
V_{ref}	tensão de referência
V_S	fluxo específico de sal
V_W	vazão específica de água
W_a	salinidade da água de alimentação [$mg.L^{-1}$]
w_m	concentração de sais na superfície da membrana
W_p, w_p	salinidade da água do permeado [$mg.L^{-1}$]
Y	rendimento da unidade de OR
η	eficiência
η_p	rendimento total do motor-bomba
Θ	fator de tortuosidade do poro
λ	comprimento de onda
Ω	velocidade angular [rad/s]

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas.....	xi
Lista de Acrônimos.....	xii
Lista de Símbolos.....	xiii
1.Introdução	1
1.1. Objetivos.....	5
1.1.1. Objetivos gerais	5
1.1.2. Objetivos específicos	5
1.2. Metodologia geral.....	6
1.3. Estrutura do trabalho.....	7
2.Unidades de osmose reversa acionadas por energia solar fotovoltaica.....	8
2.1. A dessalinização da água por osmose reversa.....	8
2.1.1. Atualidades da dessalinização mundial	8
2.1.2. Fundamentos da tecnologia.....	9
2.1.3. Parâmetros característicos das membranas.....	11
2.1.4. Operação de sistemas de membranas	12
2.1.5. A necessidade do pré-tratamento	13
2.1.6. Disposição do concentrado.....	14
2.2. Geração Fotovoltaica	15
2.2.1. Fontes de energia, desenvolvimento e meio ambiente.....	15
2.2.2. Histórico da geração fotovoltaica	16
2.2.3. A radiação solar	17
2.2.4. Instrumentos de medidas solarimétricas.....	18
2.2.5. Efeito fotovoltaico da junção PN	19
2.2.6. Curva característica de tensão e corrente da junção PN.....	21
2.2.7. Modelo elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica	22
2.2.8. Parâmetros que influenciam a curva característica das células FV ..	23
2.2.9. Características elétricas das células fotovoltaicas	24
2.3. Experiências mundiais em unidades OR-FV.....	26
3.Projeto de unidades OR-FV sem baterias	36
3.1. Metodologia do projeto.....	36
3.1.1. Estatística da radiação solar média diária	40
3.1.2. Estatística dos períodos contínuos máximos diários	41
3.1.3. Histogramas de radiação dos meses de fevereiro e setembro	44
3.1.4. Estatística do período de funcionamento acumulado no mês.....	44
3.1.5. Análise dos gráficos para aplicação em unidades OR-FV	46
3.2. Componentes principais da unidade OR-FV desenvolvida.....	47
3.2.1. Motor-bomba de diafragma.....	48
3.2.2. Membrana de osmose reversa	52
3.2.3. Módulos fotovoltaicos	53
3.3. Conversor CC-CC abaixador (Buck).....	55
3.3.1. Introdução às fontes chaveadas	55
3.3.2. Princípio de funcionamento	55
3.3.3. Projeto do conversor CC-CC abaixador.....	57

3.3.4.	Modelo espaço de estados instantâneos do conversor CC-CC.....	60
3.3.5.	Modelo do conversor CC-CC, usando o método da chave PWM	63
3.4.	<i>Sistema de controle da unidade OR-FV.....</i>	<i>66</i>
3.4.1.	Seguidor de máxima potência.....	67
3.4.2.	Algoritmo desenvolvido: melhor tensão fixa - MTF	68
3.4.3.	Projeto do circuito de controle.....	69
3.5.	<i>Sistema de medição.....</i>	<i>71</i>
3.5.1.	Sistema de aquisição de dados	72
3.5.2.	Sensor de vazão	73
3.5.3.	Sensor de pressão.....	73
3.5.4.	Piranômetro	73
3.5.5.	Divisores resistivos e resistores Shunt	74
3.5.6.	Sensor de temperatura ambiente.....	74
4.	<i>Validação teórico-experimental</i>	<i>75</i>
4.1.	<i>Apresentação dos blocos principais.....</i>	<i>75</i>
4.1.1.	Geração FV.....	75
4.1.2.	Compensadores de entrada e saída.....	75
4.1.3.	Modelo do conversor CC-CC abaixador	77
4.1.4.	Motor-bomba CC	77
4.1.5.	Membrana de osmose reversa	80
4.2.	<i>Validação do conversor CC-CC abaixador</i>	<i>83</i>
4.3.	<i>Validação da unidade OR-FV sem baterias.....</i>	<i>87</i>
4.3.1.	Sistema 1: unidade OR-FV sem SMP.....	89
4.3.2.	Sistema 2: unidade OR-FV usando o SMP.....	93
4.4.	<i>Comparação das simulações.....</i>	<i>101</i>
4.4.1.	Comparação 1: modelos 1 e 2.....	101
4.4.2.	Comparação 2: modelo 1 utilizando válvula de alívio	104
5.	<i>Considerações finais.....</i>	<i>113</i>
5.1.	<i>Conclusões</i>	<i>113</i>
5.2.	<i>Especificidades locais.....</i>	<i>116</i>
5.3.	<i>Sugestões para trabalhos futuros</i>	<i>116</i>
	<i>Referências Bibliográficas.....</i>	<i>117</i>
	<i>APÊNDICE A - Biografias e as Publicações.....</i>	<i>123</i>

1. INTRODUÇÃO

*"Sempre houve o suficiente no mundo para todas as necessidades humanas;
nunca haverá o suficiente para a cobiça humana"*

*Mohandas Karamchand "Mahatma" Gandhi
Líder pacifista indiano (1869-1948)*

A disponibilidade de água potável em todo o mundo vem diminuindo, de forma a merecer atenção especial de entidades internacionais e da comunidade científica. Segundo estudo publicado pela UNESCO (2003), estima-se que na metade deste século, de 2 a 7 bilhões de pessoas, em mais de quarenta países, sofrerão de escassez de água. Esse assunto vem sendo debatido nos últimos anos em todo o mundo e alerta a humanidade para a necessidade da procura de novas formas de suprir a demanda de água potável. Embora o problema seja previsto tanto em países industrializados como em países em desenvolvimento, os efeitos da falta de água são mais sentidos nos últimos, onde a infra-estrutura é mais deficiente.

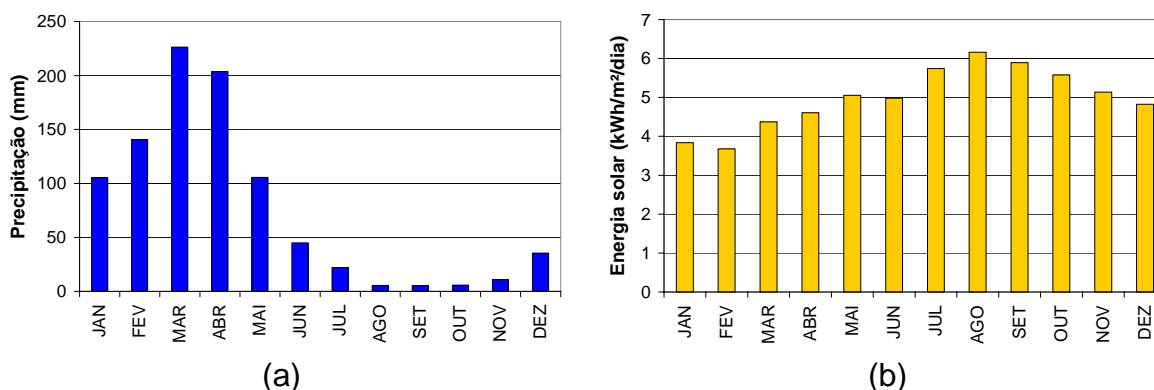


Figura 1.1 – Complementaridade sazonal entre o regime pluviométrico e a energia solar no estado do Ceará

Fonte: FUNCEME, 2002

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 950.000 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. Para exemplificar, a Figura 1.1a mostra a precipitação média mensal no período 1974-2002 no Ceará, um dos estados nordestinos afetados. Essa figura revela que cerca de 85 % da chuva anual no território cearense ocorre durante o período de janeiro a maio. A pluviosidade prefere as regiões costeiras, deixando o

sertão com uma quantidade ínfima de água no período de junho a dezembro (FUNCEME, 2002). Somado a isso, ainda existe a variabilidade pluviométrica interanual, podendo ocorrer estiagens acentuadas, onde a população sertaneja, tipicamente carente, não consegue o mínimo de alimentos para o sustento no interior. Paralelamente, essa região apresenta uma temperatura média anual de 28 °C e um elevado potencial solar de aproximadamente 2000 kWh.m⁻².

A distribuição da população no sertão se caracteriza, em grande parte, por comunidades pequenas e dispersas, onde as famílias não possuem o mínimo de infra-estrutura, como energia elétrica, escolas, postos de saúde ou saneamento básico. Essa situação acarreta que a pouca água presente na região, em sua maioria salobra, seja transportada todo dia por mulheres ou crianças, a pé ou com auxílio de animais, de açudes, poços rasos ou cacimbas em leitos de rios secos até suas casas, compreendendo percursos de as vezes 6 km de distância (COELCE, 1995). Em períodos de maior estiagem, o abastecimento de água potável é feito, principalmente, através de carros-pipa. Como observa Pereira (2001), isso constitui um instrumento freqüente de manobra para fins eleitorais. E, ainda, as comunidades reclamam da qualidade da água distribuída através desse tipo de abastecimento.

De acordo com estudos realizados pela Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), pelo menos 19,5 bilhões de metros cúbicos de água poderiam ser extraídos por ano do subsolo nordestino sem o risco de esgotamento dos mananciais. No entanto, os poços perfurados na rocha cristalina, encontrada em cerca de 788.358 km², apresentam pouca vazão, grande profundidade e, na maioria das vezes, produzindo água considerada salobra pela resolução Conama n° 20 de 1986, que define o patamar máximo de 500 mg.L⁻¹ de sólidos totais dissolvidos (STD) para considerar a água doce, e entre 500 e 3000 mg.L⁻¹ para considera-la salobra, acima disso é salgada. Para cumprir sua função no corpo humano, a água deve possuir sais. Não deve, porém, ultrapassar certo limite; caso isso ocorra, prejuízos irreparáveis são causados à saúde humana. Nesse contexto, situa-se o conceito de água “boa para consumo” especificamente para este trabalho, que seria o mesmo de água doce, não levando em consideração outros parâmetros igualmente importantes como: microbiológicos,

metais pesados e agrotóxicos (fixados na Portaria 518 de 25 de março de 2004 do Ministério da Saúde).

Um fato observado é que determinadas populações, devido à falta de alternativas, são obrigadas ao consumo de água com níveis de salinidade acima dos padrões recomendados. Esse problema se agrava, quando se analisa a conclusão de Monteiro (2002): “existe [uma] forte relação entre os índices socioeconômicos e o teor de sal da água que abastece a população [do interior do Ceará]”, isto é, quanto mais pobre for a localidade, maior a possibilidade da água ser imprópria ao consumo humano.

Estudo realizado pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2003), intitulado “Projeto cadastro da infra-estrutura hídrica do Nordeste”, cadastrou todos os poços, fontes naturais, barragens subterrâneas e reservatórios superficiais significativos em uma área de 225.000 km² da região semi-árida brasileira. Os resultados preliminares mostraram que 55% dos poços se encontram em funcionamento, 34% estão paralisados devido à salinidade e/ou não foram instalados por falta de energia elétrica e os 11% restantes foram abandonados, por estarem secos ou obstruídos. Desse universo foram coletadas 15.338 amostras de água e realizada medida da condutividade elétrica, resultando que aprox. 75% dos poços apresentam sólidos totais acima de 500 mg.L⁻¹, ou seja, produzem água inadequada ao consumo humano. O estudo revela ainda que mais de 70% dos sistemas de bombeamento de água acionados por módulos fotovoltaicos instalados no Nordeste encontram-se em operação. Um projeto neste setor foi realizado entre a GTZ alemã (Sociedade Alemã para Cooperação Técnica) e a COELCE (Companhia Energética do Ceará), através do qual foram instaladas 15 bombas fotovoltaicas para poços profundos em um raio de cerca 150 km em torno de Fortaleza. Porém, a grande dificuldade foi encontrar poços não salinizados (COELCE, 1995). Uma das opções para dessalinizar essa água salobra é através de membranas de osmose reversa (OR).

O processo de osmose reversa consiste, basicamente, no bombeamento de água com alta concentração de sais contra membranas seletivas; sendo necessário uma pressão superior à pressão osmótica, $\Delta\pi$, para reverter o processo natural da osmose, como pode ser visto na Figura 1.2. Essas membranas permitem o fluxo da água através delas, ao mesmo tempo em que

barram a passagem da maior parte dos sais, assim como os vírus e bactérias presentes na água de alimentação.

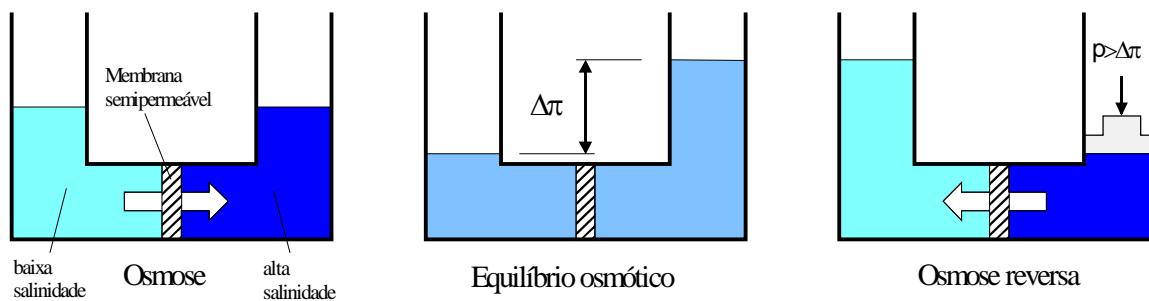


Figura 1.2 – Processos de osmose, equilíbrio osmótico e osmose reversa

A complementaridade sazonal entre o regime pluviométrico e a energia solar, mostrada na Figura 1.1, aponta para a racionalização dos recursos locais, quando se utiliza a energia solar na produção de água potável. Observa-se que o mês com o menor índice pluviométrico possui o maior potencial de energia solar. Isso indica uma adequação da utilização da tecnologia fotovoltaica (FV) para o acionamento de unidades de dessalinização de água.

A instalação de pequenos dessalinizadores em comunidades isoladas pode ajudar a amenizar os problemas da seca no Nordeste brasileiro. Esses locais, devido a dificuldades de manutenção, requerem uma instalação confiável, simples e robusta. A tecnologia FV apresenta todas essas características e, ainda, se torna viável, técnica e economicamente, em locais sem acesso à rede elétrica convencional. Essa tecnologia é apontada como uma das mais confiáveis formas de geração de energia elétrica, fato comprovado pelo extenso período de garantia fornecido pelos fabricantes, 25 anos. Um motor-bomba de corrente contínua (CC) adequa-se à instalação proposta, por dispensar o uso de inversor no acoplamento arranjo FV/carga.

Uma pesquisa, realizada por Callado (2003), avaliou o desempenho dos dessalinizadores instalados em municípios cearenses, sob os aspectos econômicos e sociais. A análise utilizou dados primários a partir da aplicação de questionários em 130 comunidades que utilizam esses equipamentos. As variáveis identificadas que influenciam no desempenho dos dessalinizadores foram: marca (fabricante), capacidade instalada, salinidade do poço e formação do operador. O estudo constatou também que quase a metade das unidades de

OR instaladas no sertão encontrava-se com problemas técnicos ou mesmo parada.

A reduzida vida útil da membrana, inferior a 5 anos, unida à falta de uma manutenção eficiente, intensificada pela dificuldade de acesso, constituem as principais razões do fracasso desses projetos no semi-árido nordestino. Nas unidades de osmose reversa acionadas por módulos fotovoltaicos (OR-FV), a utilização de baterias agrava ainda mais esses problemas. Thomson et al. (2001) apontaram que todas as vantagens da tecnologia fotovoltaica, citadas anteriormente, seriam anuladas com a utilização de baterias chumbo-ácido em unidades OR-FV, porque essas, particularmente em regiões de clima quente, apresentam baixa eficiência (75 %) e reduzida vida-útil (2 anos). Por isso, optou-se pela construção de sistemas OR-FV sem baterias, buscando reduzir o custo e a necessidade de manutenção, mantendo a robustez e a confiabilidade, uma vez que se trata de água para o consumo humano.

O caráter inovador do presente estudo é confirmado pelo fato de não haver no Brasil experiências no setor. A unidade de osmose reversa analisada opera com pressão variável e é acionada por módulos fotovoltaicos sem a utilização de baterias. A ausência das baterias traz como vantagens a redução do custo e da necessidade de manutenção, fatores de importância para a viabilidade de projetos no semi-árido nordestino.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivos gerais

A presente dissertação se propõe a desenvolver uma tecnologia apropriada para a dessalinização da água salobra oriunda de poços profundos no semi-árido nordestino.

1.1.2. Objetivos específicos

- a) analisar a operação das unidades de osmose reversa acionada por energia solar fotovoltaica sem baterias;
- b) reduzir o custo e a necessidade de manutenção, eliminando a necessidade das baterias;

- c) dessalinizar a água salobra oriunda de poços profundos no semi-árido nordestino;
- d) utilizar a variação natural da fonte energética como estratégia de operação da unidade, procurando não comprometer a vida-útil das membranas de OR;
- e) experimentar e validar os dois sistemas de unidades OR-FV propostos que foram matematicamente modelados.

1.2. METODOLOGIA GERAL

O objeto de estudo consiste na interação entre a tecnologia fotovoltaica e a de osmose reversa para a dessalinização de águas salobras, oriundas de poços profundos, no semi-árido nordestino, sem utilizar baterias. Nesse universo se encontra este trabalho científico que se propõe a estudar o campo de pesquisa multidisciplinar da área energética, envolvendo conceitos técnicos, da engenharia elétrica e hidráulica, além de, sutilmente, tampouco menos importante, abranger a relevância social e ambiental das tecnologias adotadas.

A condução desta pesquisa empregou três estratégias distintas: inicialmente, fez-se uma investigação do estado da arte mundial acerca do uso da energia solar fotovoltaica no acionamento de unidades de osmose reversa, em seguida, dois sistemas foram matematicamente modelados e, finalmente, realizou-se uma validação teórico-experimental em campo.

O estado da arte foi pesquisada, utilizando publicações científicas especializadas na área solar fotovoltaica, como a *Solar Energy, Renewable Energy* e a *Progress in Photovoltaics*, na área de dessalinização, como a *Desalination*, além de congressos e encontros afins. Nesta tarefa, notou-se uma necessidade de valorização e criação de novas revistas nacionais voltadas para os temas científicos.

Dois sistemas foram matematicamente modelados e implementados no *Matlab - Simulink*[®]: o primeiro, acoplando diretamente os módulos fotovoltaicos ao motor-bomba, e o segundo, utilizando um conversor CC-CC nesse acoplamento. Algumas vantagens e desvantagens foram comparadas e confirmadas em campo, onde os sistemas puderam ser validados e as conclusões, ratificadas.

A principal estratégia de apresentação dos resultados foi a forma gráfica, pois, como será evidenciado, a utilização unicamente de índices médios para qualificar os resultados não é representativa.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi organizado ao longo de cinco capítulos, sendo o primeiro a introdução e o último a conclusão. O segundo capítulo é constituído por uma revisão bibliográfica das tecnologias de osmose reversa e de geração fotovoltaica. O capítulo se encerra com um levantamento mundial do estado da arte da união dessas duas tecnologias. O terceiro capítulo aborda um método desenvolvido para se projetar unidades OR-FV sem baterias, utilizando dados estatísticos da radiação solar. Nesse capítulo ainda se esmiúçam os componentes utilizados na unidade desenvolvida, especificando-os e detalhando matematicamente os principais elementos. O quarto capítulo traz a validação teórico-experimental dos dois sistemas de unidades OR-FV que foram matematicamente modelados.

2. UNIDADES DE OSMOSE REVERSA ACIONADAS POR ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

*"Se você rouba idéias de um autor, é plágio.
Se você rouba de muitos autores, é pesquisa."*

*Wilson Mizner
Dramaturgo americano (1876-1933)*

2.1. A DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA POR OSMOSE REVERSA

A dessalinização da água, há tempos, deixou de pertencer ao mundo dos sonhos para se tornar uma realidade. Diversas regiões do planeta que convivem diariamente com a falta de água utilizam variadas técnicas para separar o sal da água. Algumas utilizam processos térmicos que envolvem mudança de fase, seja a evaporação ou o congelamento, outros, mais recentemente, permeiam a água através de membranas. Dentre os processos que utilizam a separação por membranas, a osmose reversa evoluiu tanto, que hoje domina o setor de dessalinização, não só para potabilizar a água em locais de escassez, como para diversos setores industriais. Destacam-se, entre as principais aplicações industriais: o setor alimentício (refrigerantes e sucos) e as termelétricas. A vasta aplicabilidade, desde o reuso de águas até a produção de água ultrapura, unida às características como a modularidade e a baixa demanda energética, formam as principais razões da rápida difusão do processo de osmose reversa.

2.1.1. Atualidades da dessalinização mundial

A dessalinização começou a ser utilizada regularmente há uns 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 para produzir grandes quantidades de água potável em diversas aplicações.

Existem hoje, basicamente, duas tecnologias distintas em processos de dessalinização, a térmica e as membranas. A Figura 2.1 mostra a curva de tendência dessas duas tecnologias no contexto mundial. A tecnologia que utiliza processos térmicos, envolvendo a mudança de estado físico, está perdendo mercado para as membranas seletivas, devido, basicamente, à escala de produção e à evolução da tecnologia. Para se ter uma idéia, em 1991, uma instalação de OR em Santa Bárbara, com capacidade instalada de aprox. 22 mil

m³ por dia, produzia água a um custo de US\$ 2,1 m⁻³. Hoje, uma unidade em Singapura de 142 mil m³ por dia produz água a um custo de US\$ 0,43 m⁻³ (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2004).

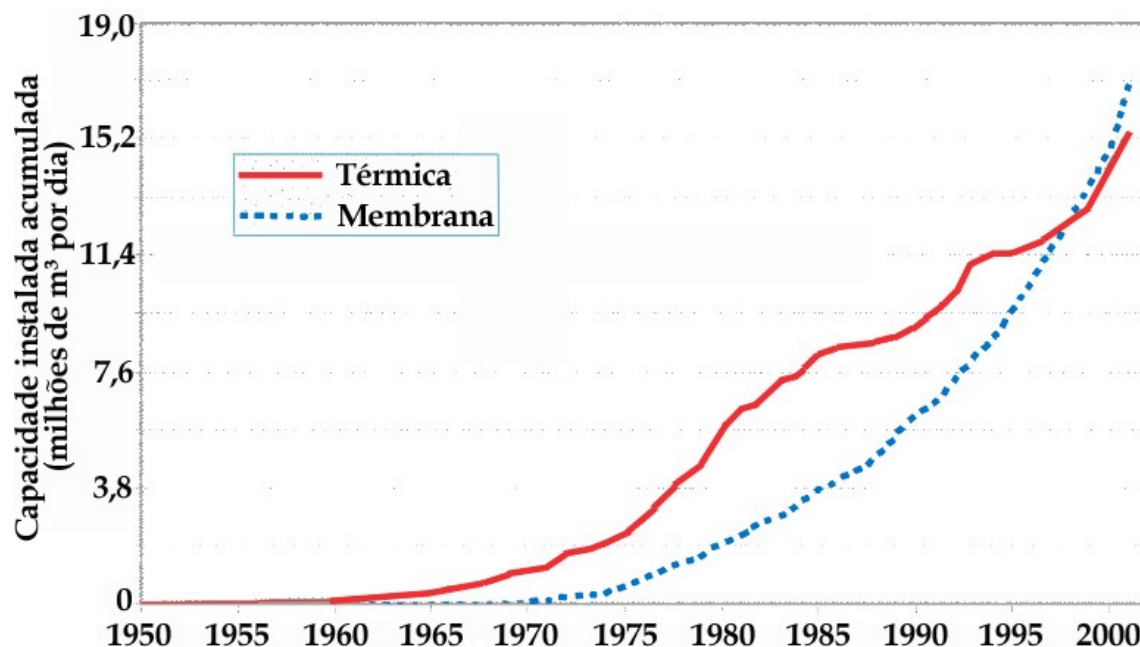


Figura 2.1 – Dessalinizadores: Capacidade instalada no mundo por tipo de tecnologia
Fonte: WANGNICK, 2002 apud NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2004

2.1.2. Fundamentos da tecnologia

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

A tecnologia utilizada na síntese de filmes de porosidade controlada é dominada pelos polímeros orgânicos, podendo-se destacar três gerações distintas de membranas (SCHNEIDER e 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 2.2. 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.

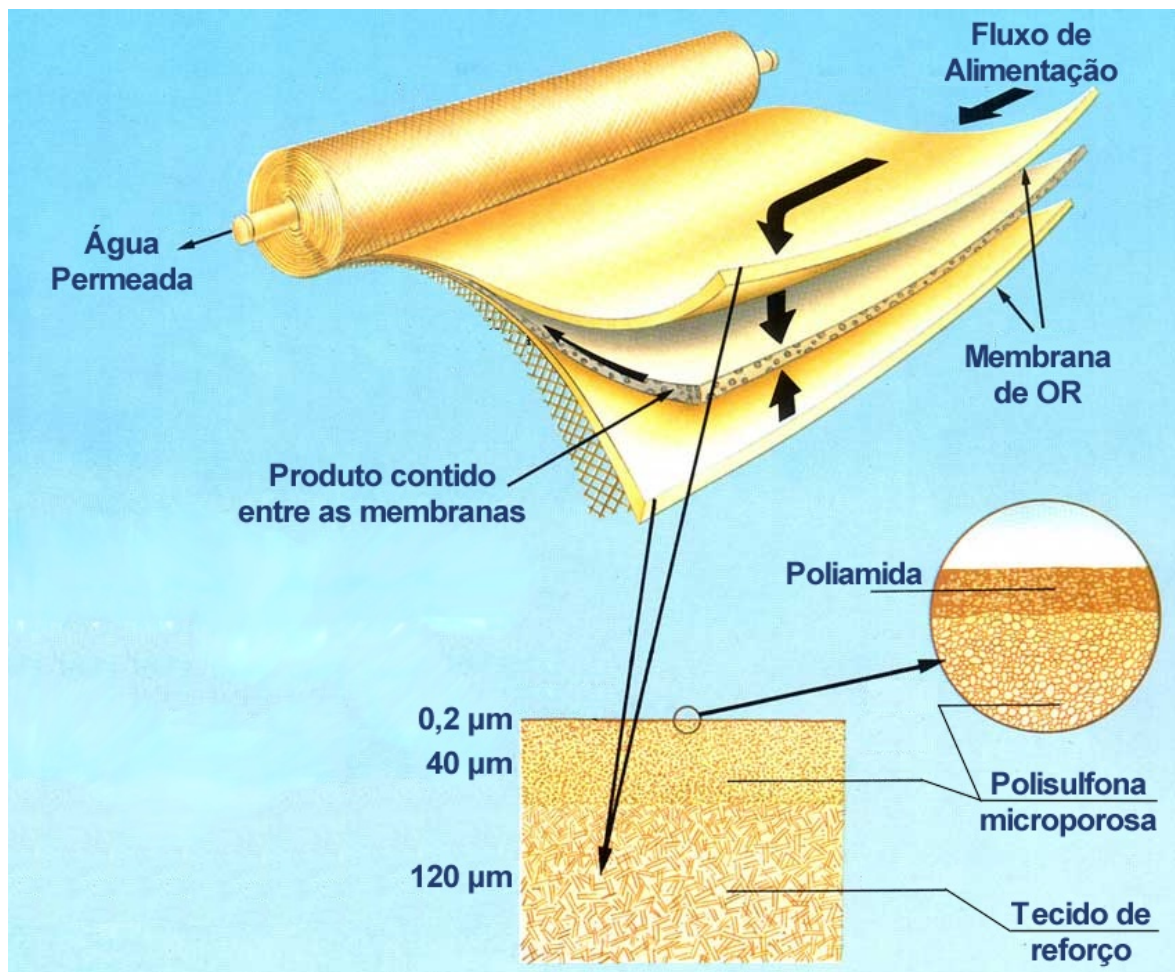


Figura 2.2 – Secção esquemática da membrana de osmose reversa em espiral
Fonte: Adaptado de DOW, 2004

2.1.3. Parâmetros característicos das membranas

Cada unidade de membrana possui uma pressão de filtração (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 a pressão de filtração (P_f), ou seja:

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

A perda de carga no elemento de membranas (ΔP) é a diferença de pressão entre a alimentação e o concentrado do módulo.

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

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) .

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

2.1.4. Operação de sistemas de membranas

A seleção de componentes nas membranas de osmose reversa é proporcionada pela pressão, essa, 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, por assim dizer, 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):

- a) 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;
- b) porosidade da membrana (f): fração da área de membrana ocupada por poros;
- c) espessura efetiva da membrana (δ_m);
- d) pressão de filtração (P_f);
- e) viscosidade absoluta da água (μ);
- f) fator de tortuosidade do poro (θ);
- g) fenômenos operacionais, como, por exemplo, a camada de concentração-polarização;
- h) camadas de material retido na superfície da membrana (torta de filtro);
- i) géis ou camadas de sais precipitados (*fouling* químico);
- j) biofilmes (*fouling* biológico);

O fluxo de água permeada (Q_p), portanto, pode ser escrita como:

$$Q_p = \frac{f_{r_p}^2 P_f}{8\mu\theta\delta_m} \quad (2.4)$$

Essa equação 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 osmose reversa 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 seria prejudicado, acarretando perda na qualidade da água permeada e aumento do consumo específico (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

CAVALCANTE (2003) mostrou que a incrustação sempre estará presente na operação das membranas de OR. Entretanto, um convívio “pacífico” se torna possível, à medida que métodos de manutenção preditiva sejam mitigados, ou seja, exista uma melhora na capacidade de se prognosticar os problemas. Essa intervenção preventiva visa minimizar os efeitos através de correções da manutenção, operação ou mesmo erros de projeto. O diagnóstico preciso é de fundamental importância para manter o sistema operando satisfatoriamente.

2.1.5. A necessidade do pré-tratamento

As águas subterrâneas profundas são, geralmente, biologicamente estabilizadas, isto é, apresentam baixa concentração de microorganismos e, conseqüentemente, uma baixa possibilidade de formação de biofilme. Entretanto, uma análise físico-química da água é extremamente importante para evitar, principalmente, a incrustação inorgânica, ou o efeito chamado *scaling*, na literatura inglesa. Essas águas, portanto, podem ser utilizadas como água de alimentação da membrana, utilizando apenas pré-tratamentos simplificados como um filtro 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.

Por outro lado, as águas de superfície possuem uma alta concentração de microorganismos e dependem, então, de um pré-tratamento eficaz para removê-los e, assim, viabilizar a dessalinização por membranas. 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.

2.1.6. Disposição do concentrado

O devido tratamento do concentrado da dessalinização vem preocupando e instigando os cientistas, que 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 simplesmente 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.

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. Madeira Cortada, em Canindé-CE, se mostrou a comunidade com maior preocupação ambiental, pois utiliza as três experiências positivas relatadas acima para o consumo do concentrado da OR. A instalação de Canindé apresenta uma vazão média do concentrado de 10 m³ por dia a uma concentração de 5000 mg.L⁻¹ de STD.

A questão do fim dado ao concentrado se torna muito importante no momento do projeto, pois, com algumas mudanças, como a redução da taxa de recuperação, pode-se produzir um concentrado que traga impactos ambientais menores e prolongar a vida da membrana.

2.2. GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

2.2.1. Fontes de energia, desenvolvimento e meio ambiente

A energia, nas suas mais diversas formas, é indispensável à sobrevivência da espécie humana. E mais do que sobreviver, o homem procurou sempre evoluir, descobrindo fontes e formas alternativas de adaptação ao ambiente em que vive e de atendimento às suas necessidades. Dessa forma, a exaustão, escassez ou inconveniência de um dado recurso, entre eles o energético, tende a ser compensada pelo surgimento de outro(s). Em termo de suprimento energético, a eletricidade se tornou uma das formas mais versáteis e convenientes de energia, passando a ser recurso indispensável e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico de muitos países e regiões (ANEEL, 2002). Conforme ilustrado na Figura 2.3, percebe-se que a concentração do consumo de energia elétrica corresponde às áreas de maior crescimento econômico do planeta.



Figura 2.3 - Vista noturna da Terra a partir de imagens de satélite
Fonte: WALKER, 2005

As fontes primárias usadas para a produção de energia elétrica podem ser classificadas em não-renováveis e renováveis. São consideradas fontes não-renováveis aquelas passíveis de se esgotar por serem utilizadas com velocidade superior aos milhões de anos necessários para sua formação. Nesta categoria estão o petróleo e seus derivados, os combustíveis radioativos e o gás natural. Fontes renováveis são aquelas, cuja reposição pela natureza é bem mais rápido

que sua utilização energética (como as águas dos rios, marés, sol, ventos) ou cujo manejo pelo homem pode ser efetuado de forma compatível com as necessidades de sua utilização energética (como biomassa: cana-de-açúcar, florestas energéticas e resíduos animais, humanos e industriais). A maioria dessas fontes apresenta características estatísticas e estocásticas, de certa forma cíclicas, em períodos de tempo compatíveis com a operação das usinas elétricas e inferiores à vida útil das mesmas. Tais fontes podem ser utilizadas para produzir eletricidade principalmente através de usinas hidrelétricas, eólicas, solar-fotovoltaicas e centrais térmicas (REIS, 2003).

2.2.2. Histórico da geração fotovoltaica

As primeiras aplicações do efeito fotovoltaico foram para o uso espacial, como fonte de eletricidade para satélites, no final da década de 50. Já os primeiros estudos datam de 1839, ano em que Edmund Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico do silício, quando ele produziu uma corrente, expondo eletrodos de prata à radiação solar em um eletrólito. Contudo, a primeira célula produzida foi com selênio em 1883 por Fritts e Uljanin. A explicação física da junção PN por Bardeen e Brattain e o descobrimento do transistor por Shockley em 1949, fatos que marcaram o início da era do semicondutor, possibilitaram o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica. Na década de 70, com a chamada *crise do petróleo*, se iniciaram as primeiras aplicações para uso terrestre (GOETZBERGER *et al.*, 1998; FRAIDENRAICH e LYRA, 1995).

Desde então, a indústria fotovoltaica mundial tem demonstrado um crescimento médio do setor (últimos 4 anos) de quase 39 % ao ano, chegando a 48 % ao ano, quando se analisa somente o mercado Europeu. Em 2003, a produção mundial alcançou os 744,08 MW, desses quase 49 % vieram do Japão, como mostra a curva de crescimento, mundial e dividido por país, da Figura 2.4. A matéria prima predominante foi o silício policristalino, com quase 62 %, seguido do monocristalino, com pouco menos de 27 %. O silício amorfo que em 2002 representou 5,8 % de toda produção, em 2003 não chegou aos 4% (MAYCOCK, 2004).

A principal aplicação continua sendo a conexão à rede de distribuição, com 55 %, o que se revela uma tendência, visto que manteve praticamente a mesma

percentagem nos últimos 4 anos. O principal motivo é o preço, que para instalações de grande porte chegou a US\$ 2,7 por watt pico.

Para instalações comerciais e residenciais de pequeno porte, existe ainda a necessidade de subsídios governamentais; tais como na Califórnia, Estados Unidos, que conseguiu reduzir o custo para US\$ 3,5 por watt pico. No Brasil esse preço permanece acima dos US\$ 7 por watt pico.

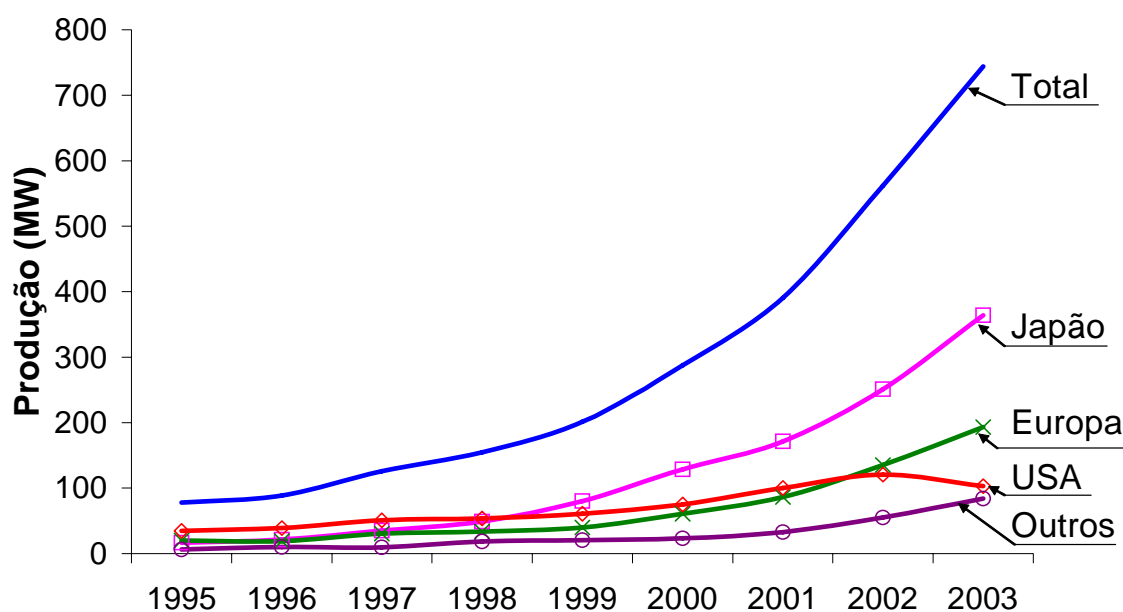


Figura 2.4 – Evolução da produção mundial de módulos FV

Fonte: MAYCOCK, 2004

2.2.3. A radiação solar

A radiação eletromagnética proveniente do Sol possibilita a vida na Terra e constitui uma fonte praticamente inesgotável de energia. Dela pode-se observar características ondulatórias e corpusculares. Essas características possibilitam dois processos primários de conversão para energia elétrica, sendo eles:

- Processo de fotoconversão: processo que transfere diretamente para a elétrica, como os sistemas fotovoltaicos;
- Processo de termoconversão: a energia se converte primeiramente em calor para posteriormente ser transformada em elétrica.

A incidência total da radiação solar sobre um corpo localizado no solo é a soma dos componentes: direto, difuso e refletido. Radiação direta é aquela proveniente diretamente do sol, sem sofrer nenhuma mudança de direção, além da provocada pela refração atmosférica. Radiação difusa é aquela recebida por

um corpo, em virtude da direção dos raios solares terem sido modificados por reflexão ou espalhamento na atmosfera. A radiação refletida depende das características do solo e da inclinação do equipamento captador.

Os níveis de radiação solar em um plano horizontal na superfície da Terra, conseqüentemente potencial de energia disponível, podem ser determinados apenas de forma aproximada, devido, principalmente, à inclinação de seu eixo de rotação em relação ao plano da órbita em torno do Sol. Variam também de acordo com a região, notadamente pelas diferenças de latitude, condições meteorológicas e a altitude.

2.2.4. Instrumentos de medidas solarimétricas

As medições solarimétricas são da maior importância para o projeto e a previsão do funcionamento de aplicações da geração fotovoltaica.

O piranômetro, utilizado para medição da radiação total ou difusa, pode ter, basicamente, dois tipos de sensores de radiação: as termopilhas e as células de silício monocristalino. A termopilha consiste, basicamente, na medição da diferença de temperatura de duas superfícies, uma pintada de branco, outra de preto e igualmente iluminadas. A principal vantagem da termopilha é a sua resposta uniforme em relação ao comprimento de onda. O uso da célula de silício monocristalino como sensor apresenta como principal vantagem o baixo custo, cerca de 10 a 20 % dos custos dos instrumentos que usam termopilhas. A maior limitação, entretanto, é a não uniformidade da resposta espectral e a região relativamente limitada de comprimentos de onda, à qual a fotocélula é sensível (0,4 a 1,1 μm com máximo em torno dos 0,9 μm). A principal vantagem do piranômetro é poder fazer medições em diversas escalas de tempo, dependendo do equipamento de aquisição de dados.

A radiação direta pode ser medida através de um instrumento chamado piroheliômetro, que possui um dispositivo de acompanhamento do Sol e de um sistema ótico que só admite a energia proveniente do disco solar e de um estreito anel adjacente.

O heliógrafo é um instrumento usado para medir a duração da insolação através de um traço prolongado em uma faixa de papel que é enegrecida, quando a radiação é superior a 120 W.m^{-2} .

A medição da radiação total ou sua componente difusa podem ainda ser medidas pelo actinógrafo, também chamado de piranógrafo. O sensor é composto de três tiras bimetálicas, sendo uma central livre em cor preta numa extremidade e duas tiras laterais brancas fixas. O movimento na extremidade livre da tira preta é causado pela diferença de dilatação dos metais que a compõem, transmitindo mecanicamente a uma pena, que registra sob uma carta de papel.

2.2.5. Efeito fotovoltaico da junção PN

A célula solar, também conhecida como célula fotovoltaica, é o elemento básico para a transformação da radiação eletromagnética em energia elétrica e pode ser compreendida como um dispositivo semicondutor que produz uma corrente elétrica, quando exposta à luz.

Um semicondutor a zero Kelvin possui uma banda preenchida por elétrons, chamada de banda de valência e uma segunda banda de nível mais alto que está despovoada, chamada de banda de condução. Entre essas duas bandas existe uma banda, que os elétrons não podem ocupar, chamada de banda proibida (*gap*). Para que o elétron passe da banda de valência para a de condução, uma quantidade mínima de energia é necessária, sendo uma constante característica para cada material. Desse deslocamento, dois tipos de portadores de carga são formados: o elétron agora localizado na banda de condução e uma lacuna (positiva), onde o elétron se localizava na banda de valência.

Uma propriedade fundamental para as células fotovoltaicas é a possibilidade de fótons, na faixa do visível, com energia suficiente, excitar os elétrons à banda de condução. Esse efeito, que pode ser observado em semicondutores puros, também chamados de intrínsecos, não garante por si só o funcionamento de células fotovoltaicas. Para obtê-las é necessário uma estrutura apropriada, em que os elétrons excitados possam ser coletados, gerando uma corrente útil.

Os elementos pertencentes ao grupo IV da tabela periódica, como o silício e o germânio, possuem como principal característica a presença de quatro elétrons de valência que se ligam aos vizinhos em ligações covalentes, formando uma rede cristalina. Ao adicionar átomos pentavalentes, como o fósforo e o arsênio, haverá um elétron em excesso para formar as ligações covalentes,

ficando fracamente ligado a seu átomo de origem. Nesse caso, necessita-se de somente uma pequena quantidade de energia para liberar este elétron para a banda de condução, algo em torno de 0,02 eV. Diz-se assim que o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se dopante N. O cristal dopado chama-se N (tipo N). Se, por outro lado, forem introduzidos elementos do grupo III da tabela periódica, como índio e o boro, haverá falta de um elétron para satisfazer as ligações covalentes com os átomos de silício da rede. Essa falta de elétron é denominada buraco ou lacuna. O cristal dopado é chamado P (tipo P) e o boro é considerado um aceitador de elétrons ou um dopante P.

Através da união dos cristais do tipo N e P, uma junção PN é formada. Na região da junção se dá uma difusão de elétrons do lado N para P, devido ao elevado gradiente de concentração. Esse deslocamento estabelece uma redução de elétrons do lado N, tornando-o positivo, e um acúmulo de elétrons do lado P, tornando-o negativo. Surge assim um campo elétrico na região da junção; esse processo alcança o equilíbrio, quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de impedir a passagem dos elétrons livres remanescentes do lado N. A tensão total através da junção é denominada de tensão de difusão, cerca de 1 V.

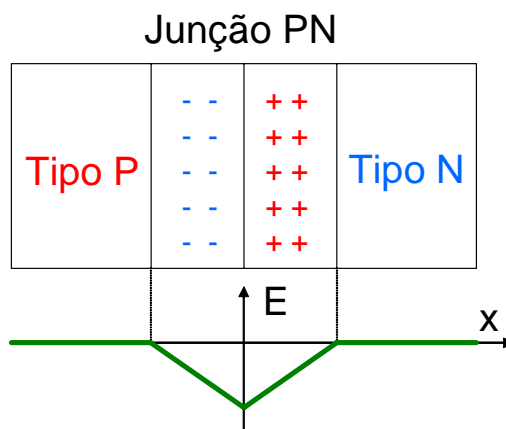


Figura 2.5 – Campo elétrico (E), junção PN

Uma junção PN possui um campo elétrico diferente de zero e crescente em direção à junção, resultante da transferência de carga, como apresentado na Figura 2.5 (CRESESB, 1999). Quando essa junção for exposta a fótons, que se caracterizam por um fluxo de partículas no nível atômico da luz e receber uma energia maior do que a banda de energia, ocorre a geração de pares elétron-lacuna, acelerando-as, gerando assim uma corrente elétrica através da junção. O

deslocamento de cargas sob uma diferença de potencial chama-se de efeito fotovoltaico. Uma ligação externa é necessária para disponibilizar a corrente para uso. Com isso, para cada elétron, que deixa a célula, há outro que retorna da carga, substituindo-o, evidenciando que a célula solar não pode armazenar energia elétrica.

Através da fórmula 2.5, proposta pelo físico alemão Albert Einstein, é possível relacionar a energia do fóton

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.5)$$

com o respectivo comprimento de onda λ ; onde h representa a constante de Planck ($6,6 \times 10^{-34} \text{ Ws}^2$) e c a velocidade da luz no vácuo ($3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$). No entanto, de todo o espectro de frequência da luz somente uma parte pode ser absorvida e convertida em corrente elétrica útil. Outro fator que limita a absorção de energia solar é que cada fóton só excita um elétron, precisando ter mais energia que a banda de valência para isso. A energia eletromagnética excedente e a insuficiente para excitar um elétron são convertidas em calor. Por fim, mesmo para os elétrons excitados, existe uma probabilidade de não serem coletados, não contribuindo para a corrente. O resultado é que, para células de silício, o limite teórico de conversão de radiação solar em eletricidade é de 31% (FRAIDENRAICH e LYRA, 1995).

2.2.6. Curva característica de tensão e corrente da junção PN

A curva característica corrente x tensão da junção PN no escuro se parece com a de um resistor não linear. Porém, com a exposição à radiação solar, a curva se desloca do primeiro para o quarto quadrante, pela adição de uma fotocorrente I_{PH} , como pode ser visto na Figura 2.6. Essa corrente é independente da tensão aplicada, caracterizando uma fonte de corrente, sendo sua intensidade proporcional à radiação, à área iluminada e à temperatura.

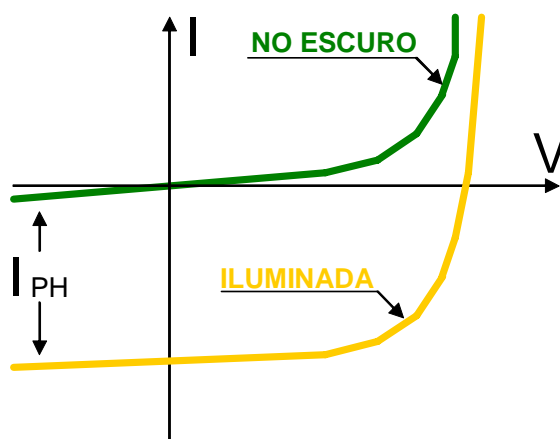


Figura 2.6 – Curva característica da junção PN

2.2.7. Modelo elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica

O comportamento elétrico da célula fotovoltaica pode ser elucidado através de um circuito elétrico equivalente, composto de uma fonte de corrente (fotocorrente) e um diodo em paralelo. Desse modelo ideal, uma primeira relação entre a densidade de corrente j e a tensão V_C da célula ideal é formulada e dada por:

$$j = j_{PH} - j_0 \left(e^{\frac{e_0 V_C}{kT}} - 1 \right) \quad (2.6)$$

sendo j_{PH} a densidade de portadores de cargas livres, gerados através do efeito fotovoltaico (a chamada densidade de corrente de fótons), j_0 a densidade de corrente de saturação do diodo, e_0 a carga elementar de um elétron ($1,6021 \times 10^{-19}$ As), k a constante de Boltzmann ($1,3854 \times 10^{-23}$ JK⁻¹) e T a temperatura da célula em Kelvin. Essa equação corresponde à equação do diodo de Shockley (KLEEMANN e MELISS, 1988, MEISSNER, 1993).

Entretanto, em um modelo real a célula apresenta perdas. Algumas dessas perdas são representadas através de resistências inseridas no modelo elétrico da célula ideal. A resistência em série r_S descreve a queda de tensão através de perdas ôhmicas do material semiconductor, nos contatos metálicos e no contato do metal com o semiconductor. A resistência em paralelo, r_P , descreve as perdas que surgem principalmente através de perturbações elétricas entre as partes da frente e de trás da célula, assim como através de perturbações pontuais na zona de transição PN. Adicionalmente, um diodo D_2 pode ser ligado em paralelo para

considerar as perdas de recombinação na camada de carga espacial. Sob essas condições, um circuito, chamado modelo de dois diodos da célula solar, é desenhado na Figura 2.7. Aplicando a Lei de Kirchhoff, ou lei das malhas, à densidade de corrente, encontra-se a seguinte relação:

$$j = j_{PH} - j_{01} \left(e^{\frac{e_0(V_C + jr_S)}{\alpha kT}} - 1 \right) - j_{02} \left(e^{\frac{e_0(V_C + jr_S)}{\beta kT}} - 1 \right) - \frac{V_C + jr_S}{r_P} \quad (2.7)$$

As grandezas α e β são denominadas de parâmetros dos diodos.

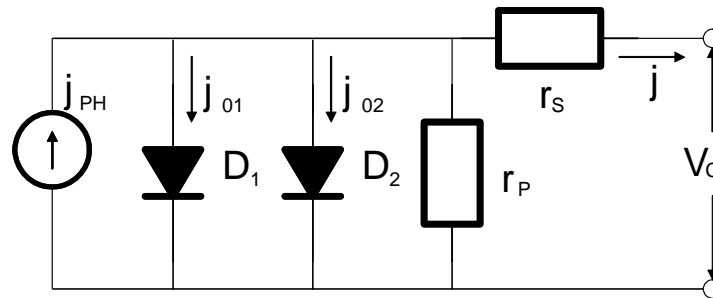


Figura 2.7 – Circuito equivalente da célula solar

Como as resistências, as densidades de corrente j_{PH} , j_{01} e j_{02} são características de cada tipo de célula solar.

$$j_{PH} = (C_0 + C_1.T).Rad \quad (2.8)$$

$$j_{01} = C_{01}.T^3 e^{-\frac{e_0.V_{gap}}{k.T}} \quad (2.9)$$

$$j_{02} = C_{02}.T^{5/2} e^{-\frac{e_0.V_{gap}}{2.k.T}} \quad (2.10)$$

A tensão V_{gap} representa a diferença de potencial entre a banda de condução e a de valência. Para uma célula de silício, por exemplo, seu valor é de 1,14 V. A densidade de corrente de fótons j_{PH} é proporcional à radiação solar global Rad e mostra, em relação à mudança de temperatura, um comportamento aproximadamente linear. A temperatura, nas equações de densidade de corrente de saturação j_{01} e j_{02} , apresenta uma relação exponencial (ARAÚJO, 1982). As resistências r_S e r_P , como os parâmetros da célula C_0 , C_1 , C_{01} e C_{02} , são simplificadas e tratadas como constantes.

2.2.8. Parâmetros que influenciam a curva característica das células FV

Os módulos fotovoltaicos normalmente operam em condições diferentes da condição padrão, tendo suas principais grandezas elétricas alteradas com

variações da radiação e da temperatura. Essas variações ocorrem principalmente devido às mudanças das condições climáticas do local.

A radiação solar incidente em uma célula fotovoltaica provoca o aparecimento de uma fotocorrente I_{PH} , como visto na Figura 2.6, que é diretamente proporcional a essa radiação, conforme mostra a Figura 2.8a. Do mesmo modo se comporta a corrente de curto-circuito da célula, I_{CC} , se os efeitos da resistência série r_S forem desprezados.

A temperatura também faz com que a banda de energia do material semiconductor diminua, resultando em um acréscimo da fotocorrente gerada, I_{PH} , de aproximadamente 0,1 %. Entretanto, a tensão de circuito aberto, V_{OC} , decresce a uma taxa de 0,3 % /°C, resultando que a potência gerada diminua em 1 % a cada 2,7 K de elevação da temperatura (GOETZBERGER *et al.*, 1998), conforme ilustra a Figura 2.8b.

Com isso vimos que a potência fornecida pela célula depende da radiação e da temperatura, necessitando de condições padrões, para que diferentes células possam ser comparadas entre si, sendo elas: o coeficiente de “massa de ar” (AM) de 1,5; a radiação (Rad) de 1000 W.m^{-2} e a temperatura na célula de 300 K.

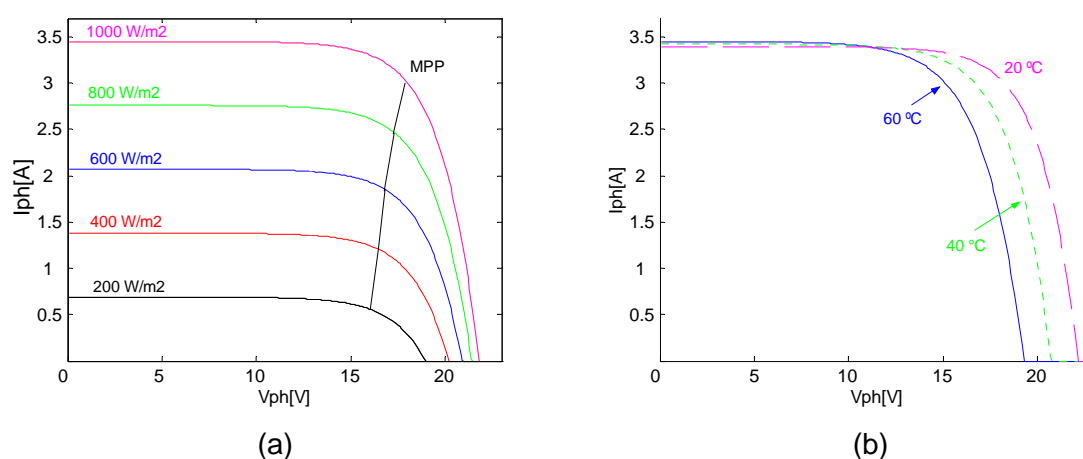


Figura 2.8 – Fatores que influenciam a curva característica dos módulos fotovoltaicos

2.2.9. Características elétricas das células fotovoltaicas

Os principais parâmetros de especificação de uma célula solar são: a corrente de curto-circuito (I_{CC}), que idealmente é igual a I_{PH} , ver Figura 2.6; tensão de circuito aberto (V_{OC}); tensão e corrente de máxima potência, respectivamente

V_{MP} e I_{MP} ; o fator de forma (FF), e a eficiência (η) (FRAIDENREICH e LYRA, 1995). O fator de forma é uma grandeza que expressa quanto a curva característica se aproxima de um retângulo no diagrama $I \times V$. Alguns desses parâmetros podem ser visualizados nas curvas da Figura 2.9.

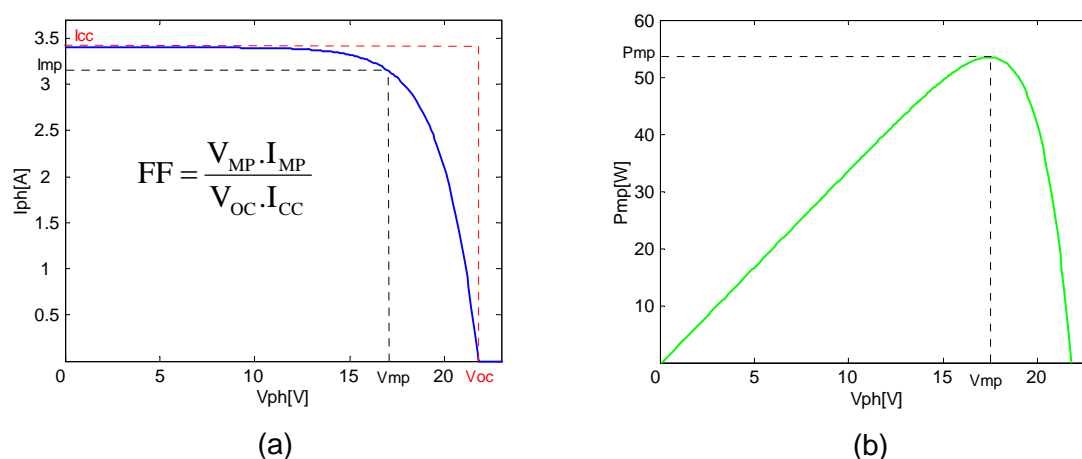


Figura 2.9 – Curva característica $I \times V$, com definição do FF, e a curva de potência do módulo FV

Analisando a curva característica corrente x tensão e o circuito equivalente das células fotovoltaicas, pode-se levantar algumas dessas características das células fotovoltaicas, como as seguintes (GOETZBERGER *et al.*, 1998):

- a) a tensão de um módulo fotovoltaico depende exclusivamente da carga, pois o módulo se constitui de uma fonte de corrente;
- b) a potência de curto-circuito é nula, porque no instante do curto a corrente é máxima, mas a tensão é nula;
- c) em circuito aberto não existe corrente externa que supere a diferença de potencial entre as regiões dopadas. A geração e a recombinação de portadores de carga encontram-se em equilíbrio;
- d) o ponto de operação, no qual a potência entregue à carga alcança o seu maior valor, é denominado ponto de máxima potência (PMP). A respectiva corrente e tensão são I_{MP} e V_{MP} ;
- e) o fator de forma (FF) é definido como a relação entre a potência no PMP e o produto da corrente de curto-circuito vezes a tensão de circuito aberto. Valores usuais para células solares ficam entre 70 e 80%;

- f) o rendimento descreve a relação entre a potência no PMP e a potência total da luz incidente. Células solares de silício normalmente encontrados no comércio alcançam rendimentos de 13 a 15%.

2.3. EXPERIÊNCIAS MUNDIAIS EM UNIDADES OR-FV

A crescente escassez de água potável e energéticos 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.

Tabela 2.1 – Experiências mundiais de unidades OR-FV: dados operacionais

	Local (início do Projeto)	Potência FV (kWp)	Banco de Baterias	Osmose Reversa				
				Produção de água potável		Consumo de Energia (kWh/m ³)	Taxa de recuperação	Pressão de operação (kPa)
				Nominal (l/h)	Real (l/h)			
Dessalinização da água salobra	BRASIL – CEARÁ (2000)	1,1	400Ah 24V	250	223	3,03	27%	830
	PORTUGAL – LISBOA (2000)	0,10-0,15	sem	5	1-4,6	28-38	0,7-2,4%	250-420
	ESPAÑA (1988)	23,5	2240 Ah 190 - 254 V	2500	1000 - 2300	2,48	26 - 64 %	3000 – 3800
	ALGERIA (1988)	2,736	500 Ah 120 V	850	650 - 1100	1,38 – 2,77	24 – 40,7 %	1200
	EGITO (1986)	19,84	2000 Ah 104 V	-	10200	0,89	51 %	1300
Dessalinização da água do mar	ESPAÑA–GRAN CANARIA (1998)	4,8	1240 Ah 48V	155	124 - 155	15 – 16,3	-	4500 – 6300
	MARROCOS (-)	25,62	1430Ah 96V	500	500	22	23%	6500
	CANADÁ (1982)	-	sem	8,3	-	< 4	10 %	-
		0,344	sem	41,7	12,5	< 4	-	-
		0,480	sem	125	-	< 4	14 %	-
ITALIA (-)	100	4000 Ah 220 V	5000	-	-	-	5500	
ARABIA SAUDITA (1981)	8	194 Ah 240 V	261	243 – 297	16,1 – 19,7	22 %	-	

(-) Sem dados

Fonte: MONTENEGRO, 2001; LOUREIRO et al., 2001; HEROLD e NESKAKIS, 2001; PALMA, 1991; PERAL e GÓMEZ; TRUJILLO, 1991; KEHAL, 1991; MAUREL, 1991; KEEFER; HEMBREE; SCHRACK, 1985; CRUTCHER et al., 1981.

As principais experiências mundiais em unidades OR-FV foram compiladas na Tabela 2.1. Nessa tabela observa-se uma grande variação nos valores de consumo específico (kWh.m⁻³), devido, principalmente, à diferença de escala entre os projetos e ao uso de sistemas de armazenamento de energia (baterias). Outro ponto marcante é a diferença entre as unidades de dessalinização da água do mar e salobra, isso se deve à relação direta existente entre o consumo específico e a concentração de sais. Outros pontos, como a diferença de níveis

de pressão e de taxa de recuperação, podem ser comparados. O objetivo e os principais pontos dessas experiências são detalhados a seguir:

Brasil - Caucaia

A primeira unidade OR-FV do Brasil foi instalada na comunidade de Coité – Pedreiras em Caucaia (MONTENEGRO, 2001), no estado do Ceará, região Nordeste, onde se encontra uma temperatura anual média de 28 °C e um potencial anual de energia solar de cerca de 2.000 kWh.m⁻². 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⁻¹) 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 OR foi suprido pelos módulos FV; a bomba do poço foi acionada diretamente pela rede convencional de distribuição.

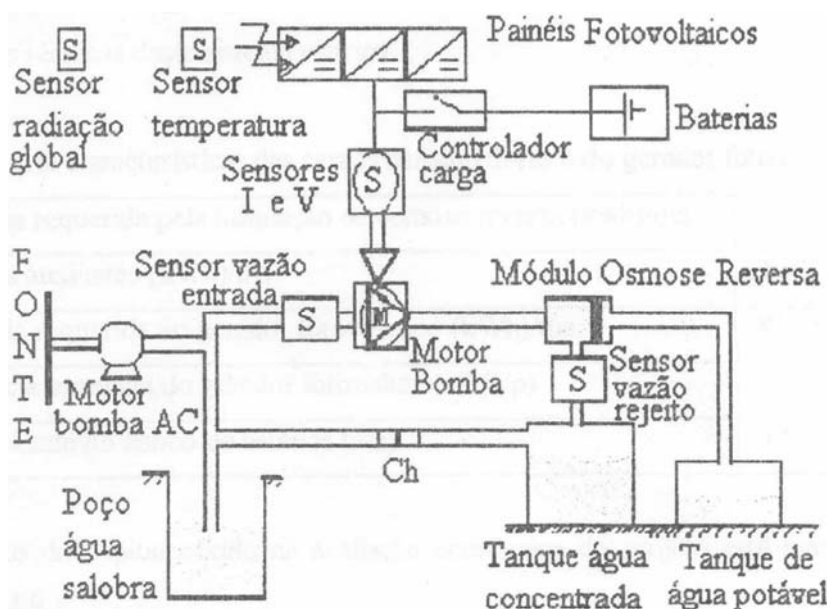


Figura 2.10 – Configuração básica da unidade OR-FV pioneira no Brasil

Duas estratégias foram investigadas, primeiro, com um motor de corrente contínua e depois, com um motor de indução trifásico.

O motor CC usado na primeira fase do projeto possui uma tensão e potência nominal de 24 V e 750 W, respectivamente. A unidade produziu um total

de aprox. 12,6 m³ em setembro, caindo para 8,7 m³ em outubro e voltando aos 12,5 m³ em novembro de 2000. A redução na produção de água potável observada em outubro foi causada por uma parada ocasionada por uma falha nas escovas da máquina CC, e a respectiva dificuldade de encontrá-la no mercado local. Durante esse mês, a unidade ficou parada por dez dias.

Nesse período, a unidade apresentou uma grande variação nos valores da taxa de recuperação e no consumo específico. Devido a essas condições, o motor CC teve diversos problemas de operação. Ao final deste período, a unidade havia acumulado um total de 33,8 m³ e um consumo total de energia elétrica de 160 kWh; isso resultou em um consumo específico de 4,72 kWh.m⁻³.

Devido a alguns problemas com o motor de corrente contínua, em janeiro de 2001, o motor CC foi substituído por um motor de indução, de corrente alternada, trifásico de 2 CV, com uma tensão nominal de 220 V. A viabilidade técnica do uso do motor de indução trifásica dependeu da implementação de alguns equipamentos, sendo eles:

- a) Um conversor CC – CC elevador conectado ao banco de baterias para elevar a tensão de 24 V para 220 V. Esse componente foi desenvolvido especialmente para este estudo;
- b) Um inversor CC – CA com potência nominal de 750 W.

A produção de água potável da unidade de OR equipada com o motor de indução trifásico foi significativamente superior a com o motor CC. Em janeiro, apesar de ter operado somente vinte dias, a unidade produziu 10,6 m³, em fevereiro subiu para 16,3 m³ e caindo novamente para 11,5 m³, em março de 2001. A redução na produção de água potável em março é uma consequência do período chuvoso no Ceará; a comunidade armazena a água da chuva, acarretando a redução da necessidade de funcionamento do sistema de 73 h em fevereiro para 53 h em março.

Nesse período, a taxa de recuperação e o consumo de energia elétrica não mostraram grande variação, indicando uma boa estabilidade da unidade.

No final desse período, a unidade produziu 38,41 m³ de água potável e consumiu um total de 116,43 kWh; levando a um consumo específico de 3,03 kWh.m⁻³. Um exemplo da operação da unidade é mostrado na Figura 2.11. Nessa figura, pode-se observar algumas características da operação da unidade,

como a tensão no banco de baterias, a energia gerada no arranjo FV, o consumo do motor bomba de alta pressão e a produção de água potável.

De abril a agosto de 2001, um decaimento gradual da taxa de recuperação foi observado (menos de 10% no último mês), fazendo com que o consumo específico se elevasse também (mais de $12 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ no último mês); a razão principal está relacionada com as condições de operação da membrana de OR.

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 $1200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (água salobra), considerada imprópria para o consumo humano. A comunidade buscava água potável de outro local, a aprox. 2 km de distância; esse serviço é feito normalmente por mulheres ou crianças.

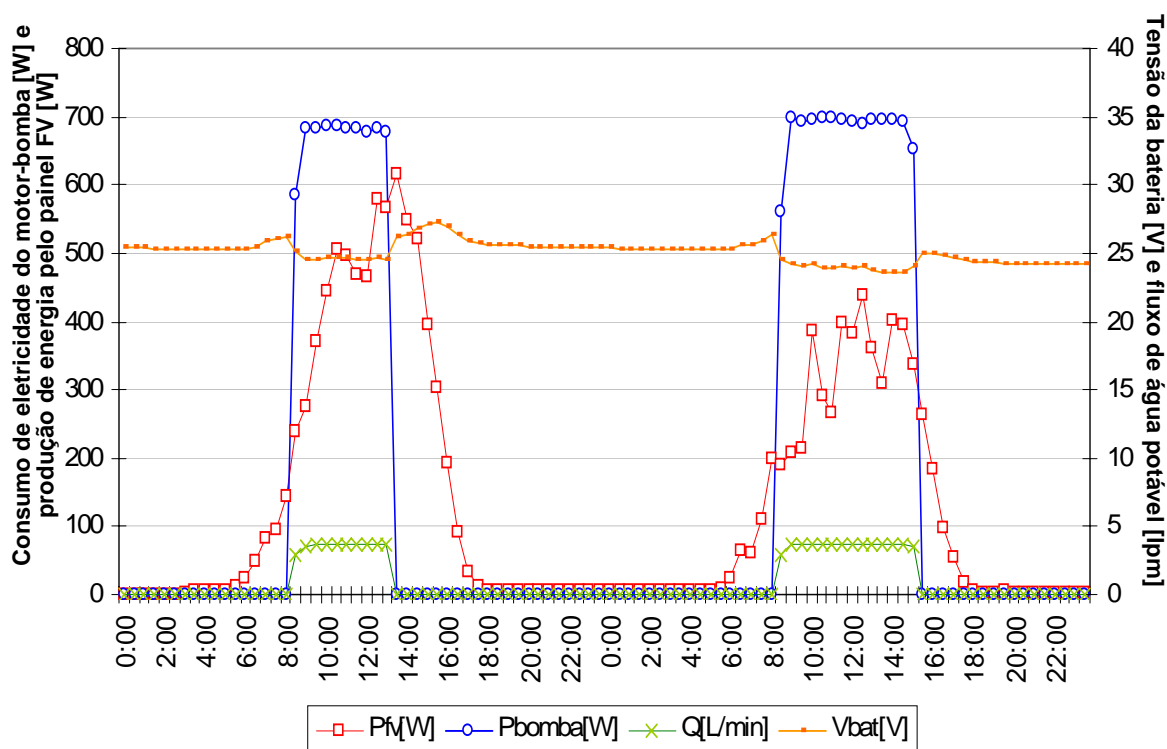


Figura 2.11 – Operação da unidade OR-FV com baterias nos dias 14 e 15/02/2001

Depois que a comunidade foi escolhida, o primeiro passo foi entrar em contato com os líderes locais no intuito de marcar uma reunião com todos integrantes do local; a motivação principal era explicar o projeto, mencionando que o projeto era conduzido por uma equipe da universidade e que não tinha

propósitos políticos. Um ponto importante, que foi deixado claro, era que a água produzida pela unidade de OR era muito especial, que deveria ser consumida somente pelas pessoas. Nesse sentido, aspectos como o consumo racional e o combate ao desperdício foram discutidos. Deixou-se explícito que a água produzida não haveria custo à comunidade e que todo o projeto era financiado pelo Banco do Nordeste do Brasil e pelo CNPq.

O próximo passo foi escolher um integrante da comunidade para operar a unidade de OR, limpar os módulos FV toda semana e comunicar à universidade em caso de problemas técnicos. Uma garota com o ensino médio foi escolhida e aspectos como os procedimentos de operação, segurança e manutenção foram discutidos com ela. Como motivação, um pagamento mensal foi providenciado.

As seguintes conclusões foram tiradas dos resultados obtidos:

- a) a bomba centrífuga acoplada ao motor CC se mostrou com problemas de operação, devido às condições de operação da unidade de OR;
- b) a unidade OR-FV, utilizando o motor de indução trifásica, apresentou um consumo específico de $3,03 \text{ kWh.m}^{-3}$;
- c) a estratégia de operação foi caracterizada por uma rotação entre 2700 e 3000 rpm, pressão de 827 kPa e uma taxa recuperação de 27 % (considerada, posteriormente, muito alta para apenas uma membrana);
- d) a participação da comunidade foi de grande importância para o sucesso desse projeto, aspectos como o consumo racional e o combate ao desperdício devem ser discutidos com a comunidade;
- e) a unidade de OR apresentou um custo da água potável de US\$ 12,76 por m^3 .
- f) um mecanismo de autofinanciamento deve ser providenciado para instalações futuras, com o objetivo de se obter recursos para a manutenção do sistema (operador, membranas, baterias, ...); no presente projeto o custo de O&M ficou próximo dos 6 % do custo total do projeto.

Portugal

Uma unidade de osmose reversa acionada por módulos fotovoltaicos com pressão variável (sem baterias) foi instalada em 2000 no Departamento de Energias Renováveis – INETI - em Lisboa (LOUREIRO *et al.*, 2001). A água para dessalinização é manipulada em laboratório e possui pH neutro, baixa turbidez e salinidade que varia de 1280 a 3200 mg.L⁻¹ de STD a 20°C. A instalação possui uma membrana, 3 módulos de 50 Wp ligados em paralelo, para acionar uma bomba de 12V DC, marca Shurflo. Dois modos de operação foram testados, com 2 e 3 módulos fotovoltaicos. Usando 2 módulos, o consumo específico variou de 28,8 kWh.m⁻³ (produção de 1,9 L.h⁻¹) até 40,1 kWh.m⁻³ (produção de 1,0 L.h⁻¹); Com 3 módulos de 50 Wp, a variação foi de 25,6 até 32,4 kWh.m⁻³, que correspondem a produção de 3,2 e 3,4 L.h⁻¹ respectivamente.

Espanha – Gran Canaria

Com o intuito de investigar a viabilidade técnico-econômica de unidades OR-FV para dessalinização da água do mar, uma unidade de pequeno porte foi instalada em 1998 no campo de testes do instituto espanhol de Pozo Izquierdo - Gran Canaria (HEROLD e NESKAKIS, 2001); a planta é suprida por um sistema FV, isolado da rede elétrica convencional, de 4,8 kWp, com um banco de baterias de 60 kWh. Diferentes estratégias de controle e regulação foram propostas para aumentar a produção diária de água potável, sempre pensando no menor custo possível. Os elementos da unidade instalada são:

- a) Membrana em espiral para dessalinizar a água do mar (Filmtec HR3040) para uma produção máxima de 3 m³ por dia;
- b) Arranjo FV (64 módulos de silício monocristalino de 75 Wp cada, totalizando: 4800 Wp);
- c) Regulador de carga;
- d) Inversor (potência nominal de 4,5 kW);
- e) Banco de baterias (capacidade nominal de 1240 Ah, C100, 48V);
- f) Um motor-bomba trifásico de 3 CV, 230V - 50Hz.

Os primeiros testes serviram para determinar os parâmetros ótimos de operação em diferentes pressões de alimentação na ordem de 4500-6300 kPa, sendo eles:

- a) menor consumo específico;

- b) maior produção de água potável (>800 L por dia)
- c) qualidade suficiente da água potável (< 500mg.L⁻¹ de STD).

A unidade operando a 4800 kPa de pressão apresentou um consumo específico de 16,3 kWh.m⁻³, produzindo uma água com 450 mg.L⁻¹ de STD e um volume de água potável de 124 L.h⁻¹. A mesma unidade, operando a 6300 kPa, obteve um consumo específico de 15 kWh.m⁻³, uma concentração de sais de 330 mg.L⁻¹ e uma produção de água potável de 155 L.h⁻¹.

Em uma segunda fase, três diferentes estratégias de operação foram testadas para encontrar a que melhor se adapte a unidades de OR supridas por módulos FV com baterias. Todas essas estratégias foram elaboradas, levando em consideração a capacidade do banco de baterias:

- a) Estratégia de regulação estática: duas vezes por dia a capacidade da bateria é medida: uma, às 6 da manhã, para determinar a hora de iniciar o funcionamento, e outra, ao meio-dia, especificando assim a hora de desligar a unidade.
- b) Estratégia de regulação flexível: a capacidade da bateria é medida continuamente. A unidade começa a funcionar, quando a capacidade da bateria for superior a 800 Ah, permanecendo em funcionamento, enquanto a capacidade não cair abaixo de 600, ou mesmo 800 Ah.
- c) Estratégia de regulação dinâmica: o objetivo dessa estratégia foi encontrar a maior flexibilidade de operação para diminuir ao mínimo a quantidade de chaveamento da unidade de OR. Para iniciar o funcionamento, a radiação solar precisa exceder a um determinado limite inferior, nesse instante a capacidade da bateria é medida, estabelecendo assim, através de regras, o horário para iniciar a operação. Se a radiação solar permanece abaixo de um limite por um determinado período, a hora de desligamento do sistema é antecipado, dependendo da situação atual. Uma vez em operação, se a radiação cair abaixo de um limite mínimo, a planta é desligada imediatamente.

Itália

Uma unidade de OR-FV, instalada na Itália, foi planejada para operar 8 horas por dia (PALMA, 1991). Devido ao extenso período de funcionamento, um grande banco de baterias se mostrou necessário, para suprir a demanda em períodos de baixa radiação solar. O projeto foi dividido em duas plantas idênticas, que operavam em paralelo, com o objetivo de aumentar a confiabilidade do abastecimento de água à comunidade. Cada planta é equipada com bombas volumétricas e elementos de recuperação de energia acoplados ao concentrado.

Espanha

Foi instalado em 1988, no campus da universidade de Almeria - Espanha, uma unidade de osmose reversa, para dessalinizar a água salobra de um poço (PERAL e GÓMEZ; TRUJILLO, 1991). O objetivo principal do estudo foi levantar os principais problemas de operação de uma unidade autônoma, alimentada por energia solar fotovoltaica.

Durante os primeiros quatro meses de operação, o concentrado era despejado novamente no poço, causando um aumento na concentração de sal da água de alimentação e conseqüentemente uma elevada dispersão das grandezas medidas. A canalização do concentrado até o mar resolveu o problema ambiental de forma definitiva e exemplar.

Entretanto, o maior problema levantado foi no projeto inadequado do pré-tratamento, o que causou um aumento na freqüência da limpeza das membranas (limpeza química) e dos filtros. Como conseqüência, houve uma redução no período diário de operação de 20 para 4,9 h (taxa de disponibilidade abaixo de 25%).

Os módulos fotovoltaicos cobriam uma área de 258 m² de células de silício policristalino, gerando 23,5 kWp. A eficiência desses módulos se mostrou na ordem de 7,4 %. Um banco de baterias de 2240 Ah foi projetado para regularizar o atendimento energético da bomba de alta pressão.

Argélia

Uma unidade de dessalinização foi instalada, em 1988, na região desértica do sul da Argélia (KEHAL, 1991). Esse experimento envolveu as tecnologias fotovoltaicas e a de osmose reversa, para suprir a demanda de água potável de

400 pessoas. Antigamente essa demanda era suprimida por caminhões que percorriam uma distância de até 150 km.

A água salobra, proveniente de um poço, possui uma quantidade total de sólidos dissolvidos de aproximadamente 3000 mg.L⁻¹ a uma vazão de 2,7 m³.h⁻¹. Dois reservatórios de 4 m³ armazenam a água salobra e um terceiro, de mesma capacidade, armazena água potável.

Dois anos de operação foram relatados, 1988 e 1989. No primeiro ano a produção de água potável era de 935-1100 L.h⁻¹, a um consumo específico de 1,38-2 kWh.m⁻³ e uma taxa de recuperação de 34-40,7 %. Em 1989, devido provavelmente às incrustações, a vazão de água permeada caiu para 650-900 L.h⁻¹, juntamente com a taxa de recuperação, que atingiu os 24 a 33 %. Conseqüentemente, o consumo específico subiu para 2,05-2,77 kWh.m⁻³.

No verão, devido à alta temperatura da água de alimentação (36 °C), foram encontrados as maiores taxas de recuperação e os menores consumos específicos.

Egito

Outra planta de OR-FV foi instalada em 1986 nas margens do Mar Vermelho, agora a 600 km de Cairo (MAUREL, 1991). Entretanto, uma água salobra de 4400 mg.L⁻¹ foi utilizada para produzir 10 metros cúbicos por hora de água potável. Dois arranjos fotovoltaicos, um de 19,84 kWp – 104 V e outro de 0,64 kWp – 24 V, foram utilizados para alimentar a bomba de alta pressão e o circuito de controle, respectivamente. Um banco de baterias de 2000 Ah – 104 V foi projetado para garantir uma autonomia de até 3 dias sem radiação solar suficiente. A planta apresentou um consumo específico abaixo de 1 kWh.m⁻³.

Canadá

No ano de 1982 uma instalação de osmose reversa, utilizando um sistema de recuperação de energia, obteve um consumo específico de energia abaixo de 4 kWh.m⁻³ para dessalinização da água do mar (KEEFER; HEMBREE; SCHRACK, 1985). O sistema de recuperação utiliza uma bomba que recupera a energia remanescente no fluxo do concentrado para ajudar no bombeamento da água salgada na entrada. A operação em velocidade variável causa uma variação na pressão de operação e, conseqüentemente, no fluxo de água potável na saída. Portanto, para uma estreita faixa de operação, correspondente a baixas pressões,

é produzida água com teor de sal elevado, o que causa interrupções no funcionamento da instalação.

Análises matemáticas foram realizadas para calcular os componentes da instalação. A melhor configuração era a planta que produzisse 4 m³ de água potável por dia, com o menor custo. Esse foi encontrado para uma instalação sem baterias, mas acoplado a um seguidor de máxima potência e a um sistema de recuperação de energia.

Arábia Saudita

Em 1981 uma planta de OR-FV foi construída no Mar Vermelho, para suprir a demanda de água potável de uma comunidade de cerca de 250 pessoas (CRUTCHER *et al.*, 1981). Os objetivos principais eram testar a viabilidade do sistema completo, operando de modo autônomo. O sistema apresentou uma taxa de recuperação de cerca de 22 %, o que levou os autores a concluir ser devido à alta salinidade do Mar Vermelho, 42800 mg.L⁻¹, ou ao fato de não terem utilizado nenhum sistema de recuperação de energia. Hoje se sabe que a taxa de recuperação é uma característica de projeto e depende, basicamente, da configuração das membranas. O projeto apresentou boa confiabilidade, viabilizando a operação em modo autônomo.

3. PROJETO DE UNIDADES OR-FV SEM BATERIAS

*"A natureza é exatamente simples, se conseguirmos encará-la de modo apropriado
...Essa crença tem-me auxiliado, durante toda a minha vida,
a não perder as esperanças, quando surgem grandes dificuldades de investigação"*
Albert Einstein (1879-1955)

3.1. METODOLOGIA DO PROJETO

A metodologia normalmente adotada no projeto de unidades de dessalinização via osmose reversa, para fins de suprimento de água potável a comunidades interioranas, segue alguns critérios, como os seguintes:

- a) capacidade de extração de água do poço, para não reduzir muito o nível da água e, assim, comprometer a sua vida útil;
- b) características físico-químicas da água bruta do poço;
- c) demanda de água potável da população;
- d) características da membrana de OR.

A membrana de OR, como estudada no item 2.1, possui algumas características, como a taxa de recuperação máxima recomendada de 15 % (DOW, 2004) para a membrana em espiral de 40 polegadas de comprimento, que devem ser respeitadas para se obter o máximo de vida útil. Para se recuperar uma quantidade maior de água, deve-se colocar mais membranas em série. Lembrando que, a cada membrana adicional em série, a concentração de sais do concentrado aumenta junto com o consumo específico. Isto é, gasta-se mais energia para dessalinizar a mesma quantidade de água, entretanto, produzindo um menor volume de concentrado.

A análise físico-química da água é de vital importância no projeto de unidades de OR, porque, dependendo das características da água, é que se projeta o sistema de pré-tratamento necessário. O projeto ideal, para cada situação específica, é encontrado no equilíbrio entre a qualidade da água de alimentação, a capacidade do poço e a demanda de água potável da população.

Unidades de dessalinização de OR acionadas por energia solar FV necessitam, para seu projeto, de todas as considerações acima e, ainda, a característica anual da:

- a) radiação solar;
- b) temperatura ambiente.

Resoluções diferentes das medições dessas características climáticas são utilizadas para projetar unidades de OR-FV com ou sem baterias, devido, principalmente, ao elemento armazenador de energia, que supre a demanda energética nos momentos, em que a radiação solar não é suficiente. Nesse sentido, JUCÁ (2004) desenvolveu uma ferramenta computacional que possibilita o projeto do arranjo FV. Nesse trabalho foi demonstrado que a maioria dos métodos de dimensionamento de sistemas FV autônomos parte de princípios semelhantes e são desenvolvidos, considerando critérios como: a média da energia solar acumulada (critério da média anual ou do pior mês), o princípio de dimensionamento do gerador FV (obtenção da área ou da corrente e tensão do arranjo) ou a definição da confiabilidade do sistema (probabilidade de perda de carga ou o período de autonomia).

Unidades OR-FV com baterias normalmente criam estratégias de operação, baseadas na capacidade atual da bateria e da radiação solar (CARVALHO, 1997; HEROLD e NESKAKIS, 2001). Agora, quando não se utilizam elementos armazenadores de energia, as metodologias de projeto e de operação necessitam de uma resolução das medições e de um tratamento estatístico diferente do realizado para unidades com baterias.

Em unidades de OR-FV sem baterias, a incidência de radiação solar influencia diretamente na energia entregue à carga e, conseqüentemente, na quantidade de água permeada. Pensando nisso, uma quantidade mínima de horas de operação deve ser garantida, visando a assegurar o suprimento de água potável à comunidade. O número de horas durante as quais o sistema pode operar depende de dois fatores:

- a) Características do sistema, tais como a potência mínima para o acionamento da bomba e o número de módulos FV utilizados;
- b) Radiação incidente, que varia ao longo do tempo.

O nível de radiação solar global mínimo, $Rad_{mín}$, para que o sistema inicie o funcionamento pode ser calculado pela fórmula:

$$Rad_{mín} = \frac{P_{mín} \cdot Rad_{padrão}}{P_{FV}} \quad (3.1)$$

sendo $P_{mín}$ a potência mínima para o sistema operar, P_{FV} a potência total do arranjo FV e $Rad_{padrão}$ a radiação solar global padrão, ou 1000 W.m^{-2} . Ou seja, um número maior de módulos FV permite o suprimento da potência mínima em níveis inferiores de radiação solar.

A quantidade mínima de módulos FV, para acionar uma determinada carga, pode ser calculada pela razão entre a potência nominal da carga e o valor de pico do módulo FV. O motor em estudo apresenta uma potência nominal de 100 W e o módulo FV uma potência de pico de 55 W, resultando no número mínimo de 2 módulos.

A potência mínima medida para o sistema em estudo operar é de aproximadamente 50 W. A medição foi realizada, levando em consideração a necessidade de se superar a pressão osmótica da membrana de OR, para que se inicie o processo. Introduzindo esse valor em (3.1) para 2 e 3 módulos FV (55 Wp) tem-se um valor mínimo de radiação solar global de aproximadamente 500 e 300 W.m^{-2} , respectivamente.

A Figura 3.1 mostra médias a cada 30 s da radiação solar durante o dia 17 de março de 2004 em Fortaleza. Analisando essa figura, pode-se imaginar algumas das dificuldades de se estabelecer estratégias de operação baseadas em valores instantâneos da radiação solar. Outro ponto intrigante seria como estabelecer ou garantir um período mínimo de funcionamento diário, sobretudo sem interrupções no suprimento de energia ao motor-bomba. Sem esquecer nunca o foco principal da unidade OR-FV desenvolvida, ou seja, o suprimento de água potável a comunidades rurais.

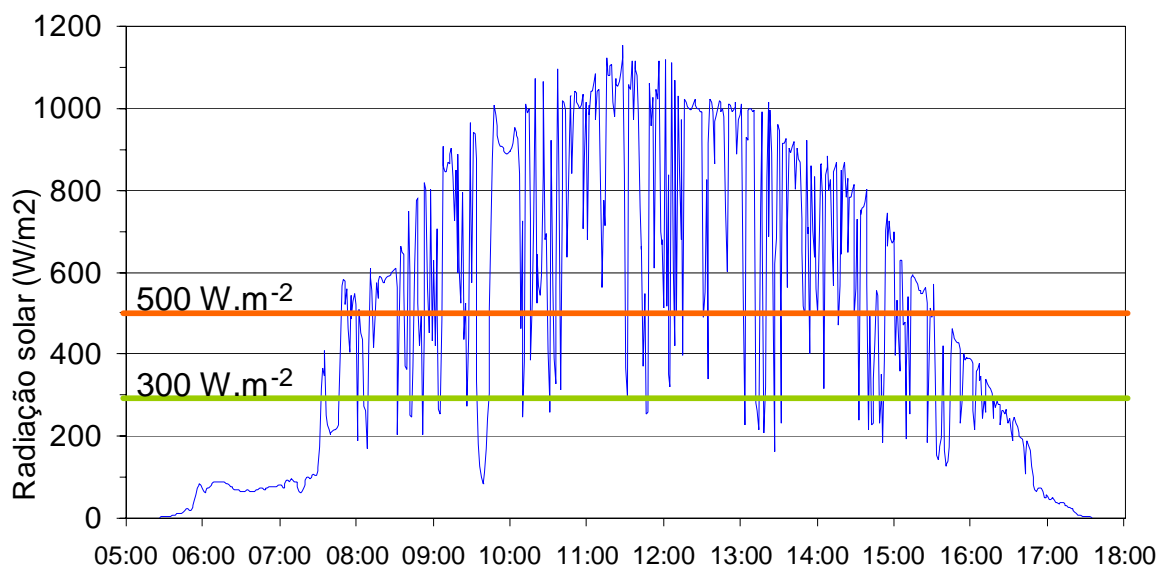


Figura 3.1 – Médias a cada 30 s da radiação solar em Fortaleza, dia 17/03/04

Felizmente, a membrana de OR funciona como um elemento armazenador de energia, suportando um pouco essas variações bruscas no suprimento de energia pelo arranjo FV. Baseado nessa premissa, considerou-se satisfatório um estudo estatístico da radiação solar, utilizando médias a cada 10 minutos. Os dados foram coletados em Fortaleza-CE no período de abril de 2003 a março de 2004 e trabalhados paralelamente aos dados de abril de 2004, maio a setembro de 2001, outubro a dezembro de 2000 e janeiro a março de 2001. Esses 12 últimos meses foram utilizados para uma análise comparativa em relação aos primeiros 12 meses acima citados. Os resultados foram estocasticamente estudados e apresentados em forma de gráficos, no seguinte formato:

- Gráficos de radiação solar mensal apresentam a energia diária média disponível de cada mês [kWh.m^{-2} por dia], calculada a partir dos dados de radiação [W.m^{-2}] e do período de medição [h];
- Gráficos de períodos contínuos máximos diários com radiação solar acima de 300 e 500 W.m^{-2} mostram o maior período de incidência contínua de radiação acima do nível considerado (300 ou 500 W.m^{-2}) de cada dia do mês;
- Histogramas de radiação solar apresentam o tempo total em minutos, em que a radiação esteve nas faixas entre 100 e 200 W.m^{-2} (faixa indicada pelo número 100 no gráfico), entre 200 e 300 W.m^{-2} (indicada pelo número 200), etc.;

- d) Gráficos de período de funcionamento acumulado com radiação maior que 300 e 500 W.m^{-2} ; nesses gráficos são mostrados os tempos totais em minutos, em que a radiação esteve acima do nível considerado (300 ou 500 W.m^{-2}) durante períodos contínuos acima de determinado valor.

Esse modelo pretende estudar os dados, primeiramente, em formas de médias mensais, passando por histogramas da distribuição mensal nas diversas faixas de radiação solar e pela análise diária do maior período contínuo que a radiação solar ficou acima de um determinado valor, chegando, por último, à quantidade de minutos acumulados no mês. O objetivo adotado foi encontrar um método capaz de, através de gráficos, estimar as condições mínimas mensais de funcionamento, para que a unidade OR-FV desenvolvida satisfaça algumas premissas básicas, como o suprimento mínimo de água potável para a população.

Felizmente, as piores condições de radiação solar coincidem com a época chuvosa. Devido a isso, a unidade OR-FV deve ser dimensionada, considerando somente o pior caso do período seco. Os dados do período chuvoso devem servir de base para estudos da necessidade, caso a caso, de se implantar outros meios de obtenção de água potável, como as cisternas.

3.1.1. Estatística da radiação solar média diária

Na Figura 3.2, observa-se um comportamento suave da radiação solar média diária entre abril de 2003 e março de 2004, o que indica uma variação não abrupta dos níveis de radiação na passagem do período seco (julho a dezembro) para o período chuvoso (janeiro a junho) e vice-versa. O menor nível de radiação ocorreu em faixa intermediária do período chuvoso, no mês de fevereiro (2,97 kWh.m^{-2} por dia). Já o maior nível de radiação ocorreu em meados do período seco, no mês de setembro (6,56 kWh.m^{-2} por dia).

Alguns meses adicionais são mostrados na Figura 3.3 com o objetivo de comparação com a Figura 3.2. Os valores máximos e mínimos se encontraram em agosto (6,03 kWh.m^{-2} por dia) e março (4,37 kWh.m^{-2} por dia), respectivamente. Isso indica o comportamento semelhante de variação de radiação de ano para ano, embora os valores variem consideravelmente.

3.1.2. Estatística dos períodos contínuos máximos diários

Durante o período de medição, alguns dados foram perdidos, com isso, o mês mais completo e significativo para representar o período com os maiores índices de radiação solar foi setembro de 2001. Mês esse em que se observa uma relativa constância no período contínuo máximo que a radiação permanece acima de um determinado valor, muito embora apresente algumas variações bruscas; com destaque à ocorrência do dia 28 para o dia 29. A Figura 3.4 apresenta o período contínuo máximo ocorrido em cada dia deste mês. A título comparativo, a média diária em que a radiação permaneceu continuamente acima de 300 e 500 $W.m^{-2}$ foi de 369 e 225 minutos, respectivamente.

A Figura 3.5 mostra a mesma informação analisada, só que em fevereiro de 2004, mês que apresentou os piores índices de radiação solar. Neste gráfico, quando comparado ao anterior, pode-se notar a grande diferença que o período chuvoso causa na radiação solar. Analisando unidades que porventura necessitem de um funcionamento por um período superior a 200 min (3h20min) diários, teríamos como resultado somente 13 dos 29 dias com possibilidade de funcionamento pleno, isso utilizando sistemas que possuam 300 $W.m^{-2}$ como radiação solar mínima de funcionamento; para 500 $W.m^{-2}$ apenas 5 dias apresentariam estas condições.

A época do ano com os menores índices de radiação (fevereiro), felizmente, coincide com a época de maior precipitação de chuva do Ceará (janeiro a maio). Nesse período ocorre uma diminuição da necessidade do funcionamento da unidade de OR pela comunidade. O motivo se deve à fartura de água potável proveniente de outras fontes, como as cisternas. Mesmo assim, um estudo detalhado da necessidade de instalação de cisternas para garantir uma complementaridade no suprimento de água potável deve ser realizado e esses dados podem servir como base.

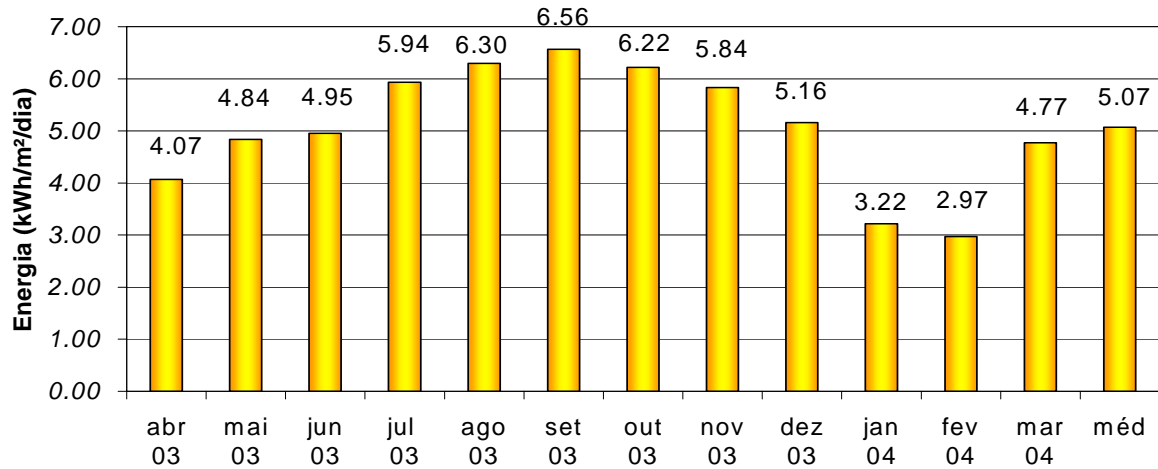


Figura 3.2 – Energia diária média entre abril de 2003 a março de 2004 em Fortaleza

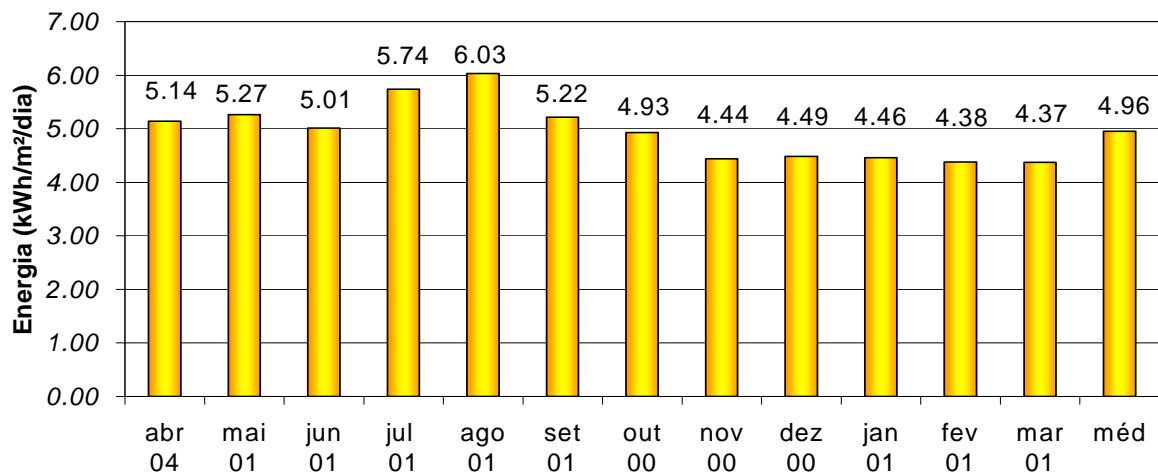


Figura 3.3 – Energia diária média para meses comparativos em Fortaleza

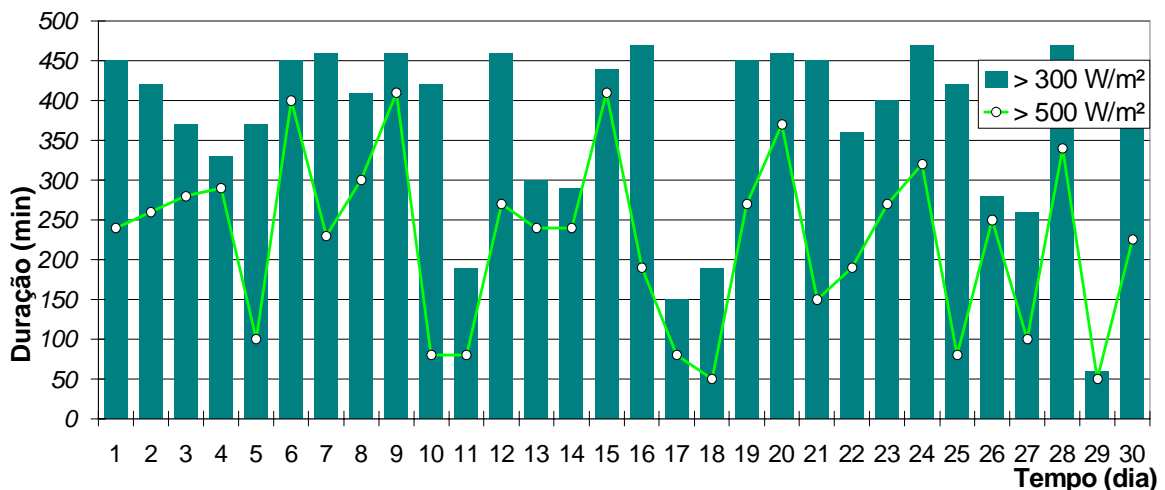


Figura 3.4 – Período contínuo de operação máximo em setembro de 2001 em Fortaleza

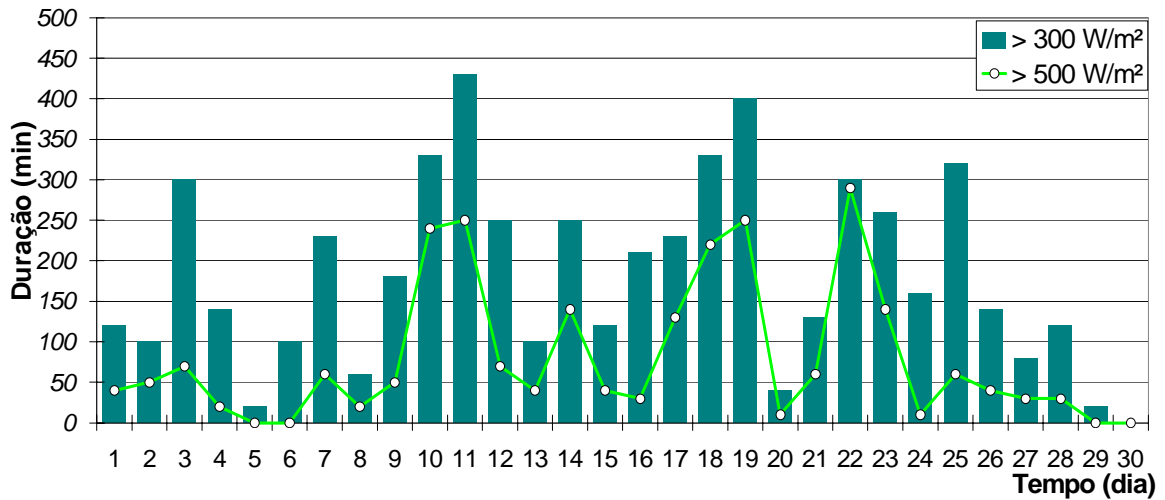


Figura 3.5 – Período contínuo máximo em fevereiro de 2004 em Fortaleza

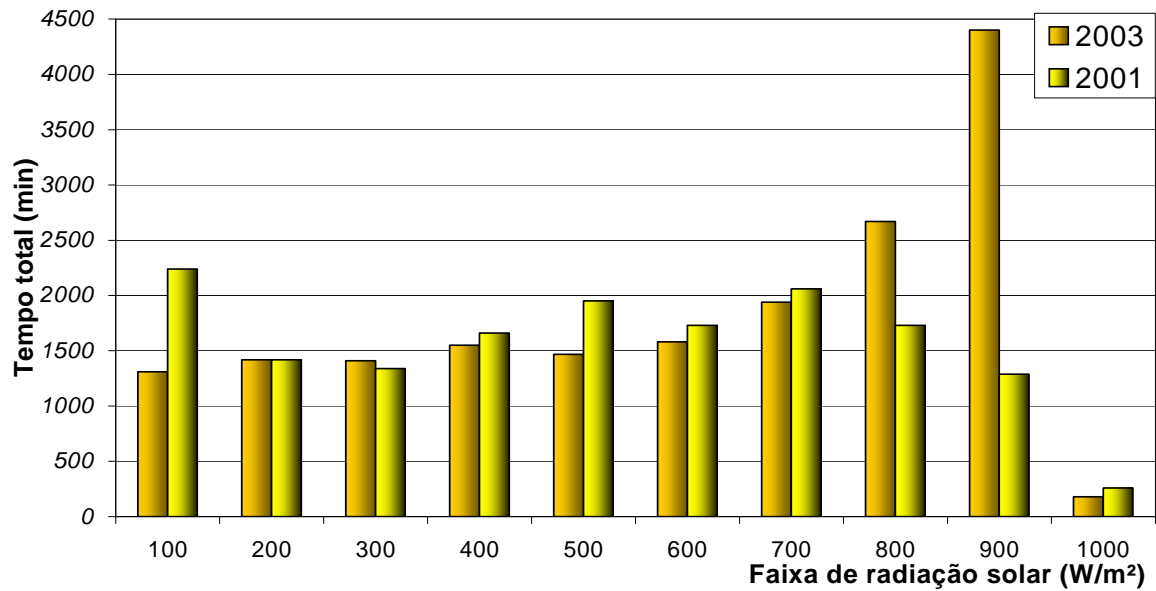


Figura 3.6 – Histograma de radiação solar em setembro de 2003 e 2001 em Fortaleza

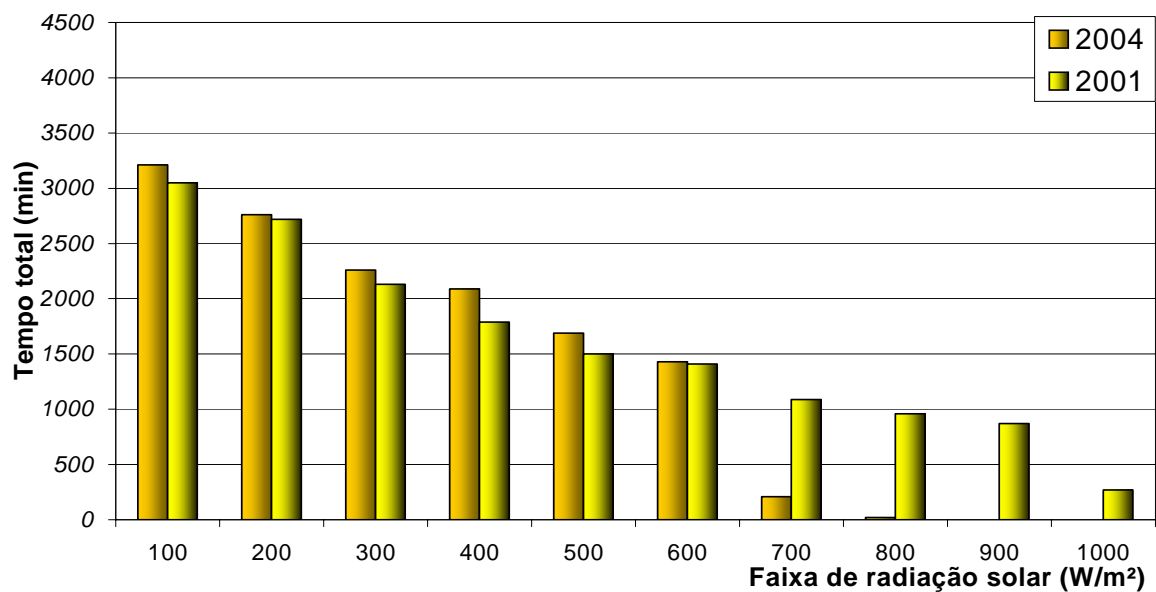


Figura 3.7 – Histograma de radiação solar em fevereiro de 2004 e 2001 em Fortaleza

Comparando ainda os meses analisados, fevereiro de 2004 e setembro de 2001, nota-se que, para uma radiação solar acima de 300 W.m^{-2} , somente em 7 dias houve período contínuo $\geq 300 \text{ min}$ (5h) em fevereiro, enquanto, no melhor mês, essa condição se apresentou em 23 dias. Para valores mínimos de radiação de 500 W.m^{-2} , somente 1 dia do mês de fevereiro apresentou esse período contínuo. Realizando análises comparativas como essa, salta-se aos olhos do investigador a grande disparidade entre as condições de operação dos diferentes períodos, na qual não são utilizadas baterias ou outro meio de armazenamento de energia.

3.1.3. Histogramas de radiação dos meses de fevereiro e setembro

Em setembro de 2003, a faixa com maior tempo acumulado é a de 900 a 1000 W.m^{-2} , ver Figura 3.6. Nesse mês há um crescimento suave do período total de cada faixa. Porém, em setembro de 2001, a concentração maior fica na faixa de 100 a 200 W.m^{-2} , e a distribuição é mais homogênea entre as faixas. Os dados de setembro de 2003 foram considerados demasiadamente diferentes dos outros meses, razão pela qual foram descartados em outras análises.

Em fevereiro de 2004, há uma distribuição decrescente entre as faixas, sendo a maior concentração na faixa de 100 a 200 W.m^{-2} (Figura 3.7). A radiação do mês de fevereiro de 2001 possui o mesmo comportamento, porém há presença de níveis de radiação mais elevados: enquanto em 2004 a incidência de radiação superior a 700 é praticamente inexistente, em 2001 as faixas acima de 700 W.m^{-2} mantiveram-se presentes, embora havendo um decréscimo de intensidade.

3.1.4. Estatística do período de funcionamento acumulado no mês

Em setembro de 2001 (Figura 3.8), verifica-se, nos dois níveis de radiação solar, um leve decaimento do período de funcionamento acumulado desde 10 min até 4:30, indicando que grande parte dos períodos contínuos de 10 min estendeu-se por mais de 4 h seguidas e, ainda, que boa parte permaneceu por mais de 7 h. Esse comportamento difere daquele de setembro de 2004, onde há quase uma constância da radiação solar de 10 min à 7h.

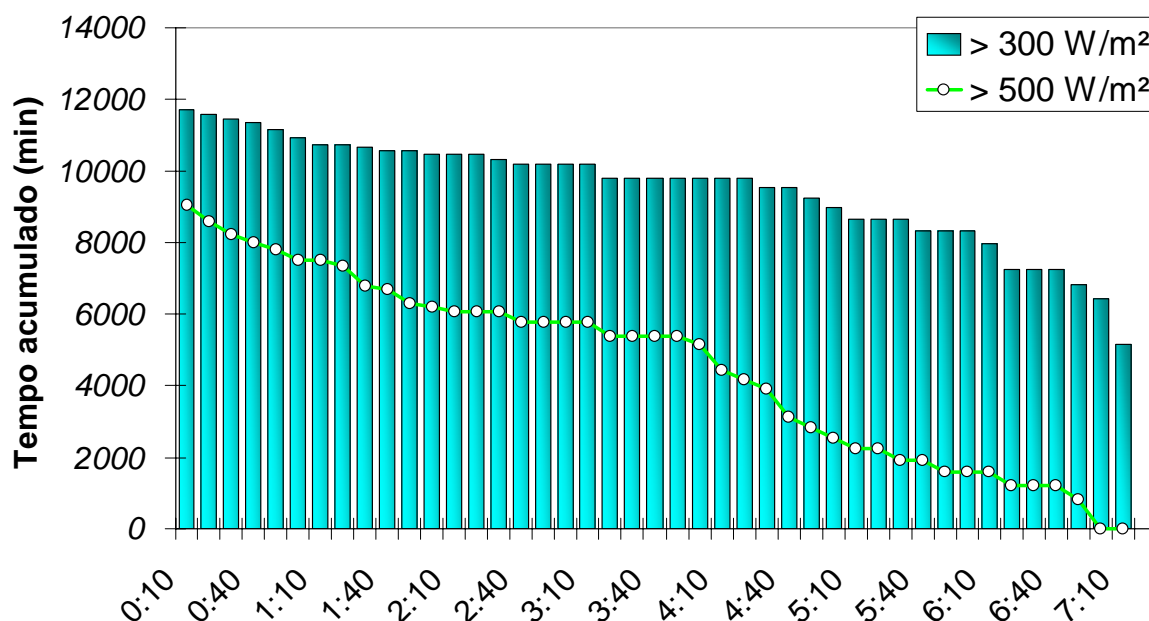


Figura 3.8 – Gráfico do período de funcionamento acumulado em setembro de 2001

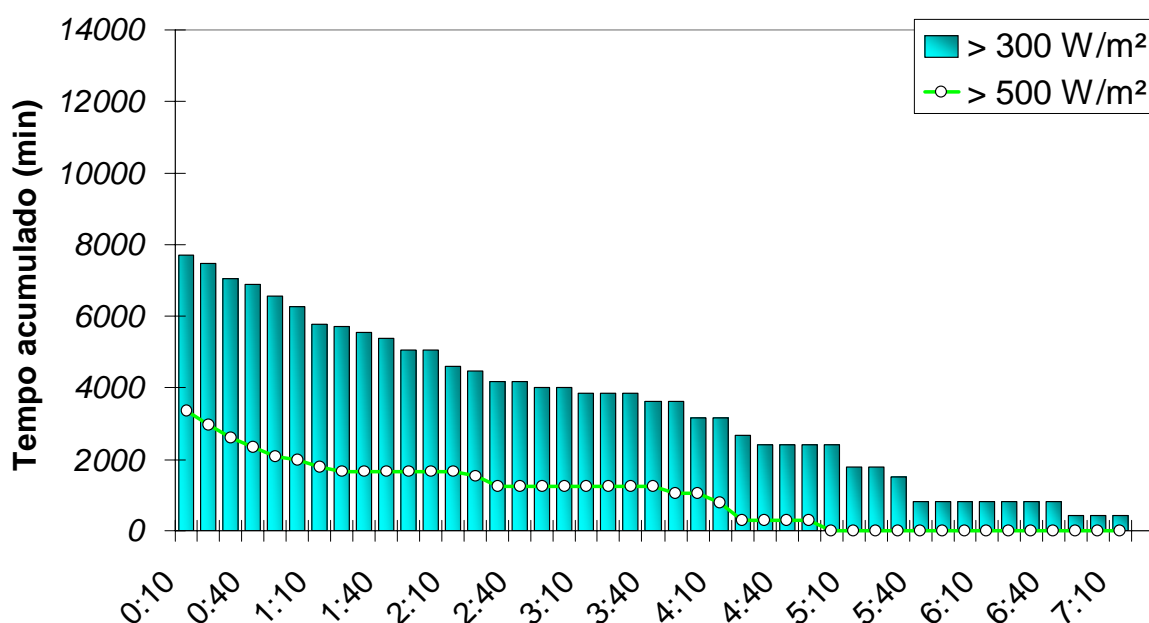


Figura 3.9 – Gráfico do período de funcionamento acumulado em fevereiro de 2004

Ainda em setembro de 2001, se tomarmos um mínimo de 2h de radiação contínua acima de 300 W.m⁻², teríamos um total de 10460 min. Se forem tomadas 5h de funcionamento contínuo, teríamos apenas 8960 min.

Para fevereiro de 2004, temos um comportamento decrescente mais acentuado e níveis mais baixos de radiação, conforme mostra a Figura 3.9. Nesse mês, temos um total de 5070 min de radiação acima de 300 W.m⁻² ininterruptamente por, no mínimo, duas horas; enquanto seriam acumulados

somente 2410 min, se fosse necessário um período de cinco horas contínuas. Observa-se um comportamento semelhante da curva que representa fevereiro de 2001, porém com níveis mais elevados de tempos de operação acumulados com radiação solar acima de 300 W.m^{-2} e níveis mais brandos para radiações acima de 500 W.m^{-2} , o que pode indicar uma variação no período de chuva interanual.

3.1.5. Análise dos gráficos para aplicação em unidades OR-FV

Unidades de OR foram fabricadas para uma operação ininterrupta. Entretanto, em condições reais, as membranas são ligadas e desligadas, algumas vezes ao dia. Pensando nisso e tomando como base informações de especialistas da área, estipulou-se um período mínimo de funcionamento diário de 240 min (4 h). Analisando as médias diárias de todos os meses com radiação solar acima de 300 W.m^{-2} , o único mês que não alcança, em média, essas premissas é o mês de fevereiro de 2004, pois em 2001 até fevereiro haveria, em média, mais de 4 h por dia de funcionamento contínuo. No entanto, como previsto, cisternas fariam a complementaridade no suprimento de água potável nesses meses, onde existe uma grande probabilidade de chuva.

Baseado neste período mínimo de funcionamento, pode-se estimar, a grosso modo, a produção diária mínima de 200 litros de água potável, isto se o sistema contar com uma membrana de 50 L.h^{-1} . Com esse montante seria possível suprir até 80 pessoas, considerando somente o consumo *in natura*, indicado pela literatura sobre nutrição, de 2,5 L de água potável por pessoa (MAHAN e ESCOTT-STUMP, 2002).

Os gráficos analisados no item 3.1.4, do tempo contínuo de operação acumulado no mês, mostram, principalmente, o potencial do local, em suportar um funcionamento mais homogêneo da carga, quando não se utilizam armazenadores de energia para equalizar a energia gerada pelos módulos FV.

A possibilidade de reduzir o número de paradas e ampliar o período de funcionamento da unidade OR-FV motivou a adoção de três módulos FV (165 Wp) e não apenas dois. Entretanto, essa escolha deve estar condicionada à utilização de um controlador para limitar a energia entregue ao motor, para não danificá-lo.

Alerta-se, ainda, ao devido cuidado, em se utilizar somente as médias mensais para realizar análises desse tipo, uma vez que essas mascaram muito a real condição a que o sistema está sujeito.

3.2. COMPONENTES PRINCIPAIS DA UNIDADE OR-FV DESENVOLVIDA

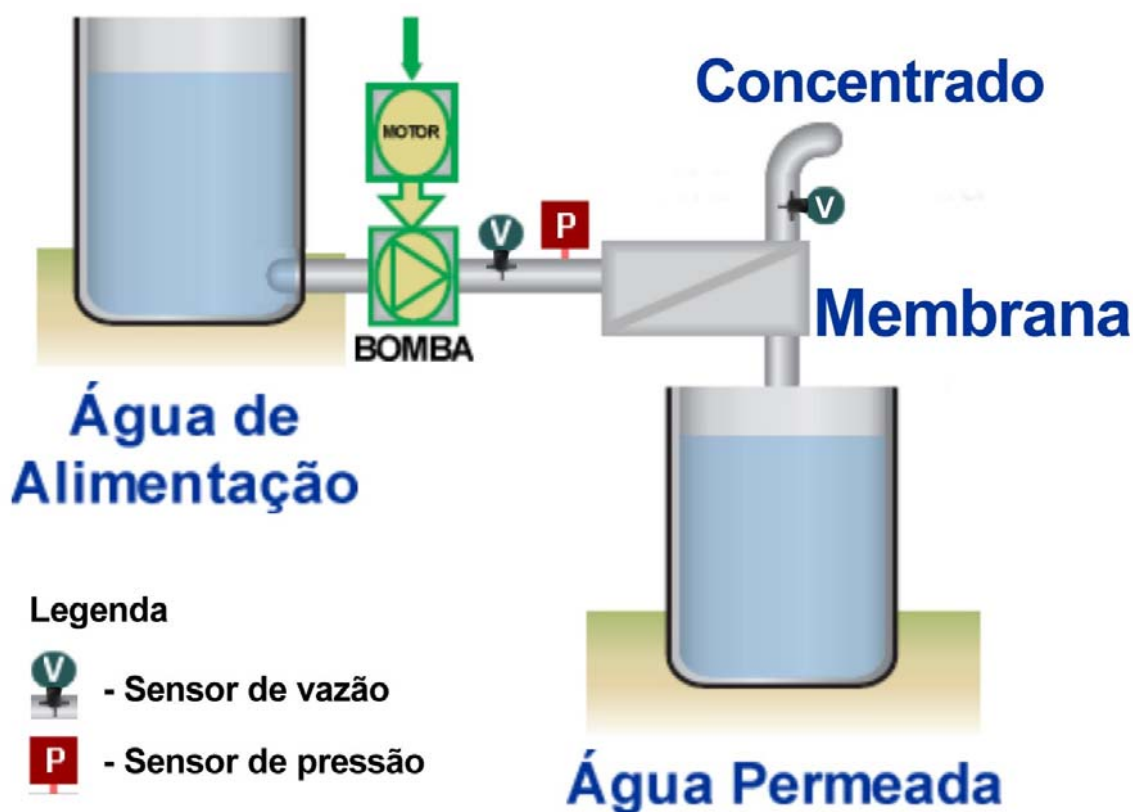


Figura 3.10 – Esquema hidráulico da unidade de osmose reversa

A unidade OR-FV desenvolvida consiste de um reservatório de água bruta, ou de alimentação, se for o caso da instalação de um sistema de pré-tratamento, outro reservatório para a água permeada, ou potável, caso seja aprovada pelas análises físico-químicas e bacteriológicas. Nesse entremeio, está alocado um motor-bomba que alimenta a membrana com pressão suficiente, superior à pressão osmótica, para permear a água através dela. Algumas grandezas hidráulicas foram medidas através de sensores de vazão, indicado com a letra V, e de pressão, letra P, conforme indicado pela Figura 3.10.

No sentido de aproveitar de maneira mais racional a energia solar, diversas possibilidades de controle do processo foram propostas, segue-se o detalhamento dos três esquemas de ligação imaginados:

- a) Esquema 1: geração FV ligado diretamente ao motor-bomba da unidade de OR com controle hidráulico da pressão através de uma válvula no concentrado;
- b) Esquema 2: geração FV ligado diretamente ao motor-bomba da unidade de OR com um controle (conversor CC-CC), ligado em paralelo para remanejar a energia excedente para a bomba do poço;
- c) Esquema 3: utilização de um conversor CC-CC entre a geração FV e o motor-bomba da unidade de OR, possibilitando seguir o ponto de máxima potência.

Todos os esquemas vistos propõem a utilização de uma capacidade extra de geração, no caso 3 módulos FV ao invés de 2, em conformidade com o que foi analisado no item anterior. Cada um deles apresenta prós e contras que devem ser quantificados para a escolha da melhor opção. Os esquemas que não possuem controle entre a geração e a carga, como os Esquemas 1 e 2, apresentam perdas reduzidas. No entanto, o Esquema 3, Figura 3.11, se apresentou com maior possibilidade de aplicação por possibilitar o seguimento da máxima potência gerada pelo arranjo FV e assim dispor de mais energia ao motor, principalmente em momentos de baixa radiação solar. Diversas grandezas elétricas foram medidas no presente estudo, como a tensão e a corrente tanto na entrada, como na saída do conversor.

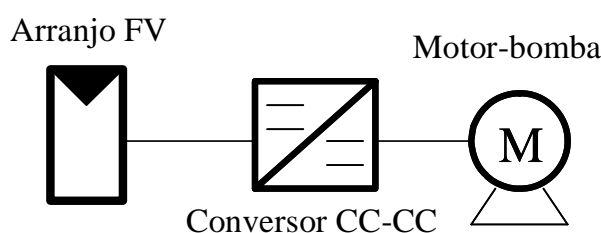


Figura 3.11 – Esquema elétrico da unidade OR-FV desenvolvida

3.2.1. Motor-bomba de diafragma

As bombas, normalmente, são classificadas pela forma com que a energia é entregue ao fluido. Nesse sentido, chamam-se bombas dinâmicas ou turbobombas as que geram a movimentação do fluido por meio de forças que se desenvolvem na massa líquida, em consequência da rotação de uma roda (impelidor) com certo número de pás especiais. Dentro dessa classificação, as

bombas centrífugas são as mais difundidas em unidades de osmose reversa e se caracterizam por entregar uma energia majoritariamente centrífuga ao fluido. Essas bombas possuem uma excelente robustez e um relativo baixo custo, entretanto, apresentam um elevado conjugado de partida. Esse conjugado, em unidades acionadas por módulos fotovoltaicos sem baterias, reduz a eficiência dessas bombas com o aumento da pressão.

O motor-bomba de diafragma tem se revelado uma alternativa em instalações, onde alta pressão e relativa baixa vazão são necessárias, como em unidades OR-FV (MAYER; BECHTELER; BUCHER, 1994). Essa bomba é classificada como volumétrica ou de deslocamento positivo, na qual a energia é fornecida ao fluido sob a forma de pressão através da movimentação de um órgão mecânico da bomba, obrigando-o a executar o mesmo movimento. Esse movimento do diafragma, continuamente, enche e expelle um determinado volume no interior da bomba com o fluido. As principais características dessas bombas são (MATTOS e FALCO, 1998):

- a) baixa vazão e alta pressão;
- b) vazão pulsátil;
- c) vazão média independente das características do sistema;
- d) rotação permissível proporcional à viscosidade;
- e) necessidade de válvula de alívio na linha de descarga, essa válvula deve estar junto à bomba e antes de qualquer outra válvula.

A característica mais marcante dessas bombas é o fato de manterem a vazão média praticamente constante, muito embora, na realidade, o rendimento volumétrico e conseqüentemente a vazão sofram pequena variação em função da pressão de trabalho e da viscosidade do fluido bombeado, mesmo mantendo a rotação constante.

Na bomba de diafragma, o órgão que fornece a energia ao líquido é uma membrana (diafragma) acionada por uma haste com movimento alternativo, ver Figura 3.12.

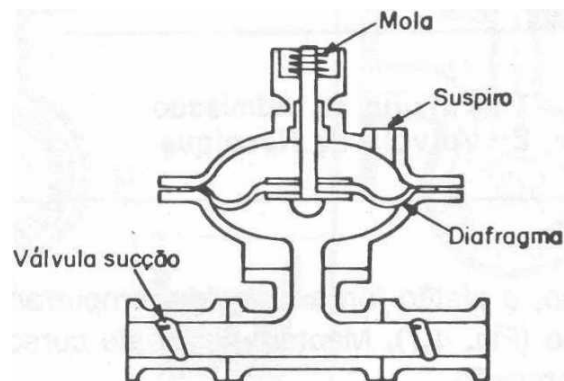


Figura 3.12 – Característica construtiva da bomba de diafragma
Fonte: MATTOS e FALCO, 1998

A cada movimento da haste, o diafragma se movimenta de tal modo que, em um sentido a pressão da câmara seja reduzida, fazendo a admissão de um determinado volume do fluido e em sentido oposto, esse volume é descarregado na linha de recalque.

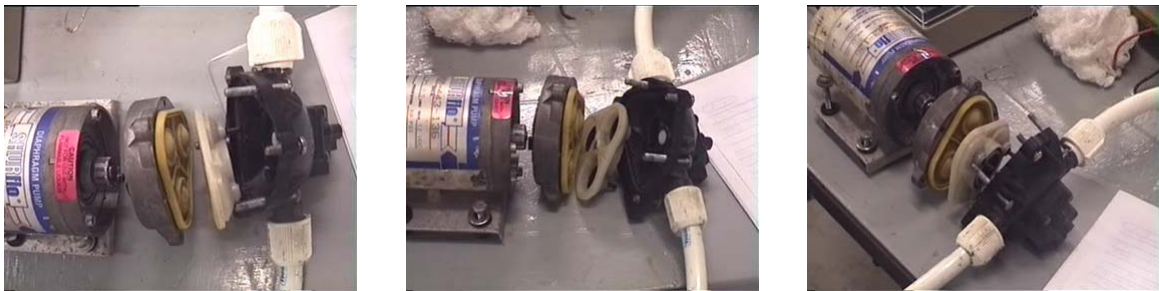


Figura 3.13 – Vistas superior, lateral e frontal do motor-bomba utilizado

O motor-bomba utilizado no presente estudo é composto por um motor CC de imã permanente, que é conectado à bomba através de um eixo excêntrico. Esse eixo excêntrico provoca a vibração de 3 diferentes membranas, que produzem uma pressão mais constante e contínua do que no caso de apenas uma. As vistas superior, lateral e frontal do modelo 8000-443-236, fabricado pela Schurflo Ltd, podem ser vistas na Figura 3.13. Esse motor possui as seguintes especificações técnicas: alimentação em corrente contínua 12 V, potência máxima desenvolvida no eixo de 0,1 HP e uma pressão máxima de 400 kPa a uma vazão de 270 L.h⁻¹. As equações que regem esse tipo de motor podem ser descritas por (COLANGELO et al., 1999):

$$V_0 = Km.\omega + Ra.Ia \quad (3.2)$$

$$T_e = Km.Ia \quad (3.3)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_e - T_{vazio} - T_{carga}}{J} \quad (3.4)$$

sendo V_0 a tensão de entrada do motor ou de saída do conversor CC-CC [V], R_a a resistência de armadura [Ω], I_a a corrente de armadura [A], ω a velocidade angular [rad/s], K_m a constante do motor [N.m/A], T_e , T_{vazio} , T_{carga} são os torques: elétrico, vazio e o da carga [N.m]; e J a inércia total do motor [kg.m²].

É de conhecimento que as bombas volumétricas apresentam uma relação quase linear entre a rotação do motor e a vazão (COLANGELO et al., 1999). Entretanto, na simulação desenvolvida, a equação que apresentou o menor erro foi:

$$Q = k_1 \cdot \omega^2 \quad (3.5)$$

onde k_1 é uma constante adimensional empírica, no caso $8,8 \cdot 10^{-7}$. Essa relação ao quadrado se apresenta como uma tentativa de forçar o modelo a estabilizar a rotação do motor. Para o cálculo da pressão foi considerada a seguinte equação que relaciona a potência elétrica absorvida pelo motor-bomba Pot_e , a vazão e a altura manométrica H (COLANGELO et al., 1999):

$$Pot_e = \frac{p \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_p} \quad (3.6)$$

onde p , g e η_p são constantes e representam a densidade da água, a aceleração da gravidade e o rendimento total do motor-bomba, respectivamente. Essa equação só é válida para uma pressão constante, apesar disso, como a simulação possui uma iteração na ordem de milissegundos, a pressão pode, sem perda de generalidade, ser considerada constante. A pressão pode ser calculada por:

$$P = \gamma \cdot H \quad (3.7)$$

sendo γ o peso específico. Essas considerações resultam em:

$$Pot_e = V_0 \cdot I_a = \frac{p \cdot g \cdot Q \cdot P}{\eta_p \cdot \gamma} \quad (3.8)$$

Isolando a pressão P e substituindo todas as constantes por k_2 , tem-se:

$$k_2 = \frac{\eta_p \cdot \gamma}{p \cdot g} \quad (3.9)$$

$$P = \frac{k_2 \cdot V_0 \cdot I_a}{Q} \quad (3.10)$$

sendo essa última equação que possibilita o cálculo da pressão em função da corrente e tensão de alimentação do motor e da vazão de alimentação.

Uma característica marcante, observada do ponto de vista elétrico, é a variação da corrente de alimentação desse motor-bomba de diafragma, como ilustra a Figura 3.14. O eixo das ordenadas apresenta a corrente, em escala de tensão, devido à ponteira de corrente, na escala de 100 mV.A⁻¹. O eixo das abscissas mostra o tempo, com a resolução de 2 ms. Interessante notar a ordem de grandeza da amplitude e da frequência da oscilação, que chega a 40 % da corrente média e 360,5 Hz, respectivamente. Trata-se, no entanto, de um reflexo das características construtivas dessa bomba com 3 diafragmas, uma vez que a corrente de alimentação muda a cada ciclo da bomba.

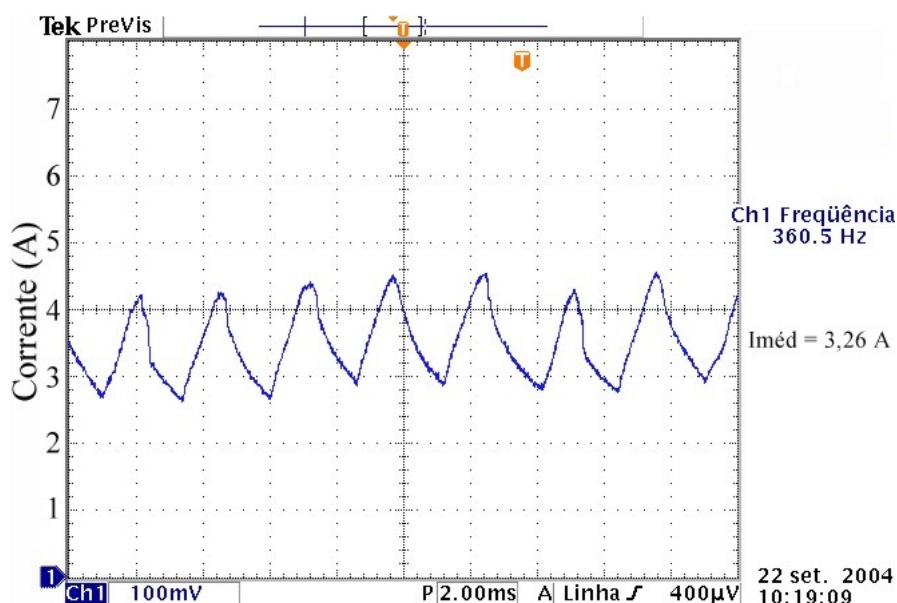


Figura 3.14 – Medições do osciloscópio da corrente de alimentação do motor-bomba

3.2.2. Membrana de osmose reversa

Embora não se tenha trabalhado com a membrana de OR na prática, um modelo matemático foi implementado e validado de acordo com um programa computacional chamado ROSA[®].

Henne (1980) trabalhou com uma descrição matemática, conhecida como o modelo de soluções difusas, para descrever o transporte de materiais através de membranas de OR.

Deste modelo obtém-se a seguinte equação para o fluxo específico de água, V_w , dado em $\left[\frac{m^3/s}{m^2} \right]$:

$$V_w = A.(p_a - \Delta\pi) \quad (3.11)$$

Com a seguinte pressão osmótica, $\Delta\pi$:

$$\Delta\pi = b.(w_m - w_p) \quad (3.12)$$

E o fluxo específico de sal, V_s , é dado por:

$$V_s = B.(w_m - w_p) \quad (3.13)$$

onde b é uma constante da pressão osmótica, w_m a concentração de sais na superfície da membrana, w_p no permeado e p_a é a pressão de alimentação. As constantes da membrana A e B estão inter-relacionadas com a temperatura e a pressão. Quanto à influência da temperatura, Rautenbach e Albrecht (1981) levantaram as seguintes equações:

$$A = A_0.e^{\alpha_T \frac{T-T_0}{T_0}} \quad (3.14)$$

$$B = B_0.e^{\beta_T \frac{T-T_0}{T_0}} \quad (3.15)$$

onde T_0 é 293 K, $\alpha_T = 7,08$ e $\beta_T = 3,0$, sendo todas constantes levantadas empiricamente. O fluxo de permeado aumenta a uma taxa de 2 % a cada grau de temperatura elevado (BOEDDEKER, 1984). A influência de A e B pela pressão é descrita por:

$$A = A_0.e^{\alpha_p \frac{\Delta p}{p_0}} \quad (3.16)$$

$$B = B_0.e^{\beta_p \frac{\Delta p}{p_0}} \quad (3.17)$$

onde $p_0 = 100$ kPa, $\alpha_p = -0,004$ e $\beta_p \cong 0$, demonstrando que a influência da pressão no fluxo de sais, ou em B , é muito pequena.

3.2.3. Módulos fotovoltaicos

Diversas células fotovoltaicas são associadas em série e em paralelo para formar um módulo fotovoltaico. Um módulo fotovoltaico formado de células de silício monocristalino normalmente apresenta de 28 a 40 células associadas em série, já o silício policristalino geralmente possui 36, enquanto o silício amorfo

apresenta de 27 a 28 (CRESESB, 1999). O conjunto de módulos forma o arranjo FV, conforme pode ser visto na Figura 3.15.

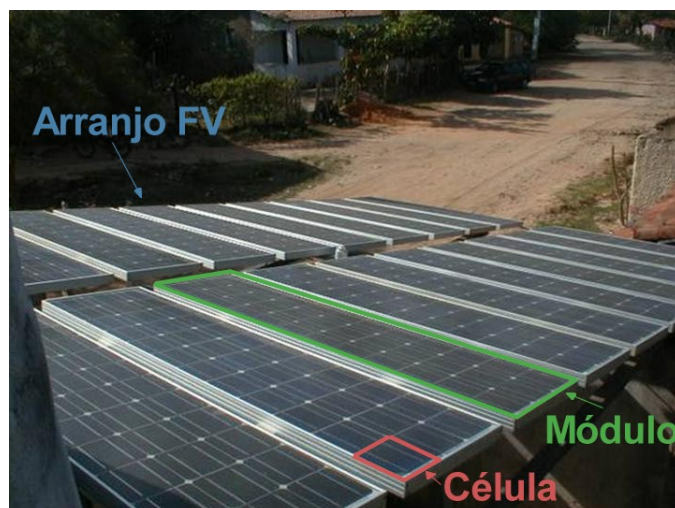


Figura 3.15 – Célula, módulo e arranjo fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico normalmente é simplificado como um conjunto de células fotovoltaicas iguais, trabalhando sobre a mesma radiação e temperatura. Entretanto, quando acontece de uma ou mais células estarem danificadas ou estarem submetidas a uma radiação inferior às demais, como no caso de um sombreamento por um galho de árvore, ocorre a geração de pontos quentes. Isso ocorre, porque a célula mal iluminada ou com defeito encontra-se polarizada inversamente, passando a funcionar como carga. A célula não foi fabricada para dissipar essa energia e, quando a temperatura na célula supera os 85 °C, corre-se o risco de diminuir a vida útil ou mesmo danificar irreversivelmente o módulo fotovoltaico. A solução, normalmente proposta, é a conexão de diodos de passos em paralelo com grupos de células em série. O módulo FV utilizado no presente estudo foi o modelo SM55, de 55 Wp, fabricado pela Siemens Solar, o mesmo apresentado na Figura 3.15.

Quanto ao casamento entre o arranjo FV e o motor-bomba de diafragma, a literatura recomenda a instalação de um conversor CC-CC, para ajustar o ponto de operação, possibilitando assim a partida do motor (CRESESB, 1999). Isso se deve à elevada potência de partida das bombas volumétricas (MAYER; BECHTELER; BUCHER, 1994). Outro ponto que indica a utilização de conversores é a possibilidade de filtrar a variação da corrente de alimentação desses motores-bombas, como vista na Figura 3.14.

3.3. CONVERSOR CC-CC ABAIXADOR (BUCK)

3.3.1. Introdução às fontes chaveadas

O advento das chaves estáticas, especificamente o transistor, em 1947, revolucionou os circuitos elétricos, possibilitando um significativo aumento na velocidade de processamento e na redução de manutenção ocasionada pelas antigas partes móveis dos relés e válvula. Sabe-se, entretanto, que a escolha da topologia e do semicondutor adequado é fator indispensável para a criação de projetos viáveis e concisos.

Uma dificuldade, existente nos circuitos de corrente contínua, sempre foi a adaptação eficiente dos níveis de tensão e de corrente gerados aos requeridos, sem, com isso, acarretar muitas perdas. Dessa necessidade, surgiram os conversores CC-CC, que hoje possuem algumas topologias conhecidas e estudadas como a base para novos circuitos.

Apresenta-se a seguir a topologia básica do conversor CC-CC abaixador, que realiza a função de, a partir de uma fonte de tensão na entrada, fornecer uma tensão de valor inferior na saída. Outras soluções são apresentadas na teoria, para reduzir a tensão de entrada, entretanto, o conversor CC-CC abaixador se apresenta como uma das mais simples e confiáveis topologias, devido, basicamente, ao reduzido número de componentes.

3.3.2. Princípio de funcionamento

O conversor CC-CC abaixador (*Buck*) tem a propriedade de redução da tensão de saída em relação à tensão de entrada, mantendo a mesma polaridade. Isso se faz, controlando-se os períodos de condução e de bloqueio da chave CH. O ruído gerado para a saída é baixo, devido ao circuito LC, que forma um filtro passa baixa. A fonte de tensão da entrada deve fornecer pulsos de corrente, configurando um ruído para a alimentação de entrada.

Considerando os semicondutores como chaves ideais, pode-se descrever o funcionamento do conversor CC-CC abaixador em duas etapas: a primeira, quando a chave CH está conduzindo e a segunda, bloqueada.

Primeira Etapa: chave fechada

No momento em que a chave CH entra em condução (Figura 3.16), a energia da fonte se transfere para o indutor, para o capacitor e também supre a carga. Durante esse período, o diodo, d, está inversamente polarizado, não influenciando no circuito. A chave permanece fechada por um período t_T , como pode ser visto na Figura 3.18c. Esse tempo de condução, t_T , pode ser definido como $D.T$, sendo T o período de chaveamento, ou o inverso da frequência de chaveamento, e D a razão cíclica.

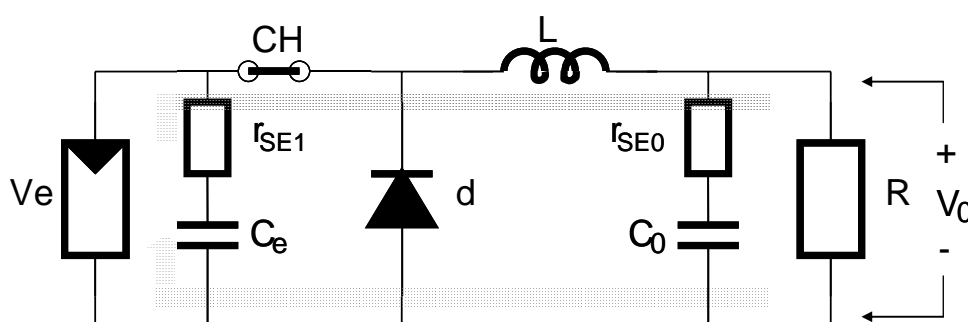


Figura 3.16 - Conversor CC-CC abaixador com a chave fechada

Segunda Etapa: chave aberta

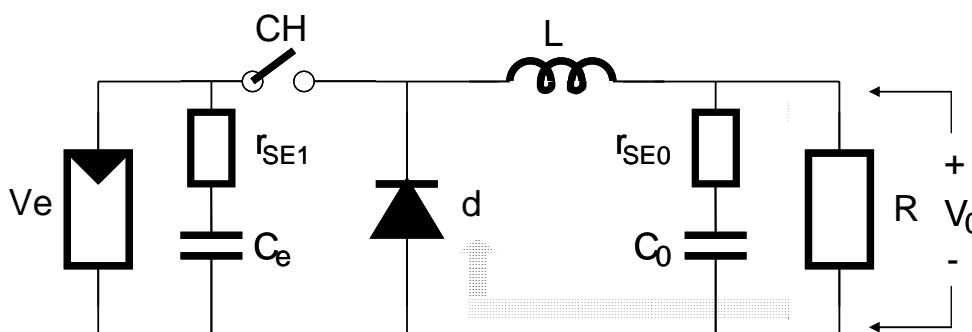


Figura 3.17 - Conversor CC-CC abaixador com a chave aberta

Quando a chave CH é aberta (Figura 3.17), o diodo começa sua condução, formando um caminho, para que a energia armazenada no indutor L seja entregue ao capacitor e à carga. Enquanto o valor instantâneo da corrente do indutor for superior à corrente da carga, o capacitor se carrega. Quando essa corrente for menor, o capacitor se descarrega, procurando manter constante a corrente da carga i_0 , ver Figura 3.18a. A tensão a ser suportada, tanto pela chave como pelo diodo, é igual à tensão de entrada V_e (MELLO, 1996).

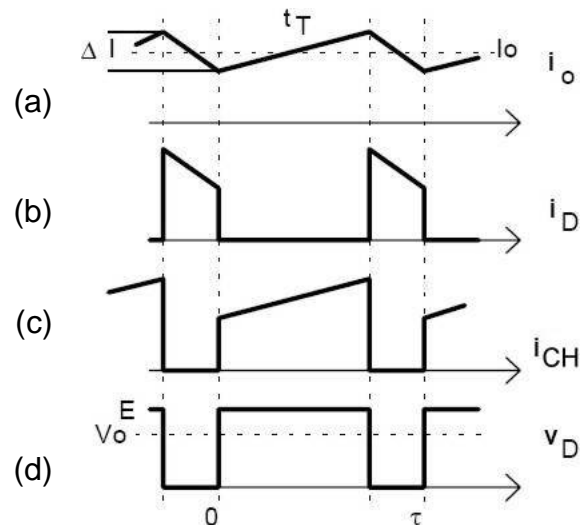


Figura 3.18 – Formas de onda típicas no modo de condução contínua
Fonte: POMILIO, 2004

Diz-se que o circuito opera de modo contínuo, se a corrente do indutor não cai a zero durante a condução do diodo. Caso contrário, tem-se o modo descontínuo.

3.3.3. Projeto do conversor CC-CC abaixador

O conversor CC-CC atua como interface entre o arranjo FV e a carga, permitindo que o sistema fotovoltaico opere em máxima potência. As características esperadas do projeto são:

- Freqüência e período de chaveamento, $F = 50 \text{ kHz}$, $T = 20 \text{ } \mu\text{s}$;
- Tensão máxima na entrada, $V_e = 17 \text{ V}$;
- Ondulação na tensão de entrada, $\Delta V_e = 0,1 \text{ V}$;
- Tensão controlada na saída, $V_o = 12 \text{ V}$;
- Ondulação na tensão de saída, $\Delta V_o = 0,1 \text{ V}$;
- Corrente de saída, $I_o = 8 \text{ A}$;
- Ondulação na corrente de saída, $\Delta I_{m\acute{a}x} = 0,8 \text{ A}$

Como a tensão de saída é menor que a entrada, o conversor escolhido é o abaixador. Nessa topologia, a relação entre a tensão de saída e a de entrada é igual à razão cíclica D , ou seja:

$$D = \frac{V_o}{V_e} = \frac{12}{17} = 0,706 \quad (3.18)$$

Cálculo da indutância L

A indutância crítica, ou a mínima indutância, para que o conversor opere em modo contínuo, pode ser calculada pela equação (POMILIO, 2004):

$$L_{cr} = \frac{D \cdot (V_e - V_0) \cdot T}{2 \cdot I_0} = 4,412 \mu H \quad (3.19)$$

A indutância crítica não garante que a ondulação máxima na corrente de saída seja respeitada. Nesse sentido a indutância mínima necessária para satisfazer as especificações foi calculada e é dada por:

$$L_{min} = \frac{V_e}{4 \cdot F \cdot \Delta I_{max}} = 106,25 \mu H \quad (3.20)$$

A indutância confeccionada foi de $L_{pr} = 110 \mu H$.

Cálculo da capacitância de saída C_0

A capacitância mínima para garantir a oscilação de tensão de saída especificada é dada pela relação (POMILIO, 2004):

$$C_0 = \frac{(V_e - V_0) \cdot D \cdot T^2}{8 \cdot \Delta V_0 \cdot L_{pr}} = 160,5 \mu F \quad (3.21)$$

Muitas vezes o limitante para a ondulação da tensão não é a capacitância, mas sim a resistência série equivalente (R_{se}) do capacitor. Tal resistência produz uma queda de tensão que se soma à queda na capacitância, podendo ser dominante. O cálculo do $R_{se_{max}}$ pode ser dado por:

$$R_{SE_{max}} = \frac{\Delta V_0}{\Delta I_{max}} = 0,125 \Omega \quad (3.22)$$

O capacitor utilizado foi de 3300 μF , disponível em laboratório e com R_{se} compatível, 0,08 Ω . Esse capacitor suporta uma ondulação máxima de corrente de 1,6 A, bem superior aos 0,8 A (ΔI_{max}) projetados.

Frequência de ressonância do filtro de saída

A frequência de ressonância do filtro de saída é calculado por:

$$f_{RE0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{pr} \cdot C_0}} = 264 \text{ Hz} \quad (3.23)$$

Especificação do diodo

A corrente média no diodo é:

$$I_D = (1 - D) \cdot I_0 = 2,35 \text{ A} \quad (3.24)$$

A corrente eficaz no diodo é:

$$i_{D \text{ RMS}} = I_0 \cdot \sqrt{(1 - D)} = 4,34 \text{ A} \quad (3.25)$$

A tensão máxima reversa sobre o diodo é igual à tensão máxima na entrada, V_e , ou 17 V.

O diodo especificado, modelo MUR460 disponível em laboratório, é classificado como ultra-rápido, isto é, possui reduzido tempo de recuperação. Ele apresenta uma resistência térmica da junção para o ambiente de $28 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$. A tensão de condução máxima esperada é de 1,05 V. Conseqüentemente, a potência máxima a ser dissipada é de 2,47 W, o que elevaria a temperatura de junção a aprox. $110 \text{ }^\circ\text{C}$. A temperatura máxima da junção desse componente é de $175 \text{ }^\circ\text{C}$, justificando a ausência de dissipadores.

Especificação da chave CH

A corrente média na chave é dada por:

$$I_D = D \cdot I_0 = 5,65 \text{ A} \quad (3.26)$$

A corrente eficaz na chave pode ser calculada por:

$$i_{CH \text{ RMS}} = I_0 \cdot \sqrt{D} = 6,72 \text{ A} \quad (3.27)$$

A chave utilizada foi um MOSFET, modelo IRFZ44N, que suporta a tensão da fonte e 49 A de corrente. Ele apresenta uma resistência térmica da junção para o ambiente de $62 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$. Entretanto, a potência dissipada em condução é de aprox. 0,56 W, o que eleva a temperatura da chave para cerca de $75 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cálculo da capacitância de entrada C_e

A capacitância mínima para garantir a oscilação de tensão de entrada especificada é dada pela relação (BARBI e MARTINS, 2000):

$$C_e = \frac{I_0 \cdot D \cdot (1 - D)}{\Delta V_e \cdot F} = 3321 \mu F \quad (3.28)$$

Entretanto, esse capacitor deve suportar uma corrente eficaz de 6,7 A, conforme (3.27). Devido a isso, o capacitor adotado foi 4x 4700 μF , disponível em laboratório e capaz de suportar até 8 A.

3.3.4. Modelo espaço de estados instantâneos do conversor CC-CC

Primeira Etapa $[t_0, t_1]$: Chave fechada

A Figura 3.16 mostra o circuito com a chave CH fechada. Nessa etapa, o diodo fica polarizado reversamente, não influenciando no circuito. A corrente da carga é igual à diferença da corrente que passa pelo indutor i_L com a do capacitor de saída C_0 :

$$i_0 = i_L - i_{C_0} \quad (3.29)$$

A corrente no capacitor de saída C_0 é dada por:

$$i_{C_0} = C_0 \cdot \frac{dv_{C_0}}{dt} \quad (3.30)$$

Substituindo (3.30) em (3.29), e isolando a derivada da tensão no capacitor de saída, tem-se:

$$\frac{dv_{C_0}}{dt} = \frac{i_L}{C_0} - \frac{v_0}{R \cdot C_0} \quad (3.31)$$

A malha de tensão de saída pode ser descrita como:

$$v_0 = r_{SE0} \cdot C_0 \cdot \frac{dv_{C_0}}{dt} + v_{C_0} \quad (3.32)$$

Substituindo (3.32) em (3.31), tem-se:

$$\frac{dv_{C_0}}{dt} = \frac{i_L \cdot R - v_{C_0}}{C_0 \cdot (R + r_{SE0})} \quad (3.33)$$

A corrente de entrada, i_E , é dada como a soma da corrente no capacitor de entrada e o indutor:

$$i_E = i_{C_e} + i_L \quad (3.34)$$

Derivando a tensão do capacitor de entrada C_e , no tempo, tem-se:

$$\frac{dv_{C_e}}{dt} = \frac{i_{C_e}}{C_e} = \frac{i_E - i_L}{C_e} \quad (3.35)$$

A tensão de entrada, v_e , pode ser calculada pela soma da tensão no capacitor de entrada com a queda de tensão no resistor em série, r_{SE1} .

$$v_e = v_{C_e} + r_{SE1} \cdot i_{C_e} \quad (3.36)$$

A derivada da corrente no indutor, no tempo, é calculada como a razão da diferença de potencial pela indutância:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_0 - v_e}{L} = \frac{v_0 - v_{C_e} - r_{SE1} \cdot i_{C_e}}{L} \quad (3.37)$$

Substituindo (3.33) em (3.32) e o resultado em (3.37), tem-se:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{i_L \cdot (r_{SE0} \cdot R + r_{SE1} \cdot R + r_{SE1} \cdot r_{SE0}) + v_{C0} \cdot R - v_{C_e} \cdot (R + r_{SE0}) - i_E \cdot r_{SE1} \cdot (R + r_{SE0})}{L \cdot (R + r_{SE0})} \quad (3.38)$$

Segunda Etapa $[t_1, t_2]$: Chave aberta

A abertura da chave, CH, faz com que a corrente da fonte, i_E , seja igual à corrente no capacitor de entrada, i_{C_e} . O diodo se polariza diretamente, conduzindo e apresentando uma queda de tensão sobre ele v_d , ver circuito da Figura 3.17.

Derivando-se a tensão do capacitor de entrada, v_{C_e} , no tempo, tem-se:

$$\frac{dv_{C_e}}{dt} = \frac{i_E}{C_e} \quad (3.39)$$

A malha de tensão entre o capacitor de saída e a carga permanece a mesma da primeira etapa, resultando na mesma equação da derivada da tensão do capacitor de saída no tempo (3.33).

Derivando a corrente do indutor, L, no tempo, tem-se:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_0 + v_d}{L} \quad (3.40)$$

Substituindo (3.33) em (3.32) e o resultado em (3.40), tem-se:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{i_L \cdot R \cdot r_{SE0} + v_{C0} \cdot R}{(R + r_{SE0})L} + \frac{v_d}{L} \quad (3.41)$$

Resultados em equações de estado

Primeira Etapa $[t_0, t_1]$: Chave fechada

$$\begin{pmatrix} diL \\ dvCO \\ dvCe \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \frac{R \cdot rSE0}{(R + rSE0) \cdot L} + \frac{rSE1}{L} & \frac{R}{(R + rSE0) \cdot L} & \frac{-1}{L} \\ \frac{R}{C0 \cdot (R + rSE0)} & \frac{-1}{C0 \cdot (R + rSE0)} & 0 \\ \frac{-1}{Ce} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} iL \\ vCO \\ vCe \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{-rSE1}{L} \\ 0 \\ \frac{1}{Ce} \end{pmatrix} \cdot iE \quad (3.42)$$

Segunda Etapa $[t_1, t_2]$: Chave aberta

$$\begin{pmatrix} diL \\ dvCO \\ dvCe \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \frac{R \cdot rSE0}{(R + rSE0) \cdot L} & \frac{R}{(R + rSE0) \cdot L} & 0 \\ \frac{R}{C0 \cdot (R + rSE0)} & \frac{-1}{C0 \cdot (R + rSE0)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} iL \\ vCO \\ vCe \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{Ce} \end{pmatrix} \cdot iE + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot vd \quad (3.43)$$

Modelo espaço de estados instantâneo

Resolver as equações de estado que variam no tempo, como é o caso do apresentado em (3.42) e (3.43), se torna muito complicado. No entanto, como os conversores atuam com chaves que comutam entre aberto e fechado, nota-se, que o que muda no tempo é a topologia do circuito.

A solução adotada é adicionar uma função $q(t)$, que representa o estado da chave CH (MELLO, 1996). Quando uma equação é válida somente para o intervalo em que a chave permanece conduzindo, ou na primeira etapa, deve-se multiplicar pela função $q(t)$. Equações que existem somente na segunda etapa, devem ser multiplicadas por $q(t)-1$, como se faz com a razão cíclica. Deve-se considerar integralmente as equações que são válidas para todo o período T.

Aplicando a função $q(t)$ às equações (3.42) e (3.43), têm-se as seguintes equações de estado instantâneo:

$$\begin{pmatrix} diL \\ dvCO \\ dvCe \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \frac{R \cdot rSE0}{(R + rSE0) \cdot L} + \frac{q(t) \cdot rSE1}{L} & \frac{R}{(R + rSE0) \cdot L} & \frac{-q(t)}{L} \\ \frac{R}{C0 \cdot (R + rSE0)} & \frac{-1}{C0 \cdot (R + rSE0)} & 0 \\ \frac{-q(t)}{Ce} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} iL \\ vCO \\ vCe \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{-q(t) \cdot rSE1}{L} \\ 0 \\ \frac{1}{Ce} \end{pmatrix} \cdot iE + \begin{pmatrix} \frac{1 - q(t)}{L} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot vd \quad (3.44)$$

3.3.5. Modelo do conversor CC-CC, usando o método da chave PWM

Método da Chave PWM de Vorpérian

A topologia do conversor CC-CC abaixador utilizada apresenta uma chave controlada (MOSFET) e outra não controlada (diodo). Ao conjunto dessas duas chaves pode-se dar o nome de chave PWM. O método de Vorpérian lineariza esse circuito, formado pelas chaves, e fornece um circuito equivalente para representar o funcionamento do conversor (MELLO, 1996). A Figura 3.19 mostra esse circuito, válido para o modo contínuo de corrente, já adaptado ao conversor CC-CC abaixador, em que a resistência equivalente entre os terminais *a* e *p* é nula, devido a esses terminais estarem sendo conectados diretamente à fonte.

Nessa análise são utilizados os valores médios das variáveis, representados por variáveis em maiúsculas, e as perturbações devem possuir pequena amplitude e uma frequência muito menor do que a frequência de chaveamento.

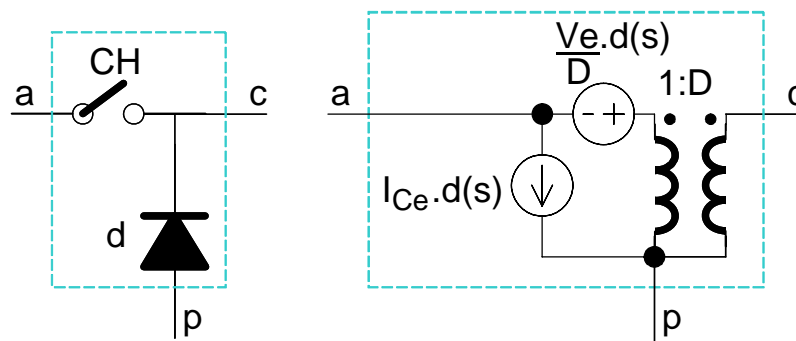


Figura 3.19 – Circuito da chave PWM de Vorpérian para perturbações $d(s)$

A tensão sobre os terminais *c* e *p* da chave PWM, v_{cp} , pode ser calculado como:

$$v_{cp} = D.v_{ap} \quad (3.45)$$

sendo v_{ap} a diferença de potencial entre os terminais *a* e *p*. Essa tensão pode ser obtida pela soma da tensão de entrada, v_e , e a fonte de tensão do circuito da chave PWM, ou seja:

$$v_{ap} = v_e + \frac{V_e.d(s)}{D} \quad (3.46)$$

Substituindo (3.46) em (3.45), obtém-se:

$$v_{cp} = D.v_e + V_e.d(s) \quad (3.47)$$

Essas duas últimas equações relacionam as tensões v_{ap} e v_{cp} do circuito da chave PWM com a tensão de entrada, v_e , e a tensão de entrada média, V_e .

Na análise pretendida somente a componente alternada (CA) do circuito (Figura 3.16) é considerada, o que implica nas seguintes considerações:

- a) a fonte de corrente (arranjo fotovoltaico) é representada como um circuito em aberto, o que a retira do circuito;
- b) o capacitor de saída torna-se um curto e deixa o R da carga em paralelo com o r_{SE0} , resultando em somente uma resistência equivalente na saída r_0 .

A Figura 3.20 apresenta o circuito resultante de todas essas considerações, incluindo a substituição da chave PWM pelo circuito equivalente de Vorpérian.

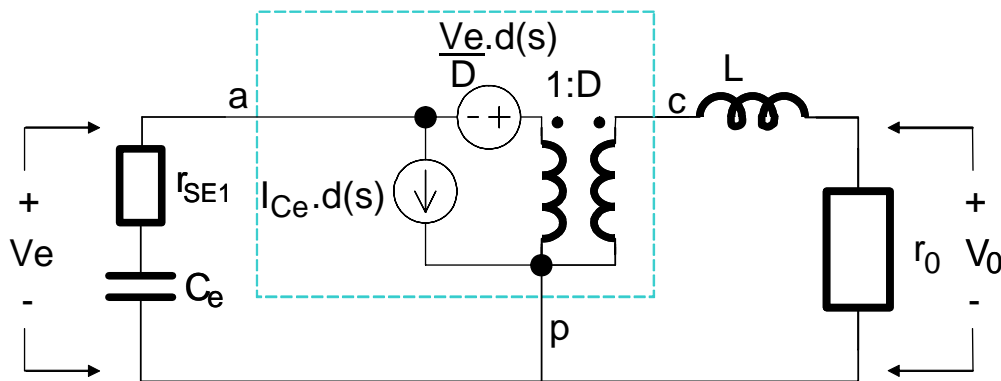


Figura 3.20 – Circuito do conversor CC-CC com a chave PWM para análise CA

A corrente no capacitor de entrada e a diferença de potencial sobre o indutor podem ser dadas por, respectivamente:

$$i_{Ce}(s) = C_e \cdot v_{Ce}(s) \cdot s \tag{3.48}$$

$$v_L(s) = L \cdot i_L(s) \cdot s \tag{3.49}$$

sendo i_L a corrente que passa pelo indutor e v_{Ce} a queda de tensão sobre o capacitor de entrada.

Analisando a malha da saída, pode-se chegar à seguinte formulação:

$$v_{cp} = v_L(s) + r_0 \cdot i_L(s) \tag{3.50}$$

Substituindo (3.47) em (3.50) e isolando $v_L(s)$, tem-se:

$$v_L(s) = v_e(s) \cdot D + V_e \cdot d(s) - r_0 \cdot i_L(s) \tag{3.51}$$

O resultado (3.51) pode ser substituído pela outra equação da tensão sobre o indutor encontrada em 3.49, obtém-se:

$$L.i_L(s).s = v_{IN}(s).D + V_{IN}.d(s) - r_0.i_L(s) \quad (3.52)$$

Em dois passos é possível isolar $i_L(s)$, sendo eles:

$$i_L(s).[r_0 + L.s] = v_e(s).D + V_e.d(s) \quad (3.53)$$

$$i_L(s) = \frac{v_e(s).D + V_e.d(s)}{r_0 + L.s} \quad (3.54)$$

A tensão sobre o capacitor de entrada pode ser obtida, diminuindo da tensão de entrada a queda de tensão na resistência em série ao capacitor, r_{SE1} , como formulado a seguir:

$$v_{Ce}(s) = v_e(s) - r_{SE1}.i_{Ce}(s) \quad (3.55)$$

Substituindo (3.55) na equação da corrente do capacitor de entrada encontrada em (3.48), resulta em:

$$i_{Ce}(s) = s.C_e[v_e(s) - r_{SE1}.i_{Ce}(s)] \quad (3.56)$$

Isolando i_{Ce} em dois passos, tem-se:

$$i_{Ce}(s)[1 + r_{SE1}.C_e.s] = s.C_e.v_e(s) \quad (3.57)$$

$$i_{Ce}(s) = \frac{s.C_e.v_e(s)}{1 + r_{SE1}.C_e.s} \quad (3.58)$$

Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes no ponto *a*, tem-se:

$$i_{Ce}(s) + I_{Ce}.d(s) + \frac{i_L(s)}{D} = 0 \quad (3.59)$$

Substituindo (3.54) e (3.58) em (3.59), tem-se:

$$\frac{s.C_e.v_e(s)}{1 + r_{SE1}.C_e.s} + I_{Ce}.d(s) + \frac{1}{D} \cdot \frac{v_e(s).D + V_e.d(s)}{r_0 + L.s} = 0 \quad (3.60)$$

Aplicando a propriedade distributiva, obtém-se:

$$s.C_e.v_e(s).[r_0 + L.s] + [r_0 + L.s][1 + r_{SE1}.C_e.s]I_{Ce}.d(s) + \frac{1}{D} \cdot [v_e(s).D + V_e.d(s)][1 + r_{SE1}.C_e.s] = 0 \quad (3.61)$$

Isolando a tensão de entrada, $v_e(s)$, e a razão cíclica, $d(s)$, consegue-se levantar a função de transferência entre essas variáveis, sendo ela dada em dois passos, sendo eles:

$$v_e(s) \cdot [s \cdot C_e \cdot (r_0 + L \cdot s) + 1 + r_{SE1} \cdot C_e \cdot s] = -d(s) \cdot \left[\frac{V_e}{D} \cdot (1 + r_{SE1} \cdot C_e \cdot s) + I_{Ce} \cdot (r_0 + L \cdot s) \cdot (1 + r_{SE1} \cdot C_e \cdot s) \right] \quad (3.62)$$

$$\frac{v_e(s)}{d(s)} = -\frac{\frac{V_e}{D} \cdot (1 + r_{SE1} \cdot C_e \cdot s) + I_{Ce} \cdot (r_0 + L \cdot s) \cdot (1 + r_{SE1} \cdot C_e \cdot s)}{s \cdot C_e \cdot (r_0 + L \cdot s) + 1 + r_{SE1} \cdot C_e \cdot s} \quad (3.63)$$

Simplificando, tem-se:

$$\frac{v_e(s)}{d(s)} = -\frac{I_{Ce} \cdot r_{SE1} \cdot L \cdot C_e \cdot s^2 + \left(\frac{V_e}{D} \cdot r_{SE1} \cdot C_e + I_{Ce} \cdot L + I_{Ce} \cdot r_0 \cdot r_{SE1} \cdot C_e \right) \cdot s + \frac{V_e}{D} + I_{Ce} \cdot r_0}{L \cdot C_e \cdot s^2 + (r_0 + r_{SE1}) \cdot C_e \cdot s + 1} \quad (3.64)$$

O objetivo dessa análise, em particular, foi encontrar a função de transferência entre $v_e(s)$ e $d(s)$. Essa equação possibilitou o projeto do compensador da tensão de entrada.

3.4. SISTEMA DE CONTROLE DA UNIDADE OR-FV

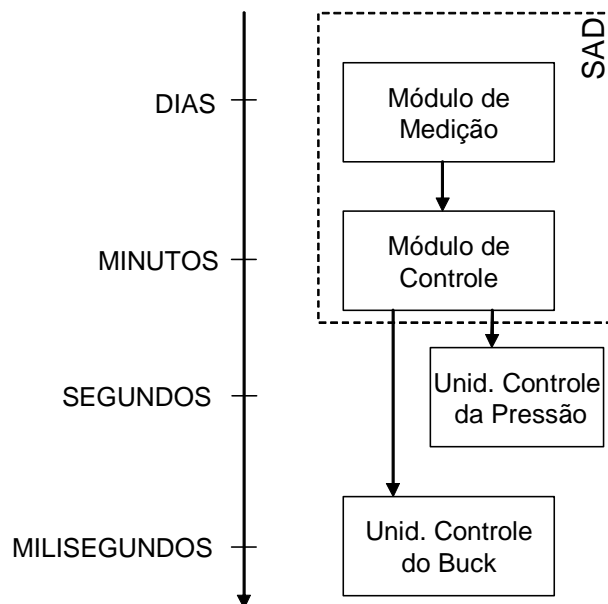


Figura 3.21 – Tempo de resposta do sistema de controle

O sistema de controle proposto consiste de um sistema de aquisição de dados (SAD) e duas unidades de controle, uma para controle da pressão e outra para a potência entregue à carga pelo conversor CC-CC abaixador. Essas unidades possuem diferentes tempo de resposta, como apresentado na Figura 3.21. O SAD, com um módulo de medição e outro de controle, possibilita a criação de estratégias de operação da unidade OR-FV.

O sistema, alimentado por uma fonte variável de tensão, como a proveniente dos módulos FV, necessita da normalização dos dados medidos, para que haja uma distinção entre uma condição normal de operação e uma possível irregularidade. Normalização é a comparação das condições atuais para uma dada referência nominal, levando em consideração os demais parâmetros de operação. Isso é feito no módulo de medição do SAD.

3.4.1. Seguidor de máxima potência

Existe somente um único ponto na curva característica (I-V) do módulo FV, chamado de ponto de máxima potência, no qual o módulo gera a máxima potência. Em geral, quando a carga é diretamente acoplada ao módulo, o ponto de operação não coincide com o ponto de máxima potência, resultando em um sobredimensionamento do arranjo FV.

Os algoritmos normalmente utilizados em SMP são:

- a) perturbação e observação (P&O); esse algoritmo utiliza o ponto de inflexão da curva de potência do módulo FV, ver Figura 2.9b, calculando a potência antes e depois da perturbação gerada na tensão de operação. Se a diferença for positiva, significa que a direção da perturbação leva ao ponto de máxima potência, caso negativo, significa que necessita inverter a direção;
- b) incremento na condutância (INC); procura anular a derivada da corrente e da tensão do arranjo FV, variando a tensão de operação;
- c) capacitância parasita (CP); opera de modo semelhante ao INC, exceto pela inclusão dos efeitos da capacitância parasita da junção, e o objetivo do algoritmo é igualar a condutância diferencial e a condutância do arranjo FV;
- d) tensão constante (TC); mede a tensão de circuito aberto e, através de uma constante calculada pela razão da tensão de máxima potência e a tensão de circuito aberto, estipula-se a tensão de operação.

Hohm e Ropp (2003) compararam os algoritmos acima citados quanto à eficiência em seguir o ponto de máxima potência, CP se mostrou com a melhor eficiência, próxima a 99,8 %. Entretanto, esse algoritmo deixa algumas dúvidas

quanto à sua implementação comercial, devido, principalmente, à necessidade do uso de grandes capacitores na entrada. Nessa linha, P&O se apresenta como o algoritmo mais comumente utilizado nos SMP comerciais, embora não apresente a melhor eficiência (entre 81 e 85 %). INC apresenta uma eficiência pouco superior ao P&O, entretanto, em geral, a melhora em eficiência não é compensada pela elevação nos custos de implementação. Por último, o algoritmo TC mostrou a pior eficiência, entre 73 e 85 %.

3.4.2. Algoritmo desenvolvido: melhor tensão fixa - MTF

Um estudo estatístico foi necessário para encontrar a melhor tensão fixa (MTF) de operação, na qual o motor-bomba acoplado ao arranjo FV opere, durante a maior parte do tempo, próximo ao ponto de máxima potência. Foram utilizados mais de 1 ano de medições, com médias a cada 10 minutos, da radiação solar global e da temperatura ambiente. Esses dados foram submetidos ao modelo matemático do módulo fotovoltaico, a ser apresentado no item 4.1.1, a diversos valores de tensão.

A base do algoritmo MTF é justamente manter a tensão na carga ou no módulo FV fixa. A Figura 3.22 mostra o fluxograma do algoritmo MTF, onde V_{Ci} é a tensão de controle da malha de tensão de entrada (arranjo FV) e V_{Co} é a tensão de controle da realimentação da saída (Carga). As regras do controle proposto são: se o arranjo FV gerar mais energia que o consumo nominal da carga (motor-bomba CC), o controle mantém a tensão de saída igual à tensão nominal da carga (12 V). Caso contrário, o controle mantém a tensão de entrada igual a MTF (14.9 V). Essa escolha é feita, encontrando a menor tensão de controle dos sinais (V_{Co} e V_{Ci}).

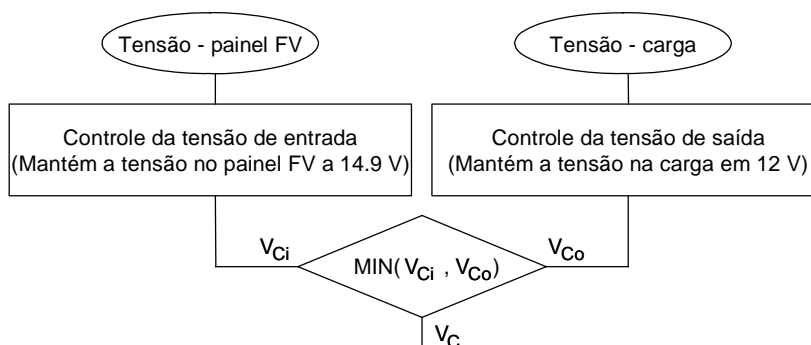


Figura 3.22 – Fluxograma do algoritmo MTF desenvolvido

Como índice de comparação com outros algoritmos, o controle, utilizando o algoritmo de MTF, segue o ponto de máxima potência em 80,5 % do tempo, um valor comparável aos demais algoritmos. Esse índice varia conforme as estações do ano e depende de uma boa pesquisa estatística para encontrar a melhor tensão fixa de operação do arranjo FV. A eficiência média medida do conversor CC-CC abaixador se mostrou próximo a 93 %.

As principais vantagens do algoritmo desenvolvido são: a simplicidade e a facilidade de implementação. Essas vantagens, unidas à boa eficiência obtida em regiões próximas à linha do Equador, demonstram que o sistema possui um bom custo-benefício. Outra característica que o sistema apresenta, devido, principalmente, ao reduzido número de componentes eletrônicos, é a alta confiabilidade e, conseqüentemente, a reduzida necessidade de manutenção.

3.4.3. Projeto do circuito de controle

No circuito de controle necessário para implementar o algoritmo MTF desenvolvido, ver item 3.4.2, se fazem necessárias duas malhas de tensão (compensadores); uma na entrada e outra na saída. A função de transferência do compensador de saída usada foi:

$$C_o = 205 \cdot \frac{(s + 2500)^2}{(s + 100)(s + 5051)} \quad (3.65)$$

Esses projetos do controle de malhas de tensão são amplamente divulgados na literatura (MELLO, 1996; BARBI, 2001; POMILIO, 2004), porém, o controle da malha da entrada não se mostrou trivial e fez jus a uma discriminação mais detalhada.

O controle da tensão de entrada

O modelo matemático desenvolvido do conversor CC-CC, utilizando o método da chave PWM de Vorpérian, ver item 3.3.5, possibilitou encontrar uma relação entre a tensão de entrada e a razão cíclica, conforme mostra a função de transferência descrita na equação (3.64). O projeto do compensador levou em consideração alguns critérios de projeto, como alocar a frequência do filtro para a frequência relativa ao zero da função de transferência do conversor CC-CC. A função de transferência encontrada para o compensador foi:

$$C = 109 \cdot \frac{s + 5,464}{s(s + 373)} \quad (3.66)$$

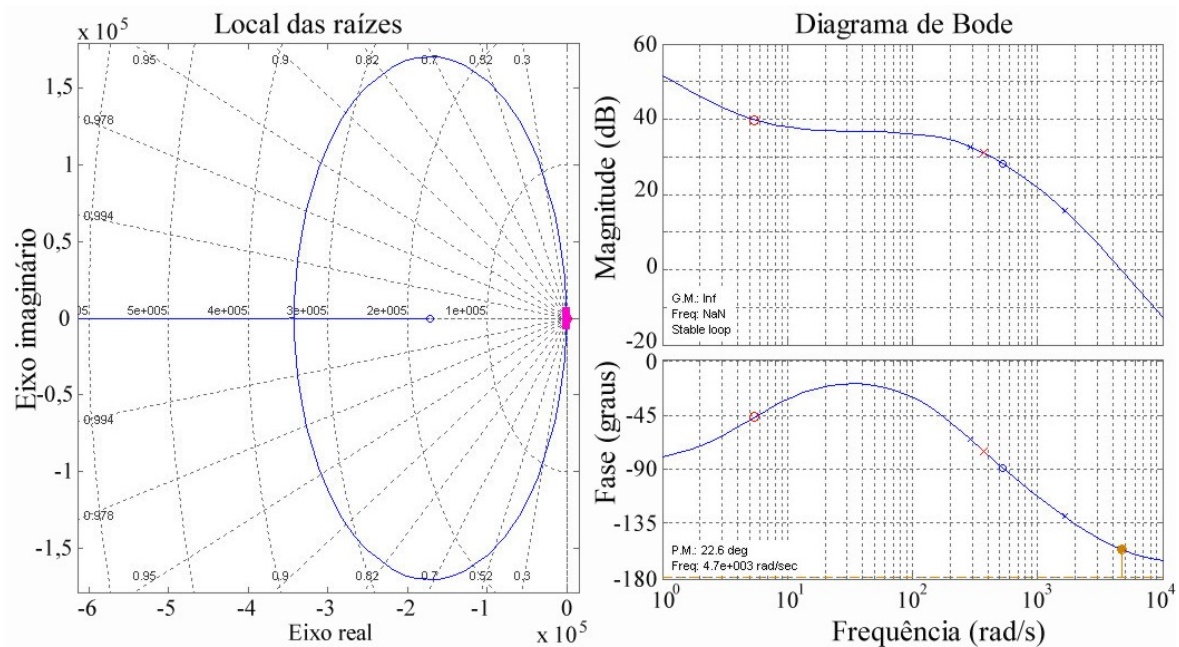


Figura 3.23 – Local das raízes e diagrama de Bode do conversor com o compensador

A Figura 3.23 apresenta os resultados das análises do local das raízes (esquerda) e do diagrama de Bode (direita) do conversor CC-CC, utilizando o compensador de entrada.

Para encontrar uma configuração de circuito que gerasse uma equação de transferência com um pólo e dois zeros, conforme a função de transferência do compensador mostrado em (3.66), o seguinte circuito foi proposto:

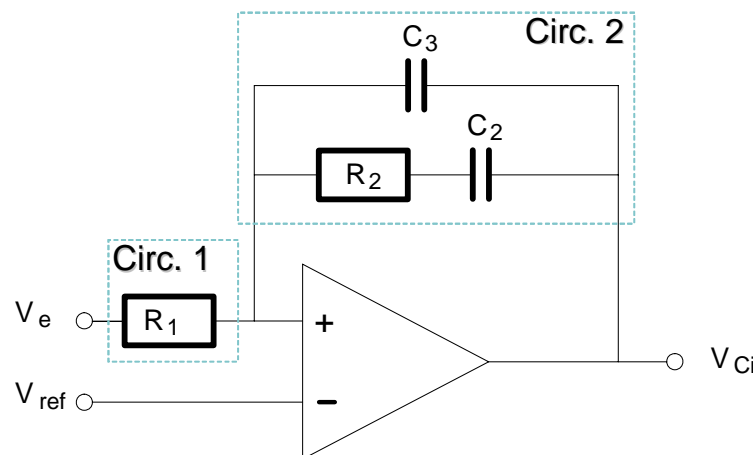


Figura 3.24 – Circuito do compensador usado no controle da tensão de entrada

O cálculo do ganho de um amplificador operacional pode ser calculado como a razão entre a impedância equivalente do Circ. 2 pela do Circ. 1, conforme

indicados na Figura 3.24. O circuito citado nessa figura tem como objetivo controlar a tensão da entrada, V_e , no valor de referência dado por V_{ref} , resultando na tensão de controle do compensador da entrada, V_{Ci} .

Calculando a impedância equivalente do Circ. 2, tem-se:

$$Z_{2eq}^{-1} = \left(\frac{1}{C_3 \cdot s} \right)^{-1} + \left(R_2 + \frac{1}{C_2 \cdot s} \right)^{-1} = C_3 \cdot s + \frac{C_2 \cdot s}{R_2 \cdot C_2 \cdot s + 1} \quad (3.67)$$

Invertendo os dois lados, calcula-se:

$$Z_{2eq} = \frac{R_2 \cdot C_2 \cdot s + 1}{R_2 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot s^2 + (C_2 + C_3) \cdot s} = \frac{R_2 \cdot C_2}{R_2 \cdot C_2 \cdot C_3} \cdot \frac{\left(s + \frac{1}{R_2 \cdot C_2} \right)}{s \cdot \left(s + \frac{C_2 + C_3}{R_2 \cdot C_2 \cdot C_3} \right)} \quad (3.68)$$

O cálculo do ganho do amplificador operacional, C , é dado por:

$$C = \frac{Z_{2eq}}{Z_{1eq}} = \frac{\frac{1}{C_3} \cdot \frac{\left(s + \frac{1}{R_2 \cdot C_2} \right)}{s \cdot \left(s + \frac{C_2 + C_3}{R_2 \cdot C_2 \cdot C_3} \right)}}{R_1} = \frac{1}{R_1 \cdot C_3} \cdot \frac{\left(s + \frac{1}{R_2 \cdot C_2} \right)}{s \cdot \left(s + \frac{C_2 + C_3}{R_2 \cdot C_2 \cdot C_3} \right)} \quad (3.69)$$

Comparando as duas equações encontradas em (3.66) e (3.69), têm-se as seguintes formulações para encontrar o valor dos resistores e capacitores do circuito:

$$109 = \frac{1}{R_1 \cdot C_3} ; 5,464 = \frac{1}{R_2 \cdot C_2} ; 373 = \frac{C_2 + C_3}{R_2 \cdot C_2 \cdot C_3} \quad (3.70)$$

Os valores utilizados no circuito foram: $R_1 = 56 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 18 \text{ k}\Omega$, $C_2 = 12 \text{ uF}$ e $C_3 = 180 \text{ nF}$.

3.5. SISTEMA DE MEDIÇÃO

Em um sistema de medição, a especificação dos sensores e do sistema de aquisição de dados são passos importantes para a obtenção dos resultados com a precisão adequada. A validação de um estudo depende intrinsecamente da correta medição e posterior análise dos dados.

até 8191 segundos e utiliza mais de 132 diferentes instruções em sua programação.

3.5.2. Sensor de vazão

Dois sensores medem a vazão de alimentação e de concentrado; a de permeado é calculada pela diferença entre eles. O modelo escolhido foi do tipo roda d'água, Signet P51530-P0, ver Figura 3.26a, com corpo de PVDF que suporta até 1400 kPa. Esse sensor necessita do indicador/ totalizador e transmissor de vazão modelo 3-8512, ver Figura 3.26b. O sensor apresenta linearidade de cerca de 1 % e precisão de 0,1 %. Esses equipamentos são fabricados pela empresa George Fischer Inc.

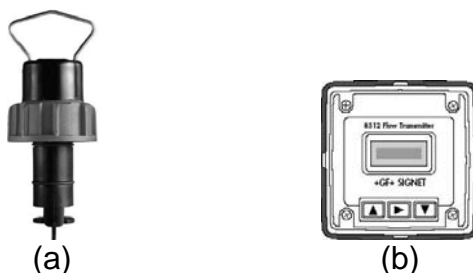


Figura 3.26 – Sensor de Vazão utilizado
Fonte: GEORGE FISCHER, 2004a, 2004b

3.5.3. Sensor de pressão

O sensor de pressão utilizado foi o modelo LoggerMate 11i, da Palmer Environmental Ltd., que possui um sistema dedicado de aquisição dos dados de um sensor de pressão (transdutor interno) e um sensor de vazão. O programa de comunicação utilizado é o ReaderMate RM301.

3.5.4. Piranômetro

O piranômetro, como visto no item 2.2.4, é um instrumento para medir a radiação solar global. O modelo CM3 utilizado, ver Figura 3.27, é classificado como de segunda classe, segundo a ISO (*International Organization for Standardization*). Em casos extremos a precisão chega a 10 %, mas em casos normais fica abaixo dos 5 %.



Figura 3.27 – Piranômetro modelo CM3 utilizado
Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC, 2004b

3.5.5. Divisores resistivos e resistores Shunt

Divisores resistivos são utilizados para a medição da tensão com o objetivo de adequar a escala máxima de medição de tensão do SAD (2,5 V). Foram utilizados divisores resistivos na entrada e na saída do conversor CC-CC abaixador.

Os resistores Shunt utilizados na medição da corrente de entrada e saída do conversor CC-CC fornecem uma tensão de 60 mV, quando submetidos a uma corrente de 12 A e 30 A, respectivamente. A corrente requisitada pelo motor apresenta uma oscilação de 360,5 Hz, conforme mostrado na Figura 3.14. Entretanto, o SAD possui uma opção de integrar um período de 2,72 ms; possibilitando medir oscilações de até 368 Hz diretamente.

3.5.6. Sensor de temperatura ambiente

O sensor de temperatura ambiente é usado para estimar a temperatura na célula e, para funcionar, necessita de uma alimentação externa, que, no caso, é provida pelo SAD.

4. VALIDAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL

"Em momentos de crise, somente a imaginação é mais importante que o conhecimento"
Albert Einstein (1879-1955)

4.1. APRESENTAÇÃO DOS BLOCOS PRINCIPAIS

Os principais blocos utilizados na simulação serão apresentados a seguir, e validados caso a caso:

4.1.1. Geração FV

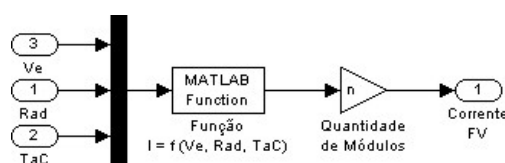


Figura 4.1 – Diagrama de blocos da Geração FV

Um programa escrito no Matlab[®] foi elaborado para o módulo FV utilizado, modelo SM55, baseado no apresentado por Walker (2001). O circuito equivalente utilizado foi um circuito equivalente mas simples que o apresentado na Figura 2.7, possuindo somente a fonte de corrente, um diodo e a resistência série. O método numérico de Newton-Raphson foi adotado para resolver a equação do módulo FV.

A Figura 4.1 apresenta o diagrama de blocos utilizado na simulação, onde V_e é a tensão nos terminais do módulo FV, Rad a radiação solar global e TaC a temperatura ambiente. O modelo utiliza ainda um resultado experimental realizado por Carvalho, Freire e Lima (2003) que validaram a seguinte equação para calcular a temperatura do módulo fotovoltaico em Fortaleza-CE:

$$T_{móduloFV} = TaC + 0,022 \cdot Rad \quad (4.1)$$

4.1.2. Compensadores de entrada e saída

Os compensadores foram projetados conforme visto no item 3.4.3. As funções de transferência são descritas por equações no domínio da frequência. Entretanto, no momento em que essas funções foram implementadas no Matlab[®], os resultados não condiziam com a realidade, principalmente quando ocorria uma mudança de compensador. O que ocorre é que os amplificadores operacionais reais possuem uma limitação quanto a seu valor máximo de integração, diferente do que ocorre com as equações matemáticas que podem ir até o infinito. Com isso, fez-se necessária a representação das funções de transferência em espaço

de estados. Essa nova formulação, agora no domínio do tempo, possibilitou a limitação dos valores máximo e mínimo dos integradores. O compensador de saída pode ser dado por:

$$\begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5150,8 & -5,0409e5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} .u \quad (4.2)$$

$$y = [-202,72 \quad 7,7239e6] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + 1,3442.u \quad (4.3)$$

A Figura 4.2 proporciona uma visualização dessas equações em diagrama de blocos. Os limites de integração do Integrador 1 ficaram entre $-0,25 \cdot 10^{-7}$ e $-3,2 \cdot 10^{-7}$, já o Integrador 2 apresentou os seguintes limites: $1 \cdot 10^{-7}$ e 0.

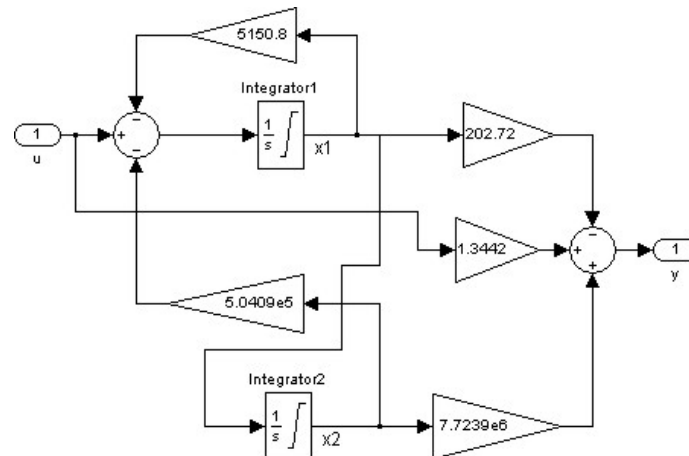


Figura 4.2 – Diagrama de blocos do compensador de saída

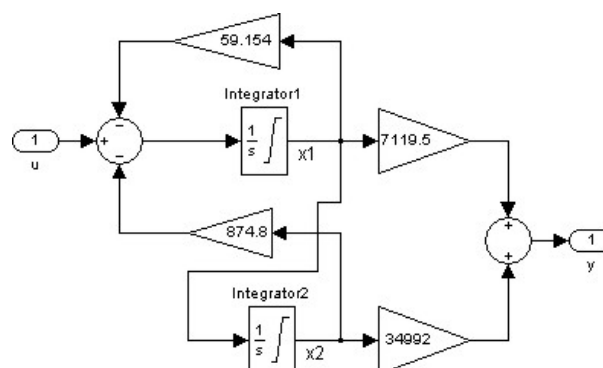


Figura 4.3 – Diagrama de blocos do compensador de entrada

O mesmo procedimento foi realizado com o compensador de entrada, gerando a Figura 4.3. Os seguintes limites de integração foram encontrados: $-1,15 \cdot 10^{-3}$ e $-2 \cdot 10^{-3}$ para o Integrador 1 e $2 \cdot 10^{-3}$ e $2,8 \cdot 10^{-4}$ para o Integrador 2.

4.1.3. Modelo do conversor CC-CC abaixador

No item 3.3.4 foram deduzidas as equações de espaço de estados instantâneos do conversor CC-CC abaixador. Essas equações simbolizam uma média entre os dois possíveis estados em que o conversor pode assumir, chave aberta ou fechada, de acordo com a razão cíclica. O diagrama de blocos resultante é exposto na Figura 4.4. As variáveis de entrada $u[1]$, $u[2]$ e $u[3]$ são a corrente de entrada iE que vem do arranjo FV, a corrente da carga I_m e a razão cíclica d .

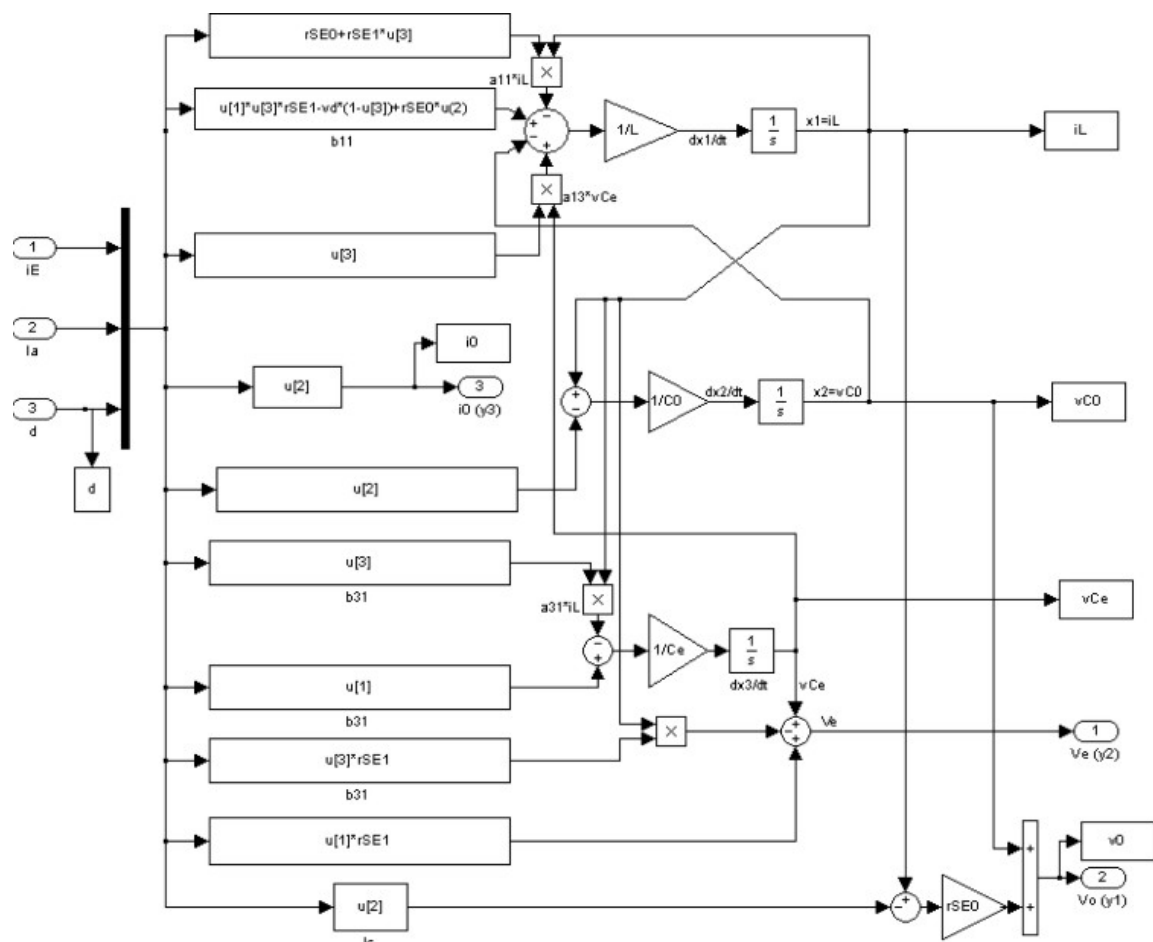


Figura 4.4 – Diagrama de blocos do conversor CC-CC abaixador

A corrente de saída e as tensões de entrada e de saída são simbolizadas pelas variáveis de saída $i_o(y1)$, $V_e(y2)$ e $V_o(y3)$, respectivamente.

4.1.4. Motor-bomba CC

As equações que regem o motor CC a ímã permanente, levantadas no Item 3.2.1, foram transcritas no diagrama da Figura 4.5. Esse diagrama é utilizado, quando se tem como variável de entrada a tensão e se necessita do cálculo da

corrente de armadura. A Figura 4.6 apresenta o mesmo diagrama, contudo empregando como dado de entrada a corrente da armadura. Nesse caso foi necessário restringir os valores de rotação somente a valores positivos, através do bloco Saturação. Isso é necessário devido às variações bruscas da corrente da armadura, visto que esse esquema não possui nenhum elemento armazenador de energia (capacitores ou indutores) entre o arranjo FV e o motor CC.

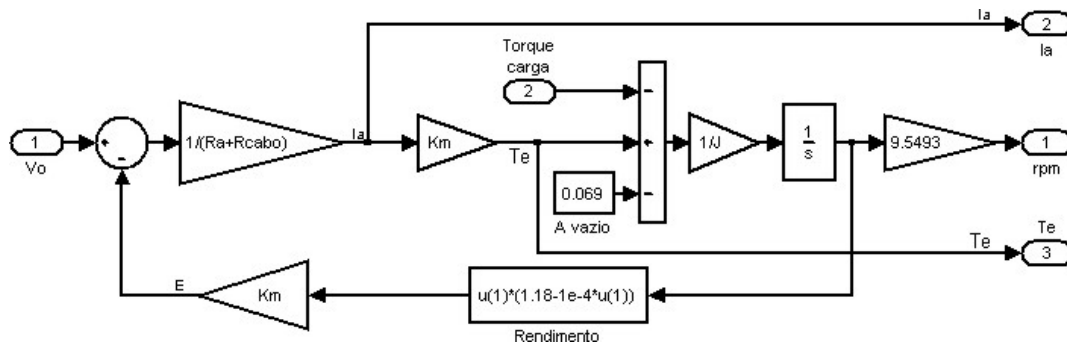


Figura 4.5 – Diagrama de blocos do motor CC

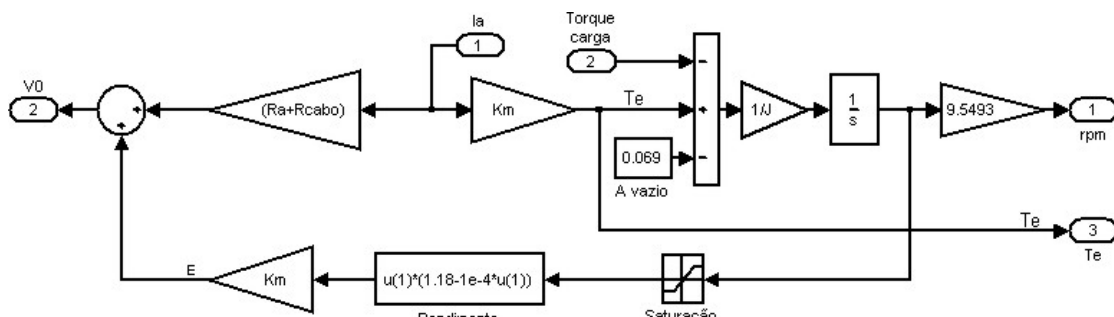


Figura 4.6 – Diagrama de blocos do motor CC modificado

Para designar algumas perdas do motor CC foi acrescentado ao modelo uma função chamada Rendimento, inserida na realimentação da força contraeletromotriz E [V]. Considerou-se que essas perdas dependem da rotação. Diversos valores de tensão, corrente e rotação foram levantados experimentalmente, o que possibilitou o cálculo dos valores de K_m , J e T_{vazio} ; sendo K_m calculado por:

$$K_m = \frac{E}{\omega} = \frac{V_0 - \frac{I_a}{Ra}}{\omega} \quad (4.4)$$

Os valores de J e T_{vazio} foram ajustados empiricamente ao comportamento medido do motor. O acoplamento entre os blocos do motor CC e da bomba de diafragma é realizado pelo T_{carga} , responsável por conceber a curva de carga da bomba.

O diagrama de blocos da Figura 4.7 mostra as inter-relações entre o motor CC e a bomba de diafragma. Nele pode-se notar que a curva do torque da carga é calculada, ajustando o valor da pressão requerida, dado de entrada P (kPa) à calculada, através do bloco K2.

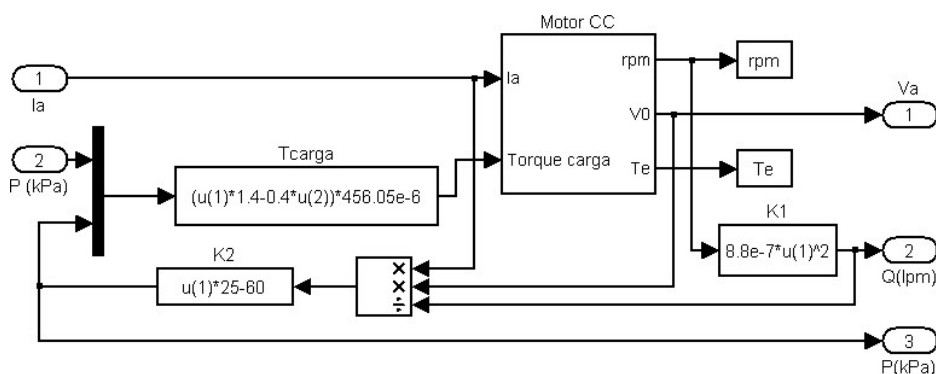


Figura 4.7 – Diagrama de blocos do motor-bomba

Curvas características levantadas experimentalmente

A curva característica da bomba volumétrica de diafragma utilizada (Figura 4.8) é obtida, variando a pressão e observando o comportamento da vazão, sempre mantendo a tensão nominal de alimentação (12 V).

Infelizmente as condições de funcionamento da unidade OR-FV desenvolvida variam muito no tempo e não podem ser descritas somente pela curva característica. Diversas situações foram testadas e compiladas conforme a pressão de operação.

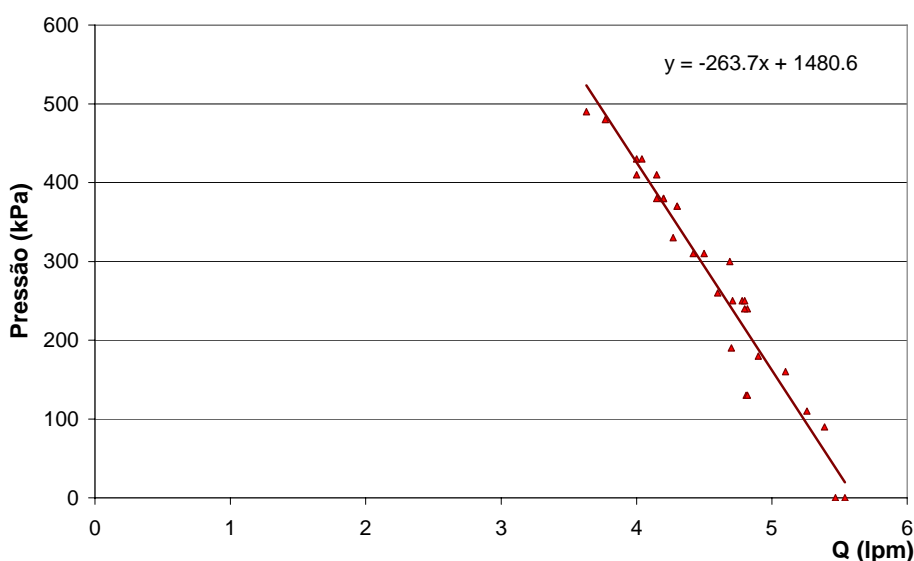


Figura 4.8 – Curva característica da bomba de diafragma à tensão nominal

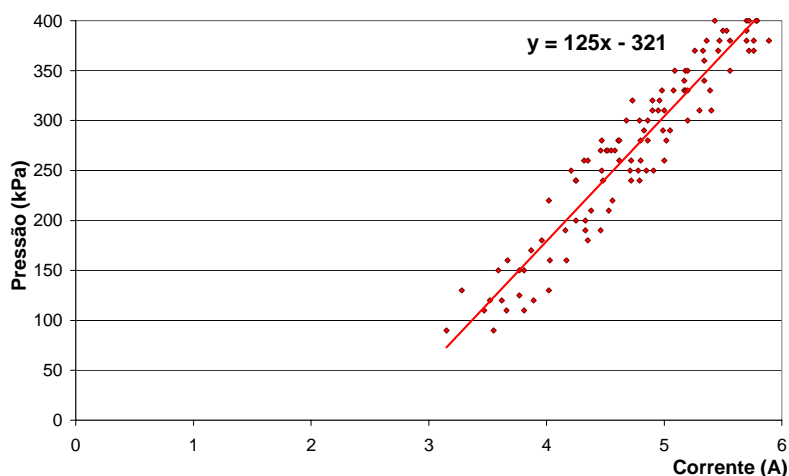


Figura 4.9 – Relação encontrada entre a corrente e a pressão

Uma particularidade interessante observada e demonstrada na Figura 4.9 é a relação, aproximadamente linear, entre a corrente e a pressão. Isso é especialmente interessante, quando se deseja regular a pressão de operação sem a necessidade da utilização de um sensor de pressão. A equação obtida, por regressão linear, foi:

$$P_a = 125.I_a - 321 \tag{4.5}$$

sendo P_a a pressão e I_a a corrente de operação do motor.

Inicialmente, essa equação (4.5), encontrada empiricamente, que relaciona o valor da corrente I_a e a pressão P_a , foi utilizada nas primeiras simulações. No entanto, concluiu-se que essa equação só é válida para algumas condições de operação; sendo, portanto, descartada.

i. Membrana de osmose reversa

A Figura 4.10 mostra o diagrama de blocos da membrana de OR estudada. As equações da membrana, estudadas no item 3.2.2, relacionam a pressão P , a salinidade da água $W1$ e a vazão da água de alimentação $Q1$ e trazem como resultado a vazão $Q3$ e a salinidade $W3$ da água do permeado.

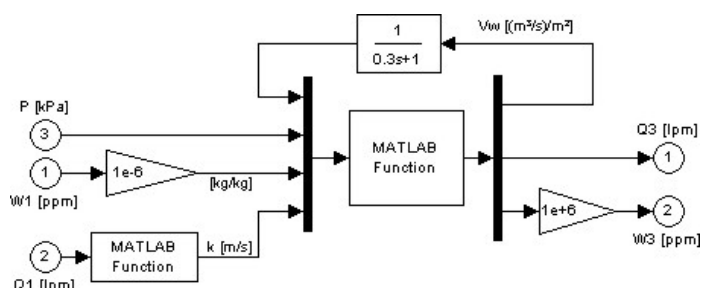


Figura 4.10 – Diagrama de blocos da membrana de OR

O programa ROSA[®] foi utilizado como padrão para estimar os parâmetros da membrana de OR. Entretanto, o programa não apresentava a membrana modelo XLE-2521 desejada, então se optou por utilizar um modelo com a mesma bitola, só que mais comprido, ou a XLE-2540. Diversas configurações de pressão e vazão de alimentação foram testadas no programa ROSA[®]. Com isso, chegou-se a uma relação entre a pressão de alimentação e a vazão do permeado da membrana de OR, como mostrada na Figura 4.11. Outra equação encontrada foi a relação entre a vazão da alimentação e a concentração de sais do permeado, como mostra a Figura 4.12. Sabe-se que a salinidade da água do permeado varia ainda com a pressão de alimentação, por isso foi escolhido o pior caso, isto é, com a pressão de alimentação mais baixa, ou 200 kPa.

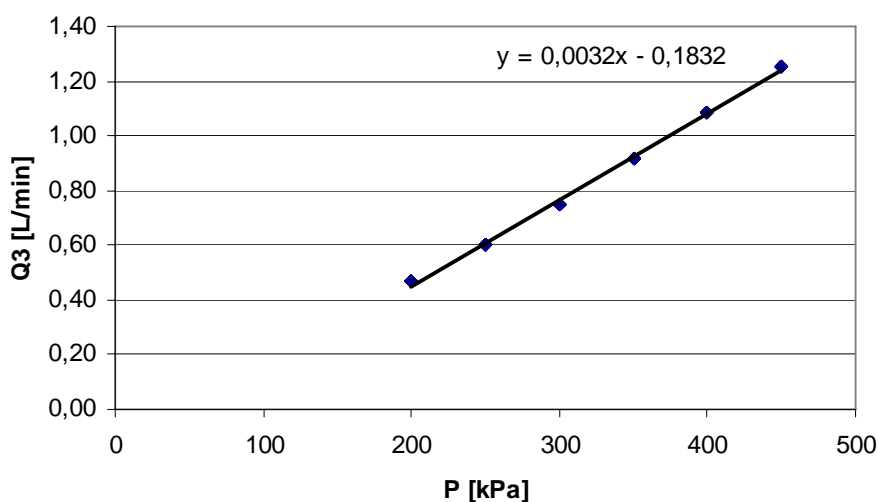


Figura 4.11 – Pressão de alimentação x vazão de permeado

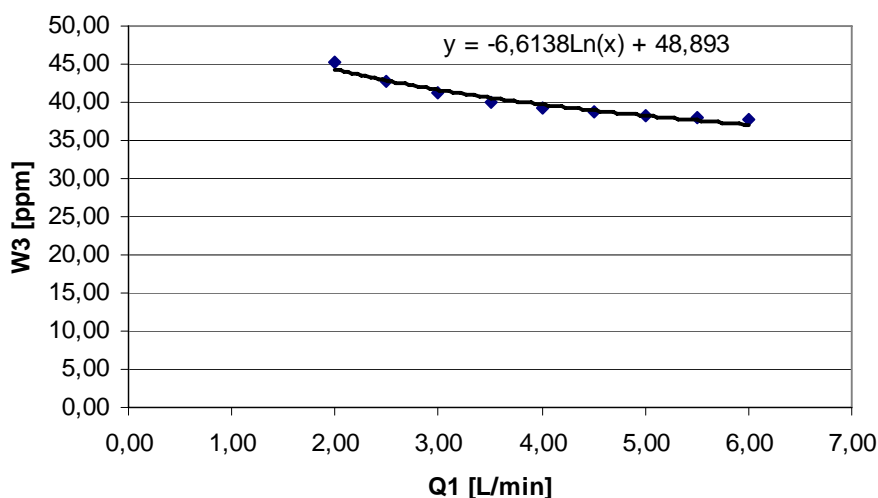


Figura 4.12 – Vazão de alimentação x salinidade do permeado

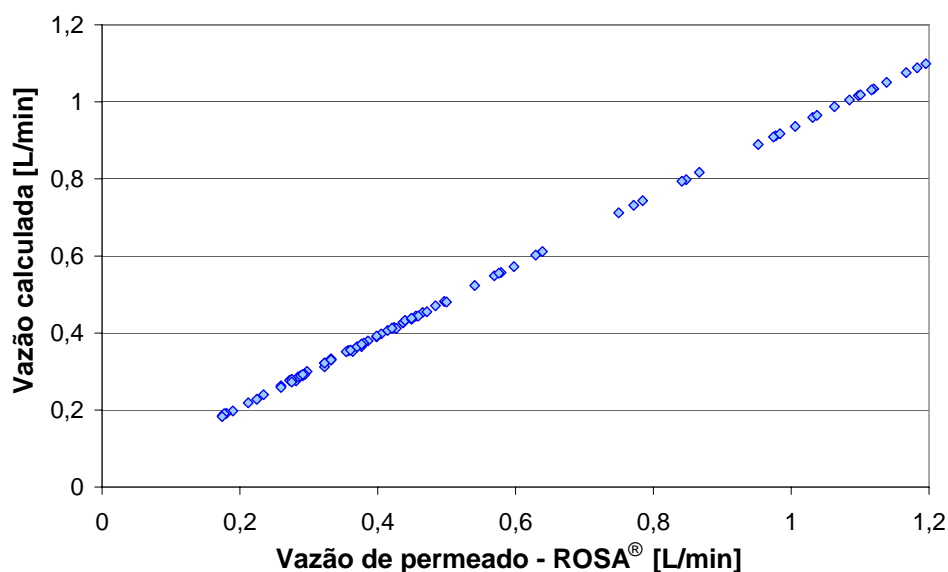


Figura 4.13 – Validação do modelo da membrana de OR: vazão do permeado

O modelo matemático desenvolvido para a vazão do permeado pode ser validado pelo coeficiente de correlação de 0,9999, obtido da Figura 4.13. O erro médio permanece próximo dos 4 %, atingindo o erro máximo de 9 %.

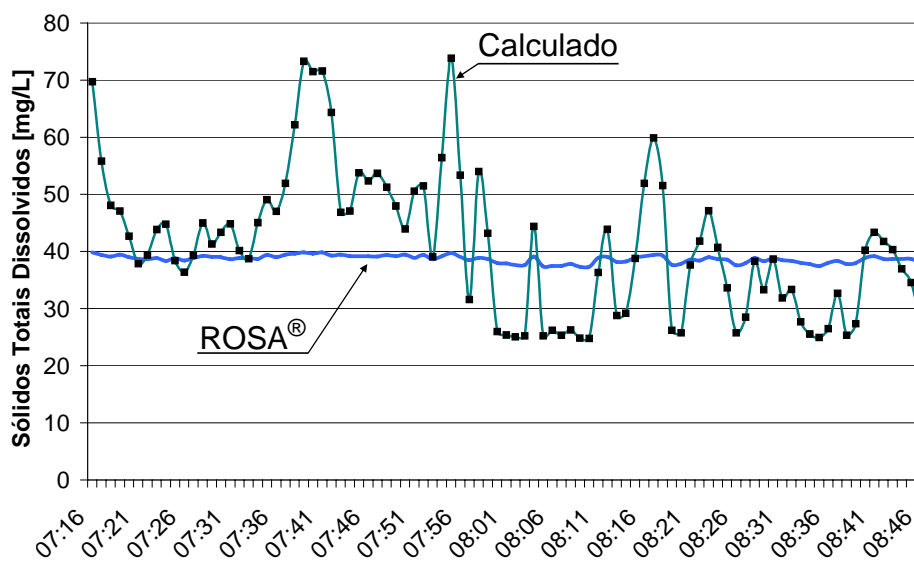


Figura 4.14 – Validação do modelo da membrana de OR: salinidade do permeado

A Figura 4.14 mostra a salinidade do permeado resultante do modelo da membrana de OR (quadrados pretos) e do programa ROSA® (linha contínua azul). A única semelhança que pode ser notada é que a média de todos os dados simulados pelo modelo e dos valores encontrados pelo programa são igualmente próximos a 40 mg.L⁻¹; uma vez que o programa citado não possui uma preocupação com os valores instantâneos, não se pôde desqualificar o modelo apresentado.

4.2. VALIDAÇÃO DO CONVERSOR CC-CC ABAIXADOR

O modelo da Figura 4.15, implementado no *Matlab - Simulink*[®], utilizou como base de entrada os dados de radiação global e de temperatura ambiente medidos pelo SAD. O objetivo dessa simulação foi validar o modelo do conversor CC-CC desenvolvido e verificar o desempenho dos compensadores.

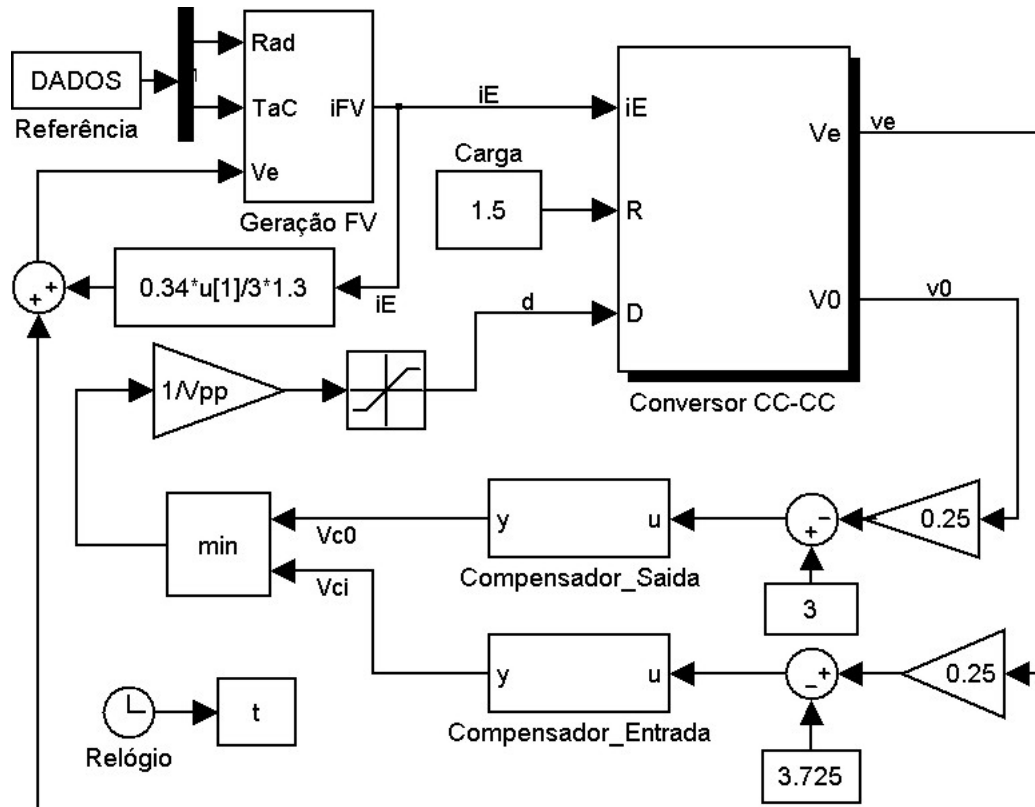


Figura 4.15 – Diagrama de blocos da simulação do conversor CC-CC abaixador

Diversas condições críticas de funcionamento foram simuladas, abrangendo a mudança de controle, de saída para a entrada, e a resposta a uma variação brusca (degrau) na corrente de entrada ou de saída. Considerou-se a temperatura ambiente sempre constante em 27 °C.

Resposta a um degrau na radiação solar

Inicialmente, foi simulado um degrau na radiação solar global, mantendo a carga constante em 1,5 Ω , o que acarreta em um degrau na corrente de alimentação. Como consequência dessa variação da radiação solar de 500 para 700 $W.m^{-2}$, o controle muda da entrada para a saída, como pode ser visto na Figura 4.16a, onde V_{FV} e I_{FV} são a tensão e corrente do módulo FV, respectivamente, e V_{CARGA} e I_{CARGA} representam a tensão e a corrente na carga. A resposta ao degrau de descida é apresentada na Figura 4.16b.

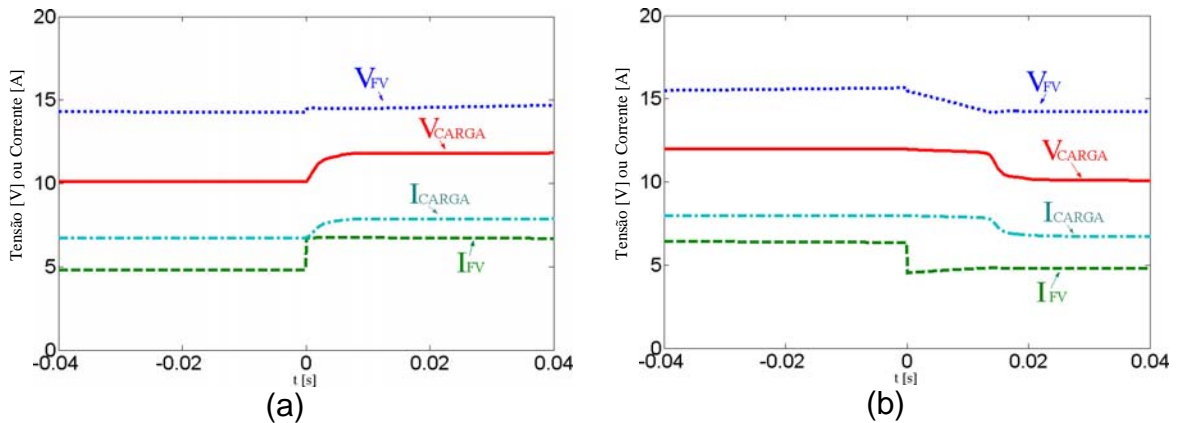


Figura 4.16 – Resposta do conversor CC-CC a um degrau na corrente de alimentação

Resposta a um degrau na carga

A resposta a um degrau de descida (2 para 1,5 Ω) e de subida (1,5 para 2 Ω) na carga, usando controle de realimentação da saída, é mostrada na Figura 4.17a e b, respectivamente. A radiação solar global foi mantida constante em 900 W.m⁻². Os mesmos degraus na carga, agora utilizando o controle da entrada, mantendo a radiação solar em 400 W.m⁻², são apresentados na Figura 4.18a e b.

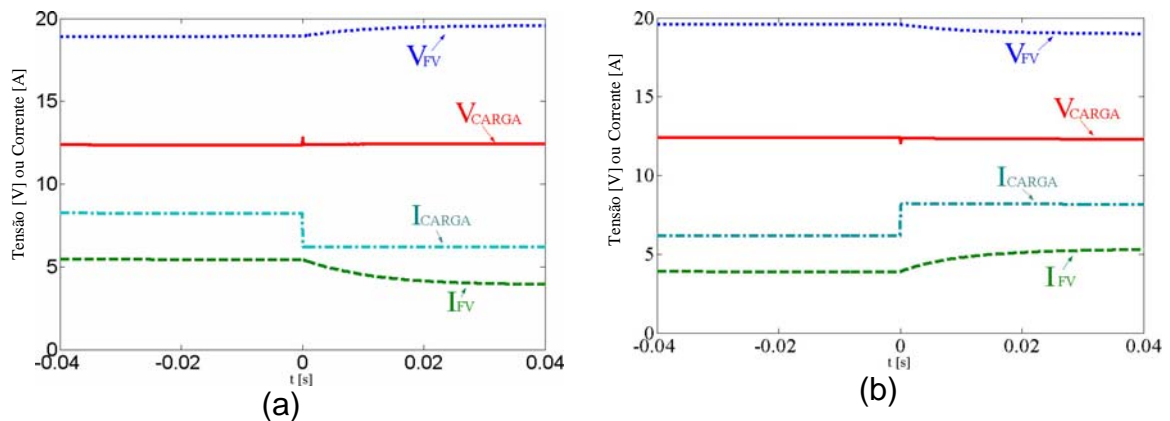


Figura 4.17 – Resposta do conversor CC-CC a um degrau na carga

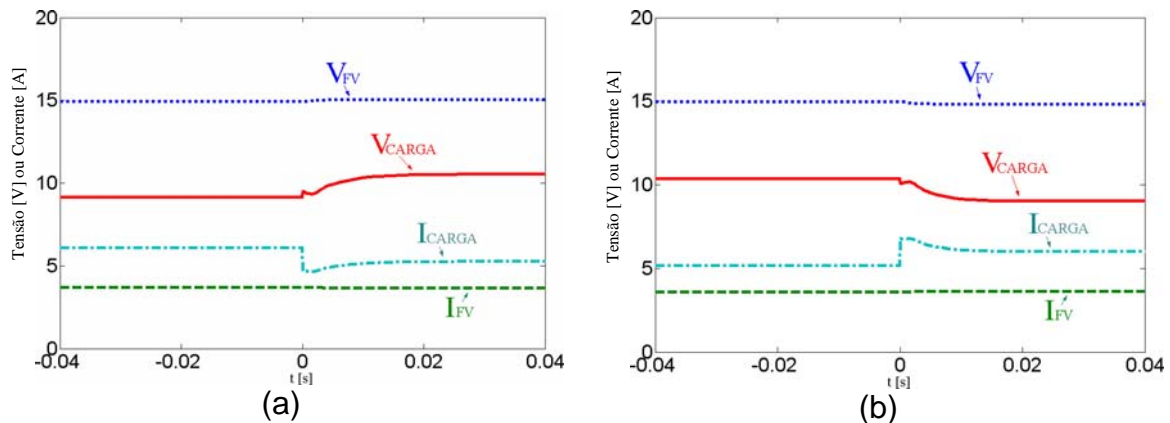


Figura 4.18 – Resposta do conversor CC-CC a um degrau na carga

Validação do modelo

A implementação do conversor CC-CC abaixador 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 4.19. O arranjo FV utilizado (3x 55 Wp) está localizado sobre o telhado do departamento.

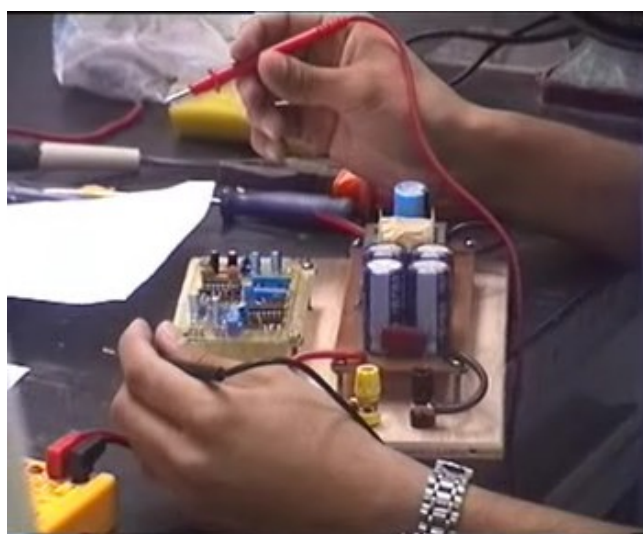


Figura 4.19 – Conversor CC-CC abaixador desenvolvido

As medições são utilizadas como dados de referência para o modelo matemático desenvolvido e ambos, os resultados medidos e calculados (com marcas), são apresentados na Figura 4.20. A relevância do modelo é indicada pela coincidência dos valores. A média do erro ficou em 4 %, com o máximo de 13 %.

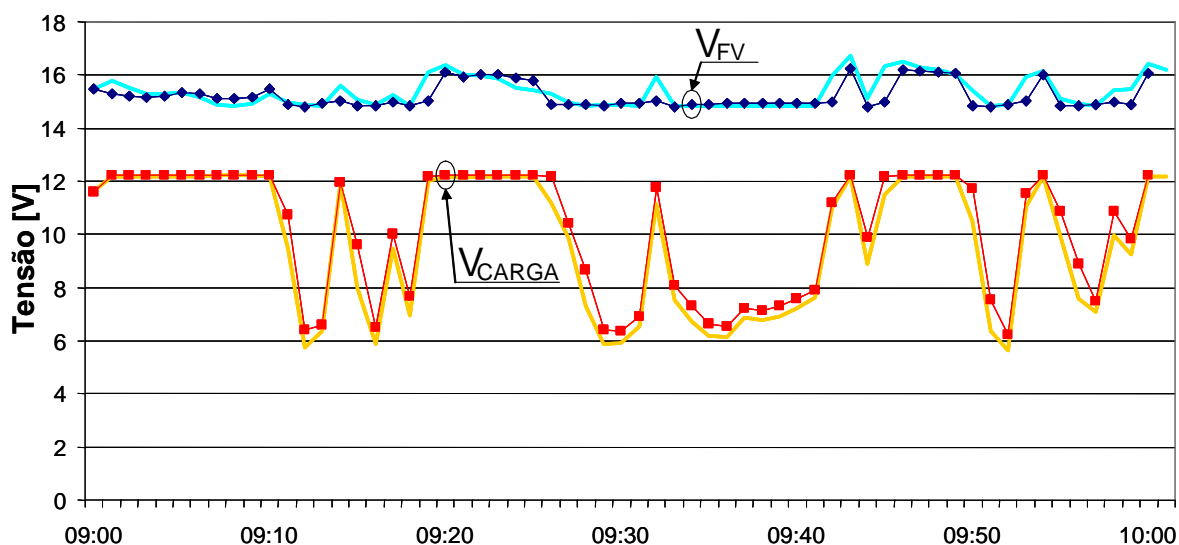


Figura 4.20 – Validação do modelo: valores simulados (com marcas) e medidos

Algumas imagens foram armazenadas pelo osciloscópio. O canal 1 (ch1) representa a tensão no arranjo FV, o ch2 é a tensão na carga e a corrente gerada pelo arranjo FV é apresentada no canal 3 (ch3). Os degraus foram criados com um acréscimo ou decréscimo de um módulo FV.

O controle da entrada possui um tempo de resposta mais lento que o controle de saída, porque qualquer oscilação no arranjo FV resulta em uma grande oscilação na carga.

Resposta do controle de entrada

A Figura 4.21 representa o incremento de 1 módulo FV, quando o SMP está operando com o controle da entrada. Posteriormente, o módulo FV é desconectado e o resultado é apresentado na Figura 4.22. O tempo de resposta se mostrou abaixo de 80 ms.

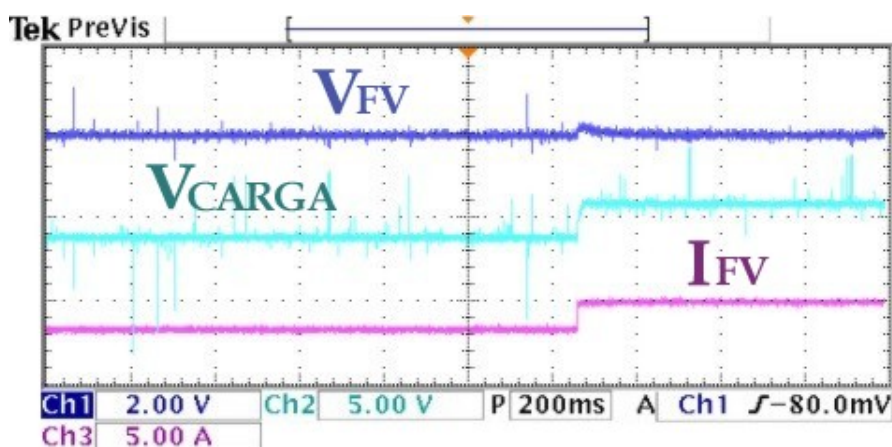


Figura 4.21 – Controle de entrada: medições relativas ao incremento de 1 módulo FV

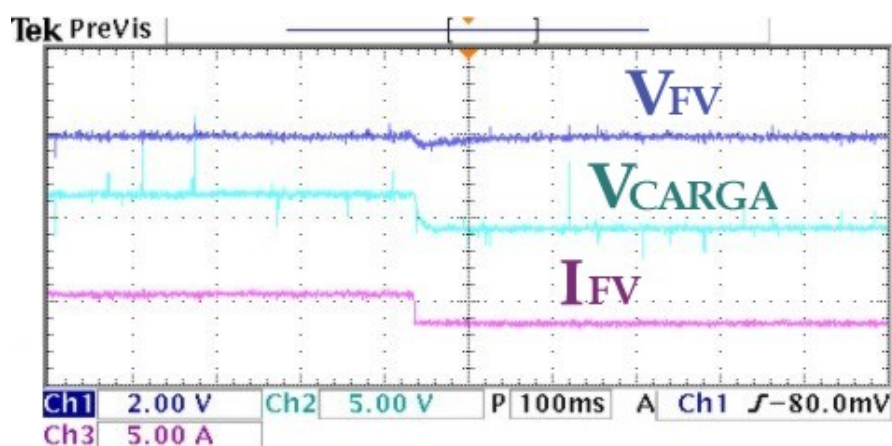


Figura 4.22 – Controle de entrada: medições relativas à desconexão de 1 módulo FV

Resposta do controle de saída

A Figura 4.23 ilustra a resposta do controle de saída para o degrau de subida e descida, gerado pela desconexão e posterior conexão de 1 módulo FV. O transitório se mostrou praticamente imperceptível pela carga.

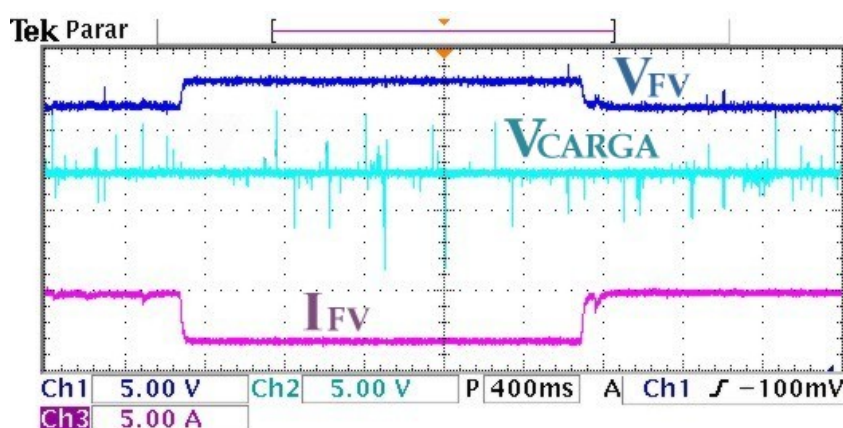


Figura 4.23 – Controle de saída: medições da desconexão/conexão de 1 módulo FV

4.3. VALIDAÇÃO DA UNIDADE OR-FV SEM BATERIAS

A validação, dos dois sistemas que foram matematicamente modelados, começou com a confecção e a instalação da unidade OR-FV no GPEC, na qual, a membrana de OR foi “simulada” por uma válvula.

A instalação, como mostrada na Figura 4.24, possibilitou a medição dos parâmetros hidráulicos, como a vazão e a pressão, além dos parâmetros elétricos. Essas medições foram comparadas com os valores calculados pelos modelos matemáticos desenvolvidos e os resultados foram expostos em forma de gráficos e tabelas. Dois modelos da unidade OR-FV sem baterias foram propostos, medidos e simulados. O Sistema 1 é composto por 2 módulos FV de 55 Wp cada e o motor-bomba. Para o Sistema 2 foram acrescentados 1 módulo FV de mesma potência e um conversor CC-CC com SMP.

O comportamento das simulações pode ser elucidado através de gráficos diários, onde são mostradas as variações ocorridas nas diversas variáveis envolvidas. Os parâmetros analisados são: vazão de permeado e alimentação; pressão de alimentação; potência gerada, consumida e no PMP; consumo específico; salinidade do permeado; taxa de recuperação da membrana de OR.



Figura 4.24 – Unidade de OR-FV desenvolvida

Para a efetiva comparação entre unidades de OR, deve-se levar em consideração a salinidade da água de alimentação, a pressão de alimentação e o porte da unidade. Entretanto esses parâmetros não medem a eficiência da unidade e sim influenciam em alguns índices criados para isso, sendo eles:

- b) consumo específico ou a quantidade de energia útil gasta para produzir 1 m³ de água permeada;
- c) taxa de recuperação, relação entre o fluxo (vazão) de água permeada e de alimentação.

Outros índices diários foram analisados, como: produção diária de permeado, salinidade média do permeado, pressão de operação, período diário de operação, relação potência-produção (kWp.L⁻¹), eficiência em seguir o PMP, perdas no cabeamento e no conversor CC-CC.

Para complementar os resultados gráficos dessas comparações, esses índices indicados acima, foram sintetizados em tabelas. A estipulação de alguns desses índices necessitou que determinadas considerações fossem feitas, uma vez que existem períodos em que o sistema se encontra inoperante. Sabe-se que o sistema não funciona em momentos que a radiação solar estiver abaixo de 100 kWh.m⁻² e a pressão, 100 kPa. Esses dois indicativos servem como critérios de escolha dos dados a serem usados nas médias.

4.3.1. Sistema 1: unidade OR-FV sem SMP

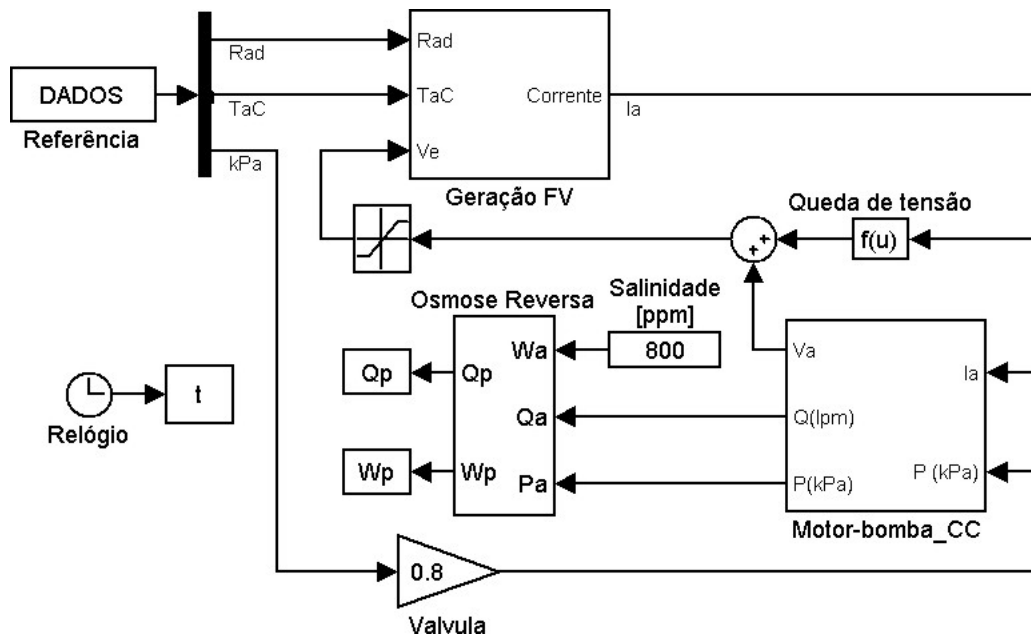


Figura 4.25 – Sistema 1: diagrama de blocos da unidade OR-FV sem SMP

O diagrama de blocos da Figura 4.25 representa a unidade OR-FV sem SMP (conversor CC-CC abaixador) e nenhum outro sistema de controle da energia entregue à carga (Sistema 1). Por essa razão se utilizaram apenas 2 módulos FV para alimentar o motor-bomba, caso contrário a geração poderia ser superior ao consumo da carga, resultando em uma diminuição da vida útil do motor. Esse fato é verificado, inclusive no sistema alimentado por 2 módulos, em momentos em que a radiação é próxima a 1000 W.m^{-2} . O valor máximo medido de tensão de operação do motor nessa situação foi de 13,5 V.

O bloco do motor-bomba CC necessitou de uma pequena mudança de variáveis, colocando a corrente da armadura I_a como sendo um dado de entrada e a tensão V_a como a saída do bloco. Essa mudança resultou na utilização do diagrama de blocos modificado do Motor CC, ver Figura 4.6.

O comportamento diário da pressão e vazão de alimentação em função da radiação solar, utilizando o Sistema 1, é exposto na Figura 4.26. O dia adotado foi considerado típico e serve como base para estimar o funcionamento em outras condições. A escolha do dia levou em consideração a presença de períodos com perturbações acentuadas e outros sem; para, assim, melhor representar o funcionamento da unidade. Observam-se variações consideráveis na pressão de alimentação e a conseqüente redução na produção de permeado.

O regime de operação dessa unidade se mostrou intermitente e com repetidas paradas. Durante a operação dessa unidade pôde-se notar repetidas partidas e paradas do motor, principalmente em momentos de baixa radiação solar. Esse fato é intensificado pela atuação de um relé de proteção de sobrepressão, que se encontra diretamente acoplado ao motor, calibrado para atuar, quando a pressão ultrapassa os 500 kPa, 100 a mais que a máxima pressão permissível em regime. Normalmente, esse evento foi percebido pela manhã.

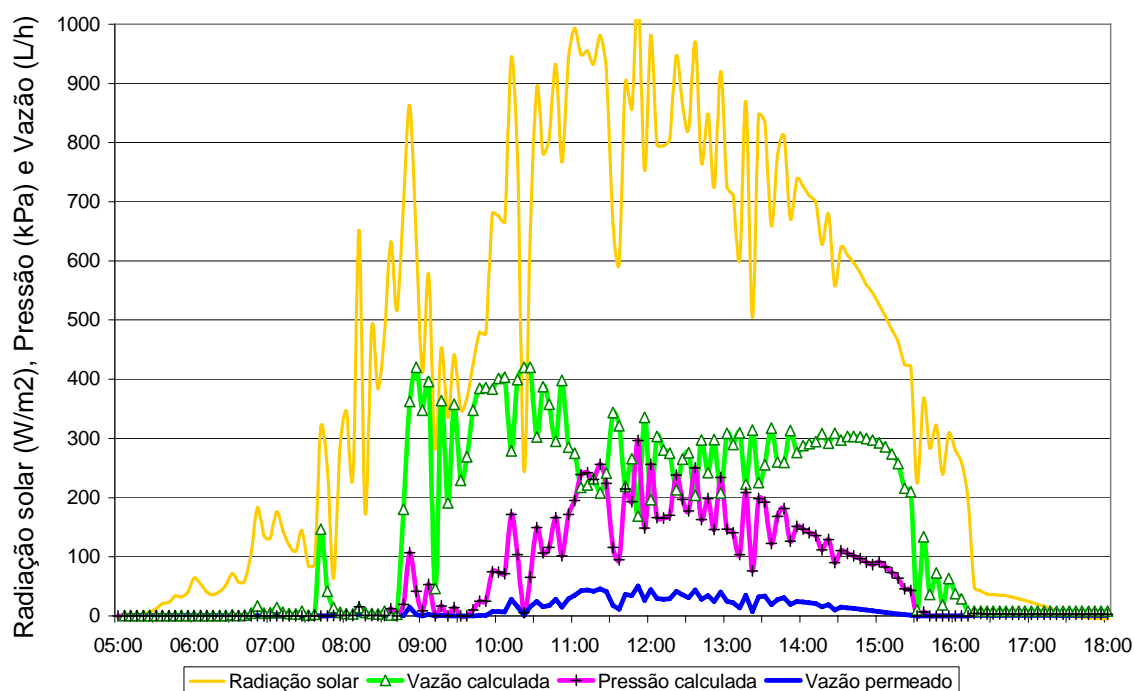


Figura 4.26 – Sistema 1: Pressão e vazão de alimentação e do permeado - 30/11/04

A Figura 4.27 mostra a comparação entre a potência máxima, que poderia ser gerada, caso a unidade se encontrasse no PMP, e a potência útil. Nota-se que, em períodos de baixa radiação, até 400 W.m^{-2} , principalmente pela manhã, existe uma significativa diferença entre as duas curvas, indicando uma necessidade de se utilizar SMP em motores-bombas de diafragma. As alterações nos níveis de potência útil são imediatamente sentidas na produção de permeado. O coeficiente de correlação entre a potência útil medida e calculada é de 0,872.

Essa influência pode ser visualizada na Figura 4.28, observando o período das 8:00 h às 9:00 h, verifica-se que a produção de permeado apresentou um consumo específico médio, que representa a quantidade de energia (kWh) necessária para a produção de 1 m^3 de água permeada, acima dos 3 kWh.m^{-3} , enquanto a média diária fica em $2,21 \text{ kWh.m}^{-3}$. Essa relação mostra que, durante

períodos de baixa intensidade de radiação solar, a pouca energia gerada ainda é mal aproveitada pela unidade, intensificando o problema.

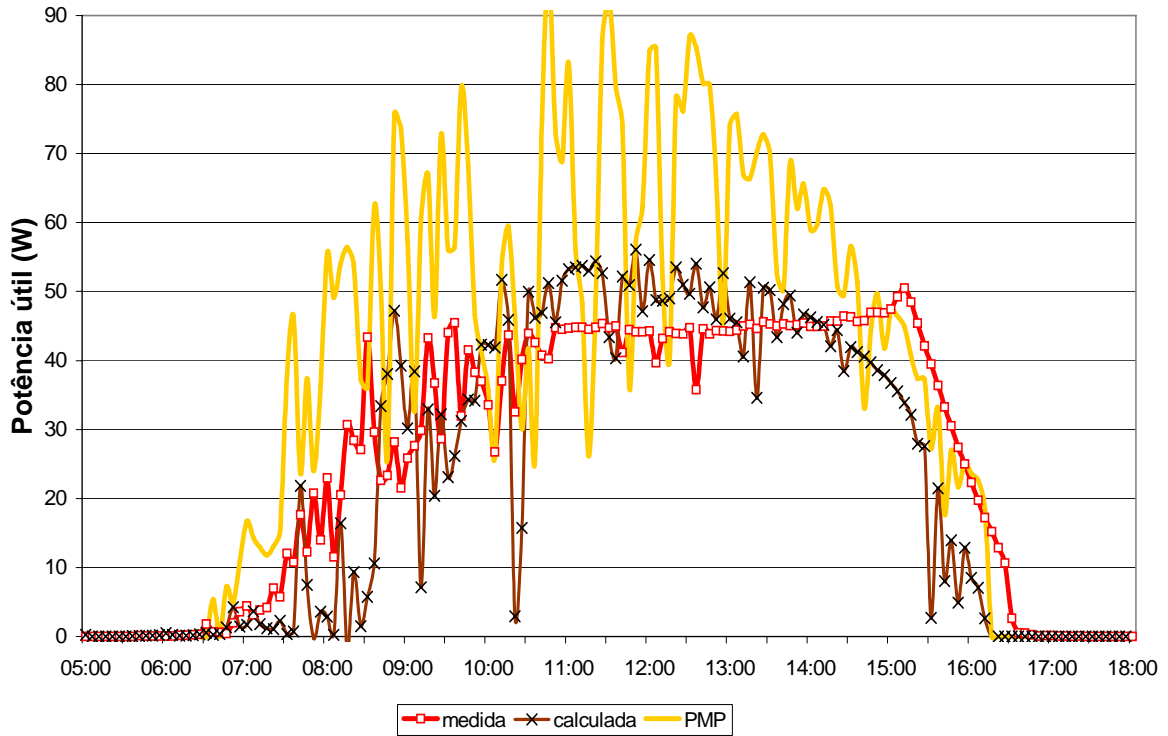


Figura 4.27 – Sistema 1: Potência útil medida e calculada e no PMP - 30/11/04

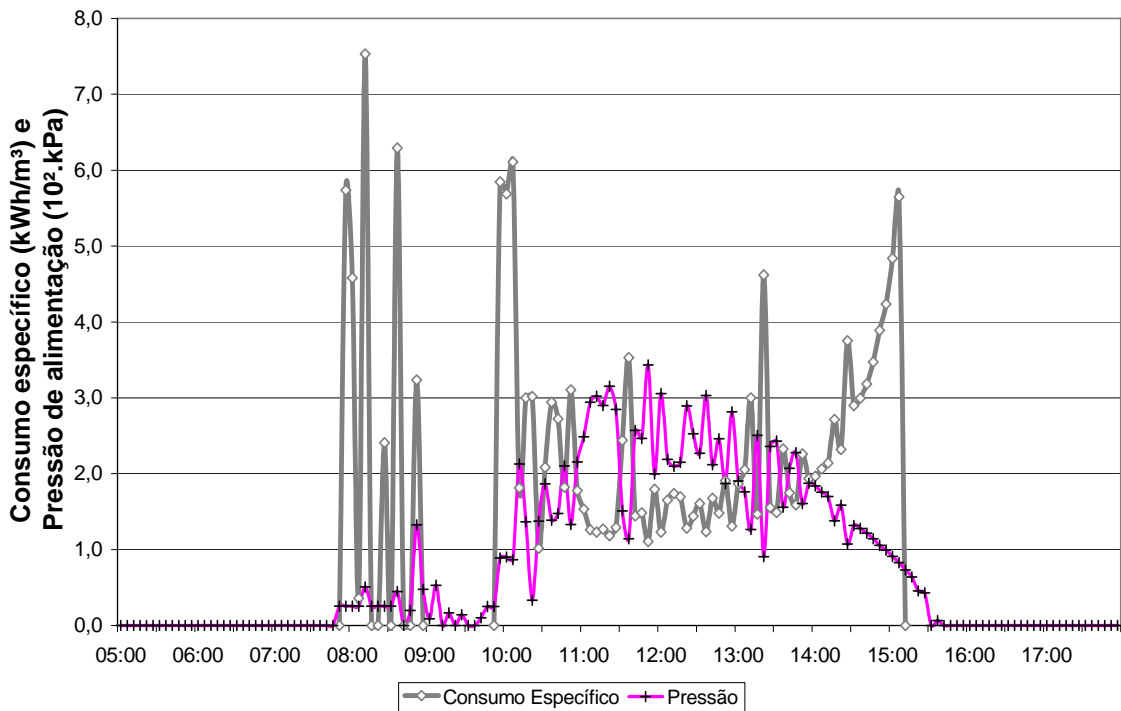


Figura 4.28 – Sistema 1: Consumo específico ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$) - 30/11/04

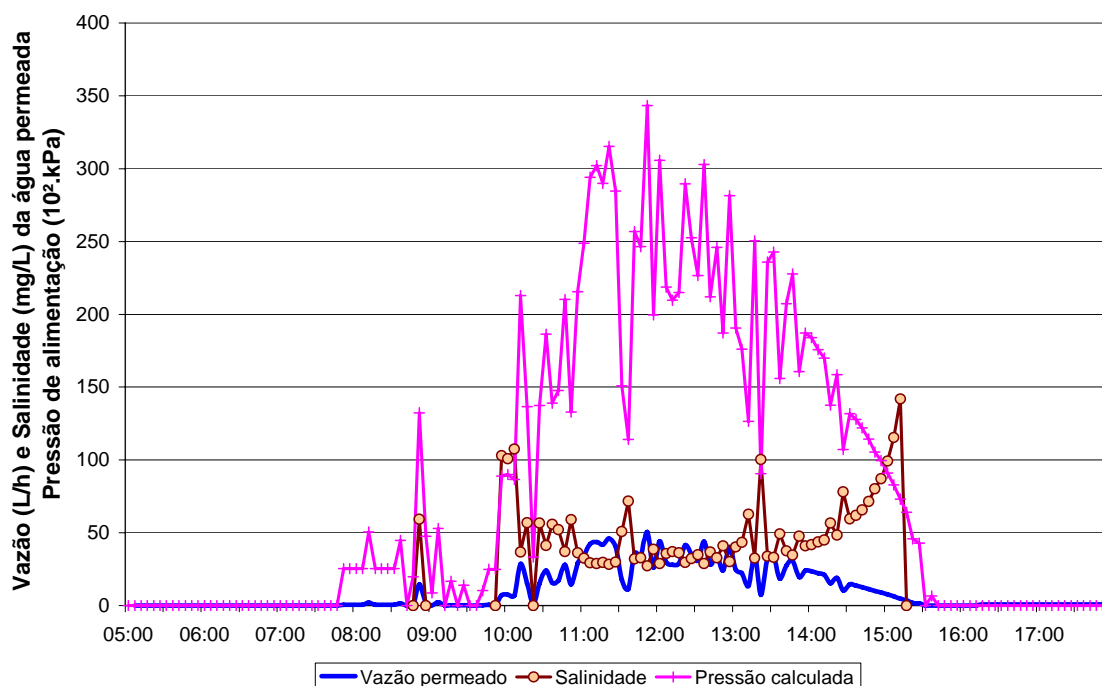


Figura 4.29 – Sistema 1: Pressão; Salinidade e vazão do permeado - 30/11/04

Outro fator que é diretamente afetado pela intensidade de radiação solar é a concentração de sais no permeado, como mostra a Figura 4.29. Em períodos de baixa pressão, a salinidade do permeado aumenta, chegando a valores acima de 100 mg.L^{-1} . No entanto, pode-se notar que a produção de permeado também fica muito reduzida, o que, no fim do dia, não representa muito. Resta saber a influência disso na integridade da membrana. Entretanto, como visto nas experiências mundiais levantadas no item 2.3, diversas unidades têm operado sob essas condições, sem indicarem perdas significativas de vida útil.

A Figura 4.30 mostra um dos pontos considerados de maior importância para a membrana de OR, uma vez que a taxa de recuperação que garante que ela seja constantemente “lavada”, isto é, que não forme uma concentração de sais muito elevada sobre a membrana, aumentando assim a possibilidade de precipitação e a decorrente incrustação.

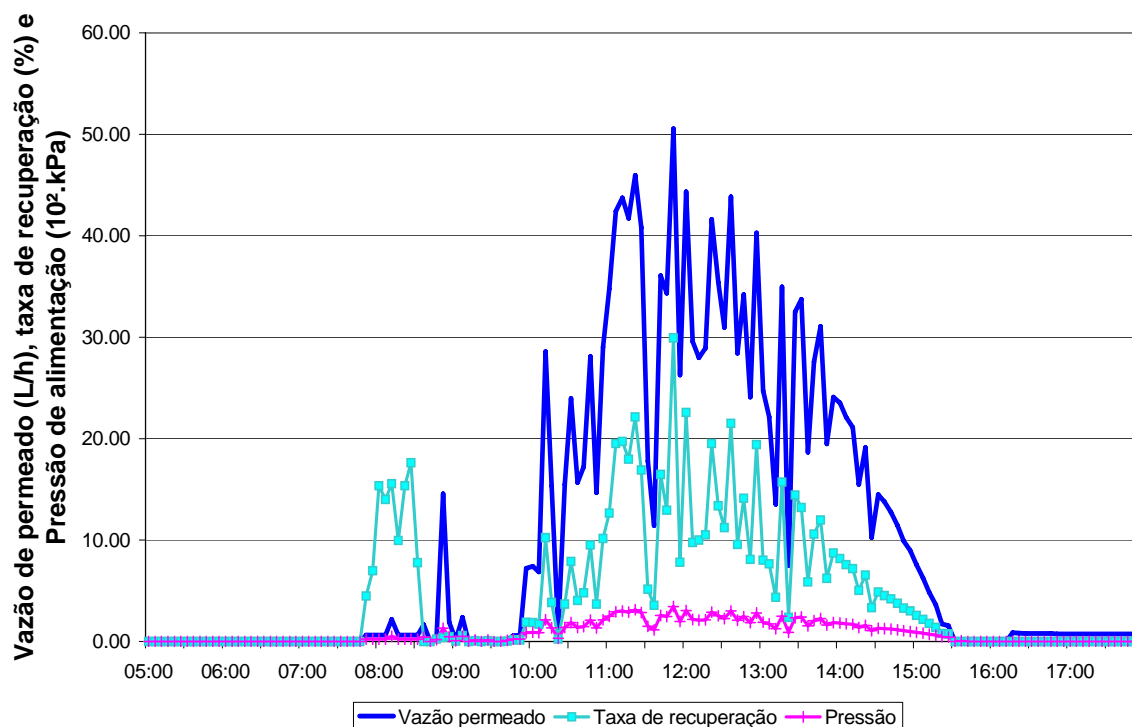


Figura 4.30 – Sistema 1: Taxa de recuperação - 30/11/04

As médias dos principais índices da operação da unidade OR-FV sem baterias com acoplamento direto entre o arranjo FV e o motor, obtidos via simulação, durante o dia de 30/11/04, formam a Tabela 4.1. Lembra-se, novamente, o cuidado que se deve tomar na utilização dessas médias, sempre tendo o cuidado de considerar as variações demonstradas nos gráficos.

Tabela 4.1 – Resultados do dia 30/11/04: índices de operação

Índice	Sistema 1
Produção diária de permeado	124,5 L
Salinidade do permeado (STD)	38,5 mg.L ⁻¹
Pressão média de operação	202 kPa
Taxa de recuperação média	7,2 %
Período diário de operação	4,66 h
Consumo específico médio	2,21 kWh.m ⁻³
Relação potência-produção	0,88 Wp.L ⁻¹
Eficiência média em seguir o PMP	65,1 %
Perda média no cabeamento	2,21 W

4.3.2. Sistema 2: unidade OR-FV usando o SMP

Os componentes da unidade de OR-FV sem baterias, usando o SMP (conversor CC-CC abaixador) e suas inter-relações, são apresentados na Figura 4.31 através de diagramas de blocos. Neles pode-se notar as diversas malhas de

alimentação caiu abaixo dos 100 kPa. No gráfico, aparentemente, o sistema não parou, mas, na realidade, o motor teve uma parada de alguns minutos. Às 14:20 h foi aberta totalmente a válvula, reduzindo a pressão a zero. A simulação obteve erros médios da ordem de 8 % na pressão e 9 % na vazão.

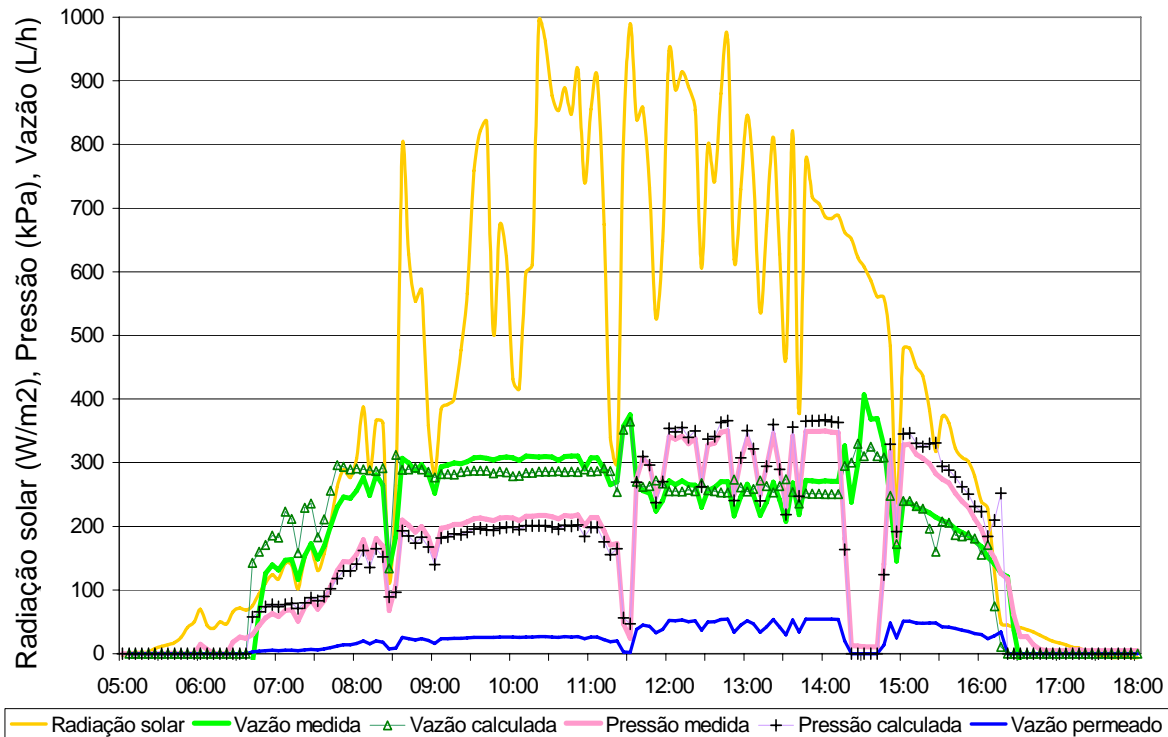


Figura 4.32 – Sistema 2: Pressão e vazão medidas dia 19/11/04 e calculadas (marcas)

Um dia típico no Ceará, no período seco, foi exposto na Figura 4.33; pela manhã existem consideráveis perturbações da radiação solar, o que não ocorre à tarde. Considera-se uma perturbação tudo que ocorre fora da curva média da radiação solar, simbolizada pela curva vermelha tracejada. No período da tarde nota-se que, durante duas horas seguidas, iniciando às 13:25, nenhuma grande perturbação foi medida. Os erros, nesse dia, ficaram em 7 % e 10 % na pressão e vazão de alimentação, respectivamente. Esse dia, 04/12/04, serve como referência para traçar os próximos gráficos.

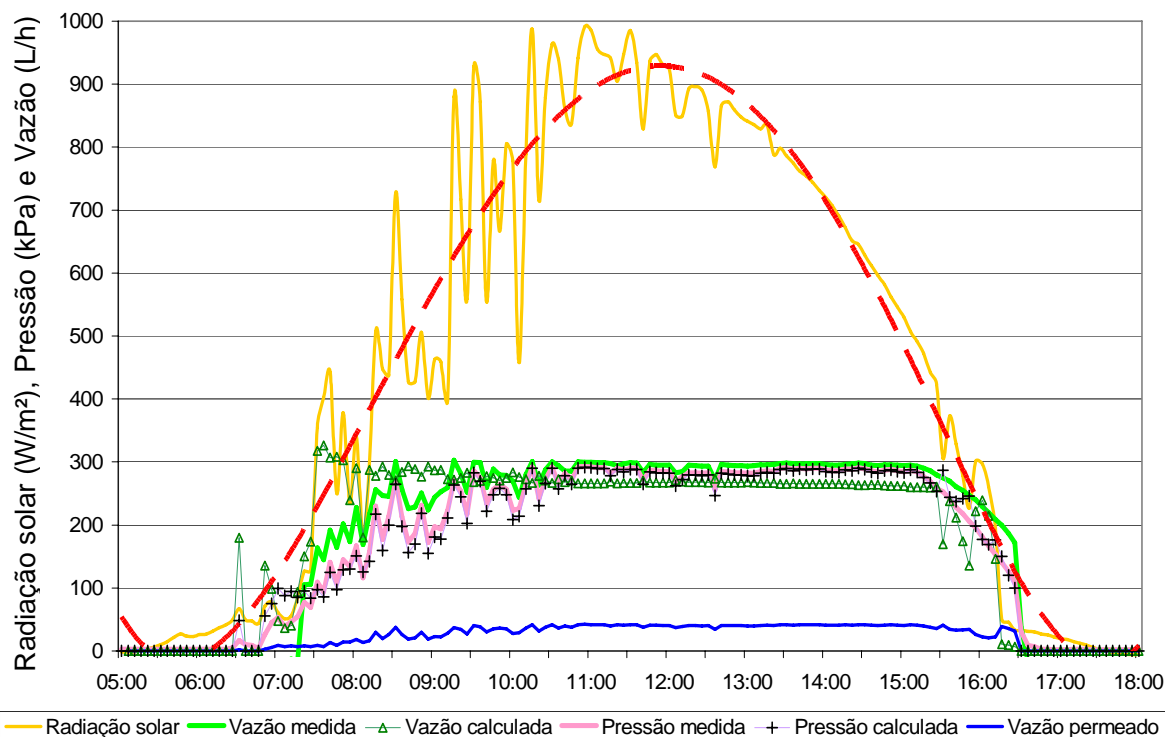


Figura 4.33 – Sistema 2: Pressão e vazão medidas dia 04/12/04 e calculadas (marcas)

Pode-se notar, ainda na Figura 4.33, que às 6:30 e às 7:30 o modelo apresentou uma grande divergência entre a vazão medida e calculada pelo modelo. Nesse caso dois fatores devem ser levados em consideração: primeiramente, trata-se de uma região em que o sensor de vazão não possui muita precisão e, por último, o modelo linear adotado possui algumas limitações no transitório da partida. Esse erro é normalmente observado em instantes que coincidem períodos de baixa pressão e grandes variações da radiação solar. No entanto, esse erro não desvalida o modelo, visto que nesses momentos a produção de permeado é baixa, não representando uma diferença significativa no resultado final.

A Figura 4.34 mostra a diferença entre a potência medida e calculada que foi consumida pela carga (útil). Observa-se que em alguns instantes a variação chega a 30 %, mas no geral não passa de 8 %. Importante notar que nos momentos de maior potência o erro reduz bastante.

Outro ponto interessante é a análise das potências, gerada e útil, dentro do modelo proposto, comparando, sobretudo, com o valor teórico no PMP.

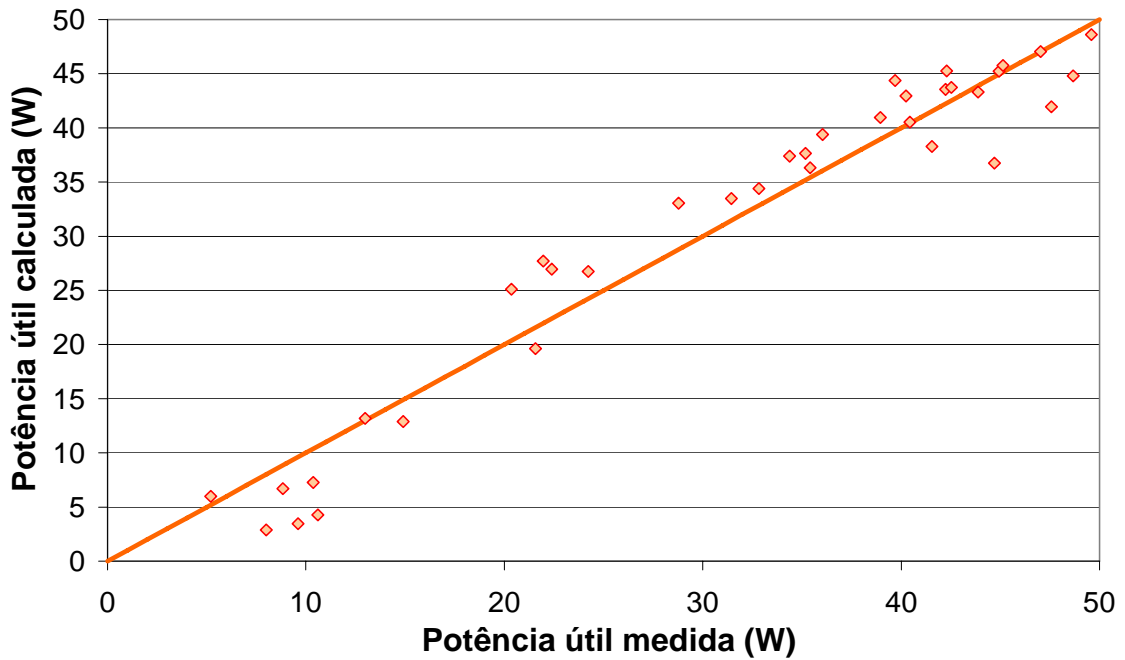


Figura 4.34 – Sistema 2: Validação da potência útil entregue à carga - 04/12/04

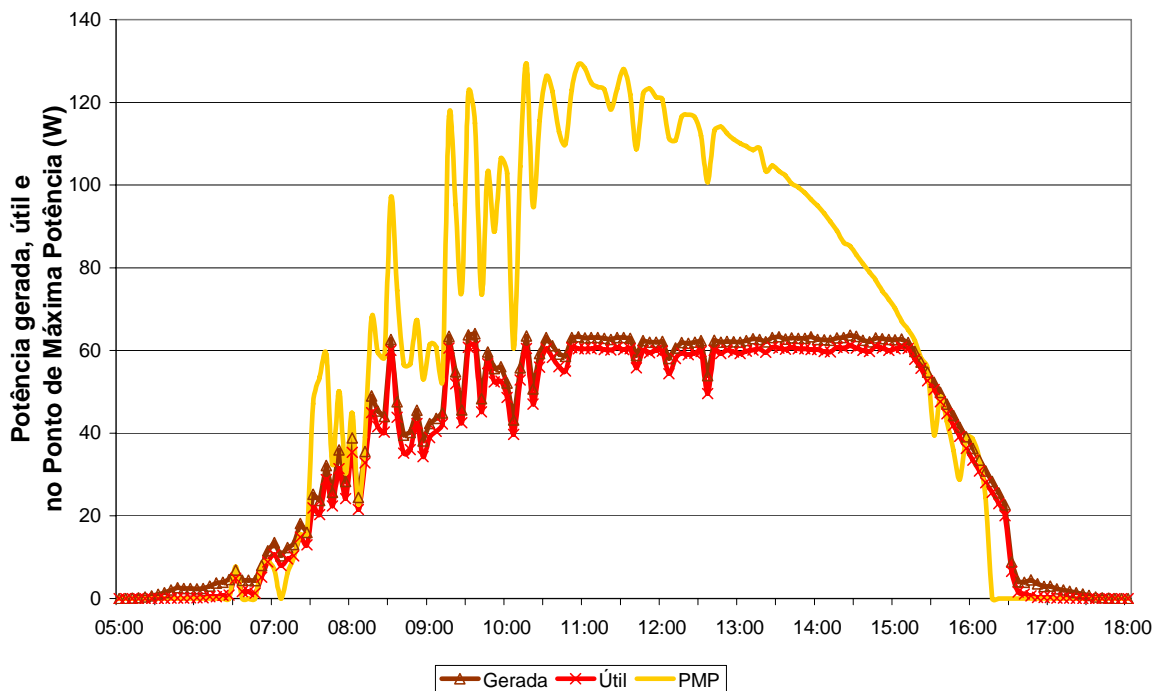


Figura 4.35 – Sistema 2: Potência gerada, útil e no PMP - 04/12/04

Para mostrar isso, a potência gerada pelo arranjo FV e a consumida pelo motor-bomba (útil) foram traçadas na Figura 4.35, juntamente com a potência máxima que poderia ser gerada, teoricamente, se o sistema estivesse seguindo o PMP. Essa figura revela as atuações do algoritmo MTF no conversor CC-CC, como visto no item 3.4.2. Entre as atuações passíveis de serem notadas está a limitação do valor máximo de tensão entregue à carga, notado pelo corte na curva

da potência gerada, das 11:00 às 15:30. Isso representa mais de quatro horas de funcionamento da unidade OR-FV com pressão quase constante. Durante o período em que a tensão de saída não supera a tensão nominal do motor-bomba, o algoritmo mantém a tensão de entrada perto da Melhor Tensão Fixa – MTF. O resultado disso pode ser observado pela proximidade da potência gerada à PMP durante as primeiras e últimas horas do dia.

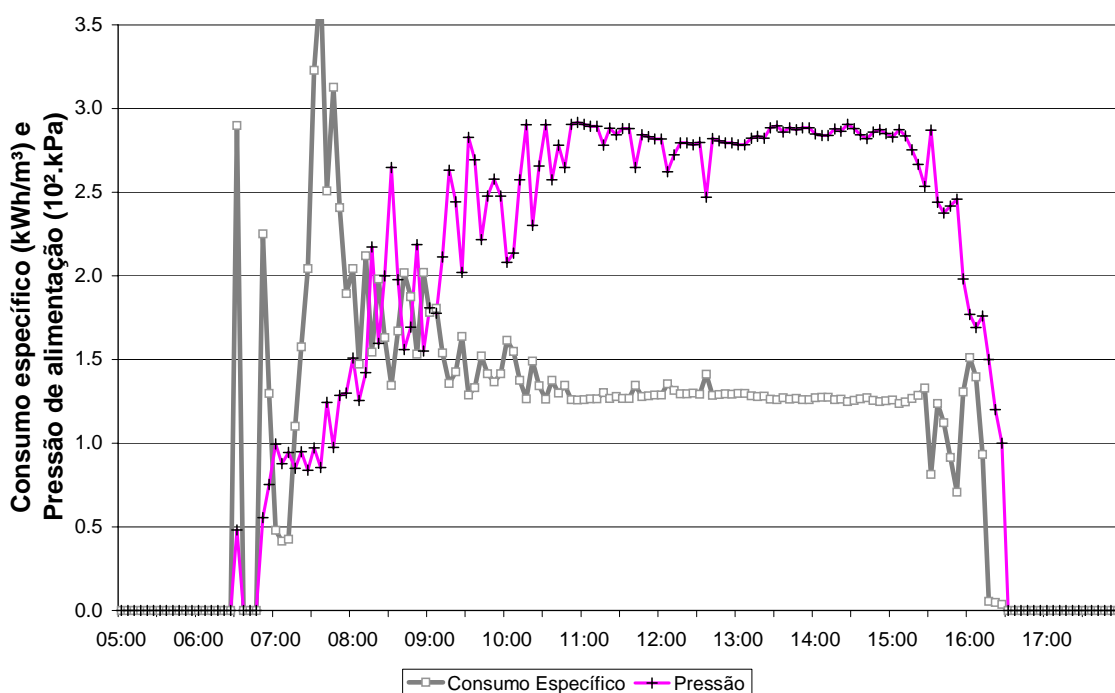


Figura 4.36 – Sistema 2: Consumo específico e pressão de alimentação - 04/12/04

A Figura 4.36 mostra a relação do consumo específico com a pressão de alimentação. A visualização da influência da pressão de alimentação e da vazão de permeado na taxa de recuperação é mostrada na Figura 4.37.

Para finalizar a validação do Sistema 2 proposto, deve-se verificar a “qualidade” da água permeada, isto é, se a salinidade permanece em patamares aceitáveis. Ressalta-se que as simulações adotaram uma água de alimentação com 800 mg.L^{-1} e que o objetivo é produzir uma água com menos de 500 mg.L^{-1} .

A Figura 4.38 mostra a salinidade do permeado em função da pressão de alimentação. A vazão de permeado foi inserida nessa figura, para enfatizar que é pequena a produção de água com salinidade acima de 50 mg.L^{-1} . Nota-se que quanto maior a pressão, menor a quantidade de sólidos totais dissolvidos no permeado. Se toda água produzida fosse colocada em um recipiente, no final

desse dia, haveria 305 litros de água com uma concentração de 32,5 mg.L⁻¹ de STD.

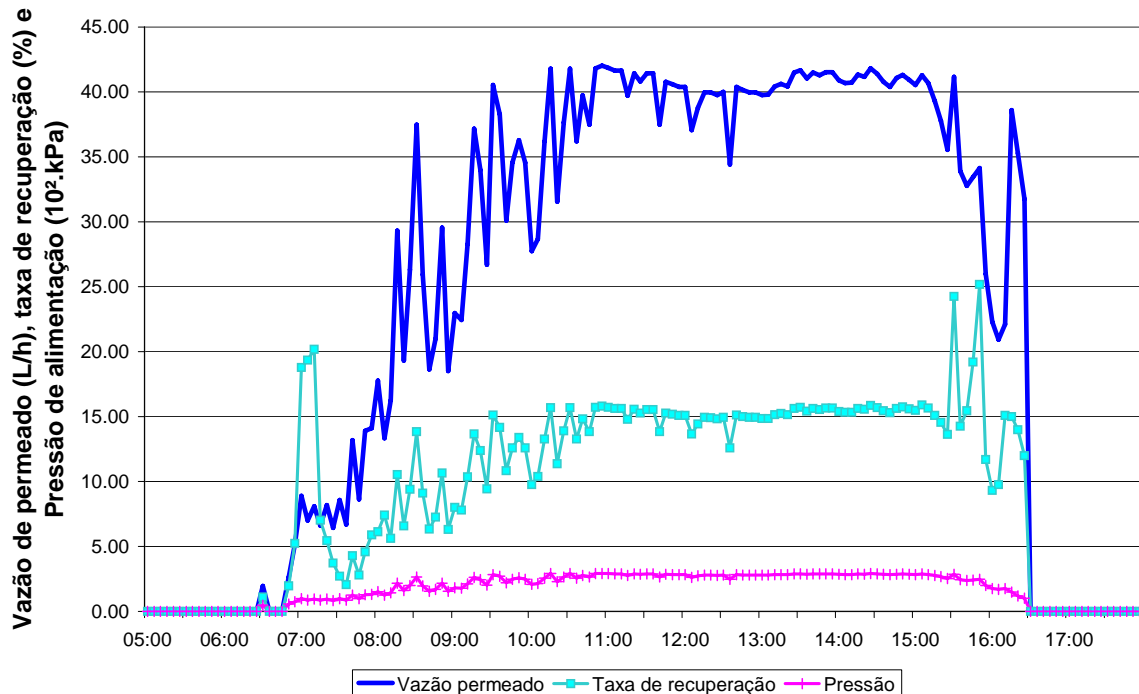


Figura 4.37 – Sistema 2: Vazão de permeado, taxa de recuperação e pressão

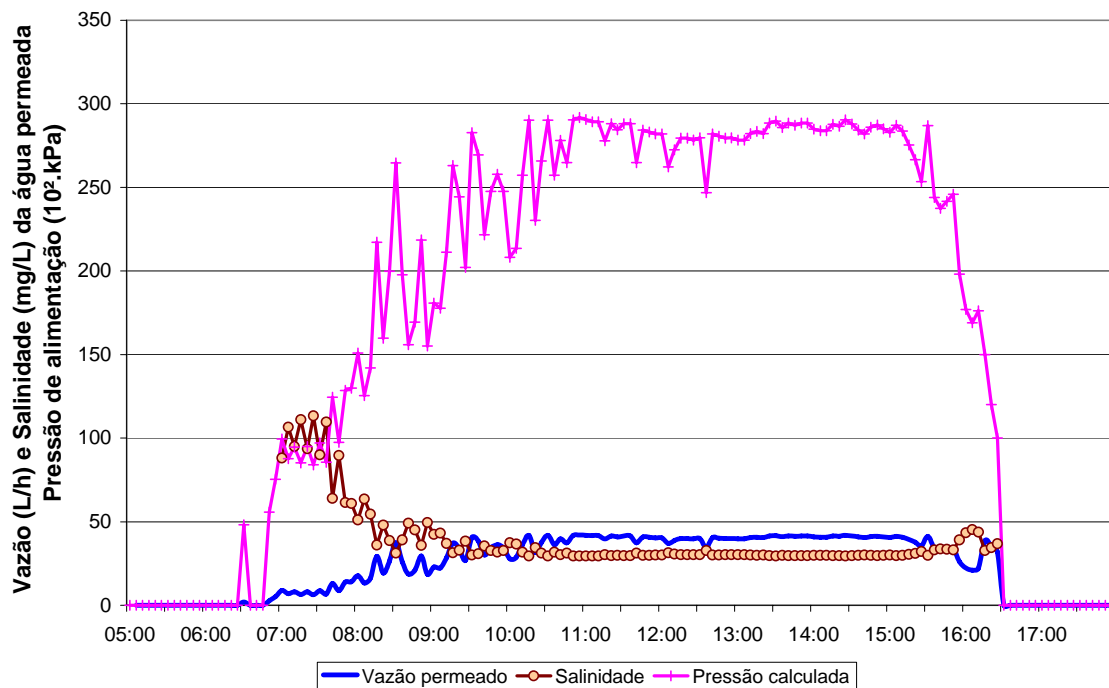


Figura 4.38 – Sistema 2: Vazão de permeado, salinidade e pressão - 04/12/04

Para se ter uma idéia da performance da unidade OR-FV sem baterias, usando SMP durante esse dia, os principais índices médios foram aglutinados na

Tabela 4.2. A produção média de permeado ficou em 29,3 L.h⁻¹ com um consumo específico de 1,4 kWh.m⁻³.

Tabela 4.2 – Resultados do dia 04/12/04: índices de operação

Índice	Sistema 2
Produção diária de permeado	305,2 L
Salinidade do permeado (STD)	32,4 mg.L ⁻¹
Pressão média de operação	249,5 kPa
Taxa de recuperação média	12,9 %
Período diário de operação	8,67 h
Consumo específico médio	1,4 kWh.m ⁻³
Relação potência-produção	0,54 Wp.L ⁻¹
Eficiência média em seguir o PMP	66,3 %
Perda média no cabeamento	3,16 W
Perda média no conversor CC-CC	3,01 W

Algumas perdas significativas, foram medidas, como no conversor CC-CC, que consumiu cerca de 5,6 %, e no cabeamento, que desperdiçou outros 5,8 % de toda energia gerada. O rendimento médio do conversor, operando entre 40 e 60 W, ficou em 95 %. Índice superior ao encontrado nos primeiros ensaios com carga resistiva, apesar da grande variação da corrente de alimentação (até 2 A) do motor-bomba, ver Figura 3.14; do longo período (1:35 h) que a radiação ficou abaixo de 400 W.m⁻²; e das perdas no circuito de controle (alimentação).

Nota-se, também, que muita energia ficou sem ser gerada nos períodos de alta radiação solar, motivo pelo qual a eficiência média em seguir o ponto de máxima potência ficou comprometida. Para se ter uma idéia, somente no período das 10:15 às 15:15 deixaram de ser gerados 234 Wh, quase 50 % dos 470 Wh produzidos durante o dia. Nota-se, com isso, que estratégias podem ser formuladas para utilizar essa energia para, por exemplo, bombear a água do poço até a unidade de OR. Importante salientar que nem todos os dias são iguais, necessitando, portanto, de uma lógica de complementaridade entre a aplicação principal dessa energia e a secundária.

4.4. COMPARAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Uma vez que os modelos matemáticos estejam devidamente detalhados e validados nos itens anteriores, assumem-se como pauta os resultados passíveis de serem estimados via comparação das simulações. Duas possibilidades são exploradas, primeiramente entre os modelos 1 e 2 originais e, por último, simulando a utilização de uma válvula de alívio no Sistema 1. Ambas as análises necessitaram de uma extrapolação dos dados da pressão de entrada para possibilitar a comparação dos dados coletados.

4.4.1. Comparação 1: modelos 1 e 2

A comparação entre os modelos começa pela escolha do dia a ser comparado, como a radiação solar possui uma característica aleatória, diversas possibilidades se abrem. Procura-se, entretanto, um dia, onde exista uma vantagem acentuada para o Sistema 1 – OR-FV sem SMP, isso porque o intuito é provar justamente o contrário. O dia 30/11/04 foi escolhido por apresentar perturbações mais amenas da radiação solar, o que resulta em uma estabilidade da operação. A Figura 4.39 mostra a alteração da vazão de permeado em função da pressão e vazão de alimentação, utilizando o Sistema 1.

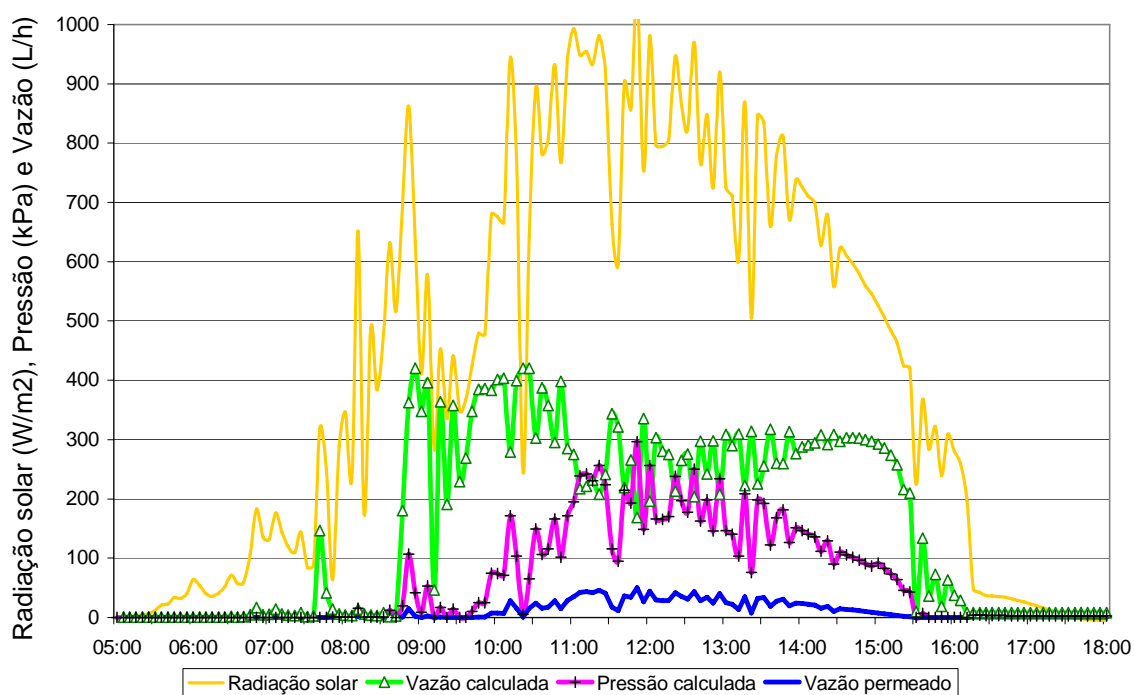


Figura 4.39 – Sistema 1: Pressão e vazão de alimentação e permeado - 30/11/04

Mesmo adotando um dia favorável, percebe-se que o modelo apresenta variações consideráveis na pressão de alimentação. O mesmo gráfico é traçado para o Sistema 2, no mesmo dia, e apresentado na Figura 4.40.

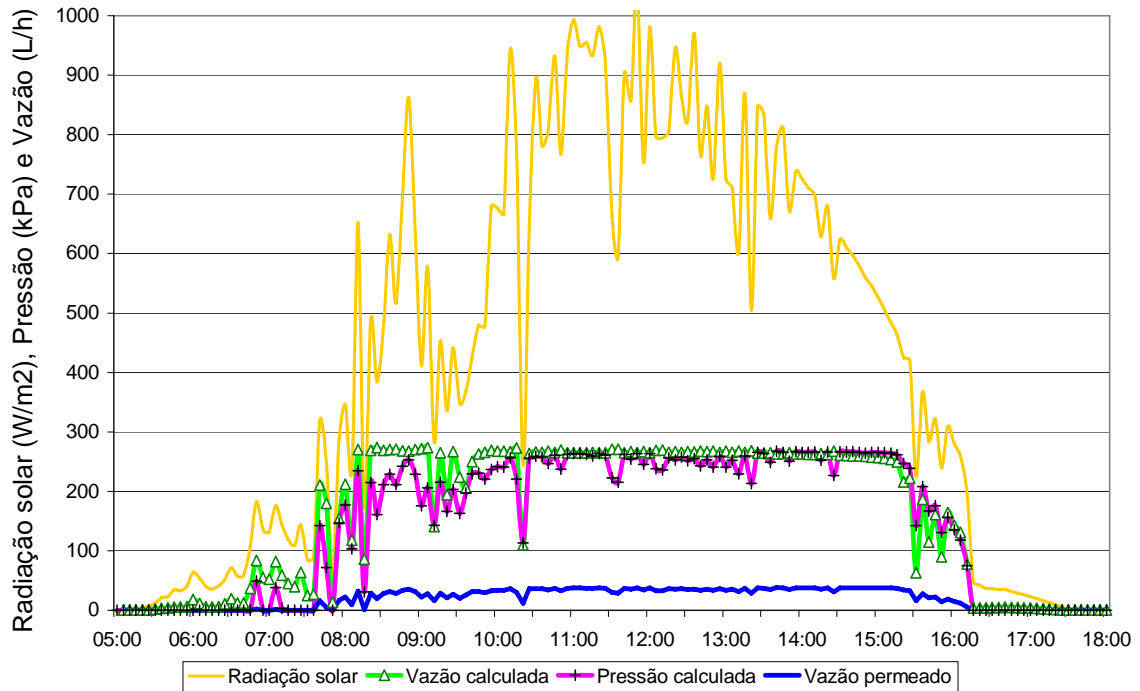


Figura 4.40 – Sistema 2: Pressão e vazão de alimentação e permeado - 30/11/04

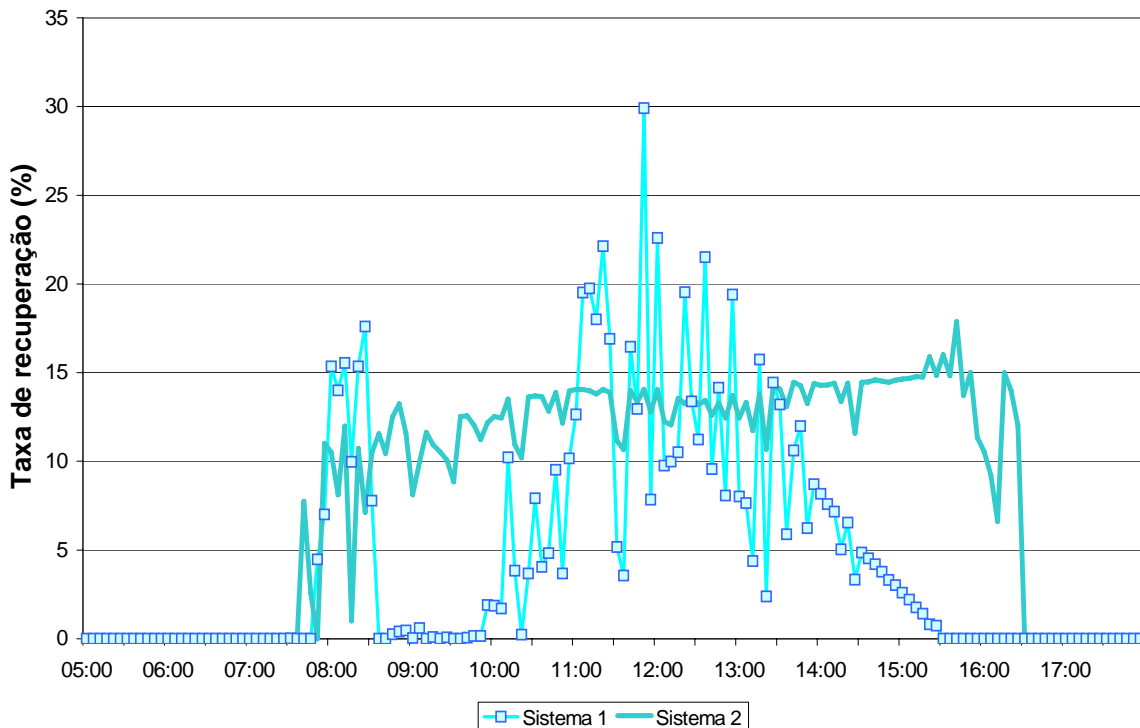


Figura 4.41 – Comparação 1: Taxa de recuperação - 30/11/04

Não são necessárias análises detalhadas para se indicar o Sistema 2 como mais estável e eficiente do ponto de vista da produção de permeado. Essa vantagem se deve, principalmente, ao fato do sistema manter por um período maior a pressão em patamares elevados. Um gráfico que elucida bem essa questão é a Figura 4.41, que mostra a variação na taxa de recuperação.

A priori, ao realizar comparações entre os modelos, teríamos que procurar igualar as taxas de recuperação médias. No entanto, sabe-se que esse índice não deve ultrapassar certos limites estabelecidos pelo fabricante e que o projeto deve ser feito pelo valor máximo. A formação em pirâmide do gráfico, isto é, a permanência por um período curto com índices elevados, leva a crer que esta não é a opção mais acertada para a utilização racional da energia solar. Os resultados coletados na Tabela 4.3 ajudam a verificar essa tendência. Índices como o período diário de operação, que passa de 4,66 para 8,25 h, ou o consumo específico mostram uma extensa vantagem do Sistema 2. Um ponto negativo do Sistema 2 é a perda gerada pelo conversor CC-CC, que representa 3,33 dos 6,82 W de perda média total encontrada neste modelo.

Tabela 4.3 – Resultados do dia 30/11/04: índices de operação

Índice	Sistema 1	Sistema 2
Produção diária de permeado	124,5 L	259,6 L
Salinidade do permeado (STD)	38,5 mg.L ⁻¹	34,6 mg.L ⁻¹
Pressão média de operação	202 kPa	230 kPa
Taxa de recuperação média	7,2 %	12,6 %
Período diário de operação	4,66 h	8,25 h
Consumo específico médio	2,21 kWh.m ⁻³	1,59 kWh.m ⁻³
Relação potência-produção	0,88 Wp.L ⁻¹	0,54 Wp.L ⁻¹
Eficiência média em seguir o PMP	65,1 %	80,4 %
Perda média total	2,21 W	6,82 W

4.4.2. Comparação 2: modelo 1 utilizando válvula de alívio

Os resultados da comparação entre os modelos, realizados no item 4.4.1, apontam para a necessidade de se controlar a pressão de alimentação para melhorar a performance do sistema. Essa melhora se deve ao fato do sistema com controlador operar durante um período maior com pressões elevadas. Explicando melhor, a pressão possui, como visto na Figura 4.9, uma relação direta com a corrente e esta com a radiação solar, isto é, quanto maior a radiação, maior a pressão. Lembrando que o sistema deve ser regulado pelo valor de pressão máxima ou no instante de máxima radiação solar. O resultado dessa estratégia de operação é que durante a maior parte do tempo, ou em momentos em que a radiação não é máxima, o sistema estará operando abaixo de sua capacidade (taxa de recuperação). Não significa dizer que o sistema deve operar sempre com pressão máxima, uma vez que nessa situação a vazão pode ser muito baixa, resultando em taxas de recuperação extremamente altas e a conseqüente redução da vida útil da membrana de OR.

Duas válvulas foram estudadas para realizar a limitação da pressão de alimentação do sistema, todas instaladas na saída do concentrado da membrana de OR. Uma consiste de uma válvula de alívio e outra uma válvula tipo esfera controlada via um sensor de pressão e motor de passo. Essas válvulas atuam, aumentando a vazão do concentrado, o que eleva a vazão de alimentação e acarreta na subseqüente atenuação da pressão de alimentação, ver curva característica do motor-bomba na Figura 4.8.

Na simulação dessas válvulas, considerou-se que a atuação da válvula na pressão de alimentação seria parecida com a exercida pelo conversor CC-CC. O artifício foi a utilização dos dados de pressão medidos com o Sistema 2 como referência para o Sistema 1. Contudo, outro problema surgiu; os dados medidos necessitavam de uma atenuação para, assim, adequar os valores da taxa de recuperação a valores suportáveis pela membrana.

A atenuação da pressão de alimentação foi resolvida com a inserção do bloco chamado Válvula nos dados de entrada, ver Figura 4.25. A utilização dessa atenuação talvez não seja a maneira mais correta de se estimar o funcionamento do sistema a pressões reduzidas, visto que o modo como a pressão absorve as

perturbações da radiação solar também depende da intensidade da pressão. Entretanto, como a variação na pressão é relativamente pequena, o erro dessa simplificação pôde ser desprezado. Essa consideração possibilitou a comparação dos resultados do Sistema 1, utilizando uma válvula de alívio e o Sistema 2. Essa simulação, chamada “Sistema 1 modificado” foi realizada com os dados do dia 27/11/04, com uma redução de 20 % no valor da pressão de alimentação.

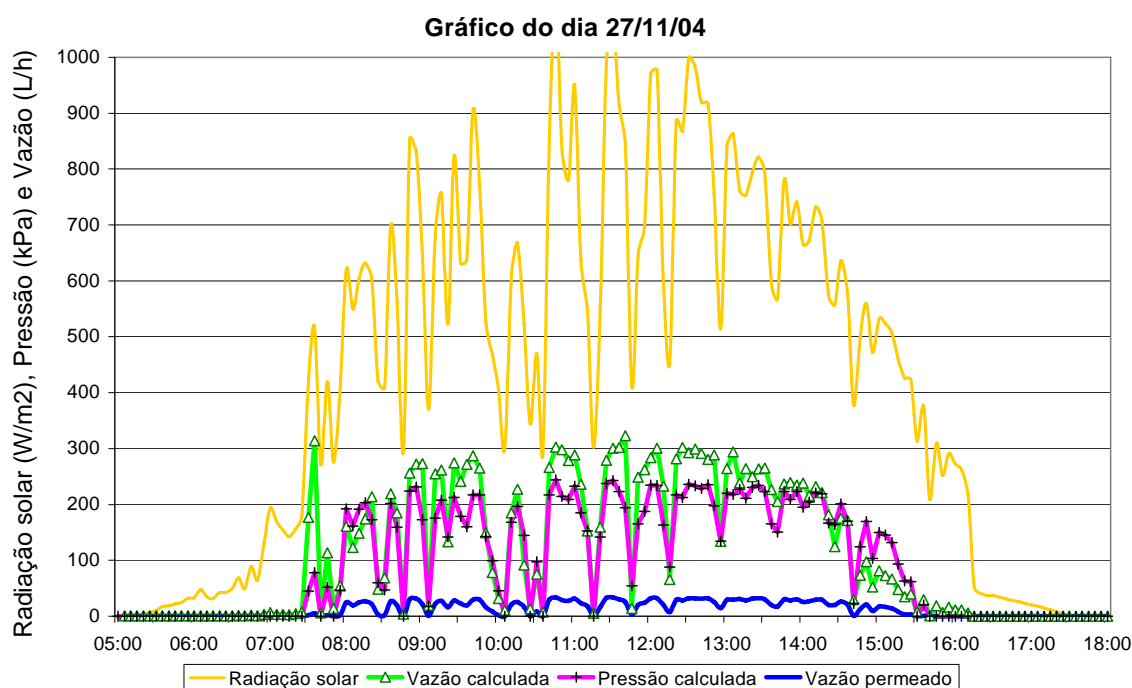


Figura 4.42 – Sistema 1 modificado: Pressão e vazão de alimentação e permeado

O fator utilizado na redução dos valores de pressão foi calculado para fixar a taxa de recuperação média acima dos 10 %, sem exceder o limite de 15 % por muito tempo. O Sistema 1 modificado apresentou um comportamento intermitente da pressão e vazão de alimentação em função da radiação solar, como pode ser observado na Figura 4.42 e, como consequência, pode-se observar a variação do volume de água permeado. A Figura 4.43 apresenta o mesmo gráfico para o Sistema 2. É de conhecimento que as membranas necessitam de um escoamento turbulento, para dificultar a precipitação dos sais e, com isso, dificultam a incrustação. Entretanto, segundo os fabricantes, as constantes paradas reduzem a vida útil da membrana. O dia escolhido, 27/11/04, apresenta radiações médias elevadas e perturbações de mesma intensidade.

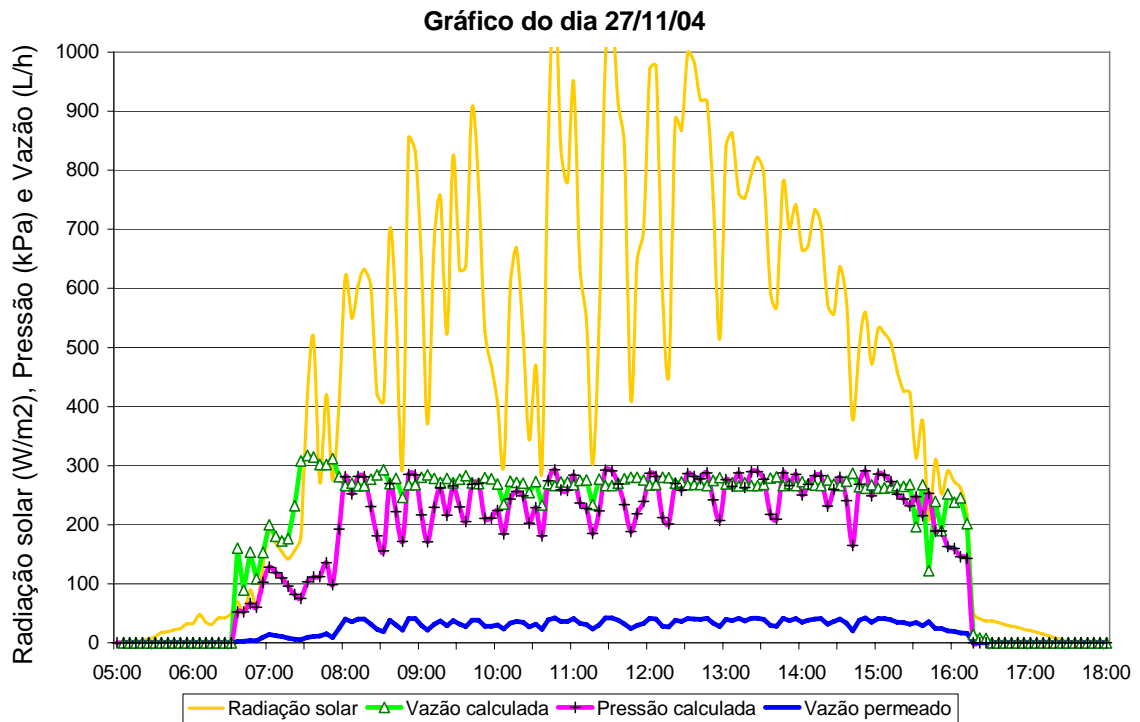


Figura 4.43 – Sistema 2: Pressão e vazão de alimentação e permeado

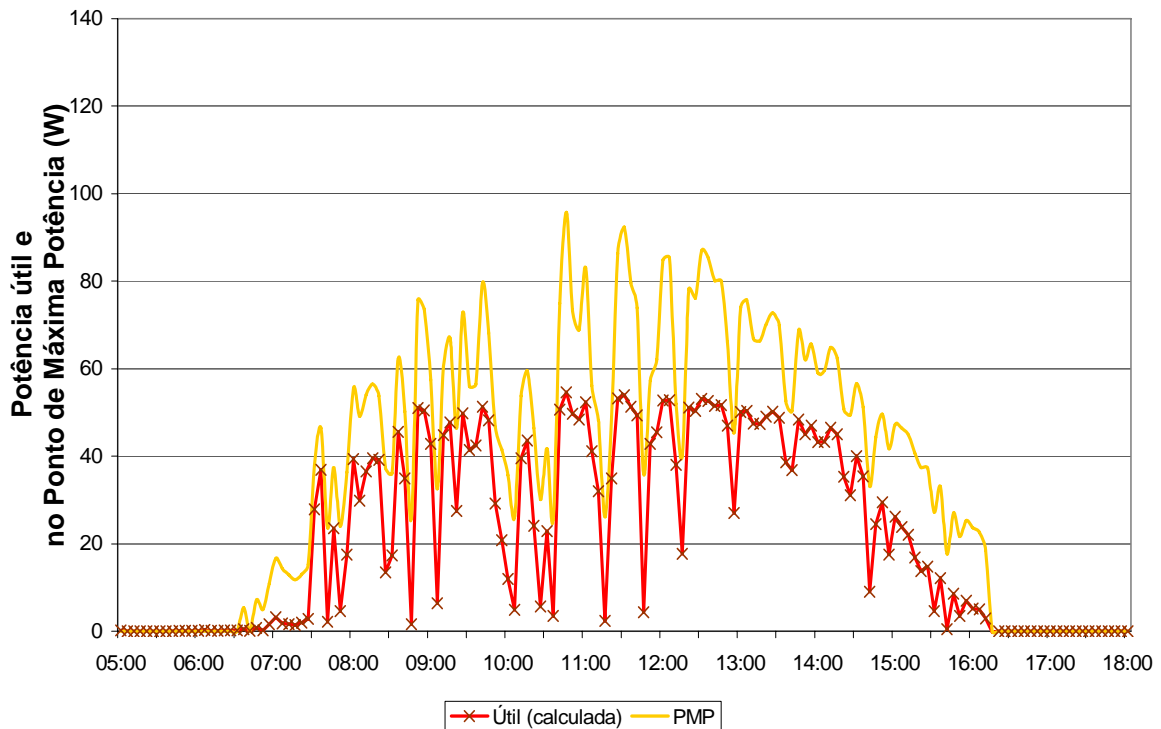


Figura 4.44 – Sistema 1 modificado: Potência útil e no PMP - 27/11/04

A Figura 4.44 mostra, usando o Sistema 1 modificado, a relação entre a potência útil, consumida pelo motor-bomba e a máxima que poderia ser gerado no caso de seguir o PMP. O mesmo gráfico foi desenhado na Figura 4.45 para o Sistema 2, mas acrescido da potência gerada. A diferença entre as curvas de

potência gerada e útil, são justamente as perdas no conversor CC-CC e no cabeamento.

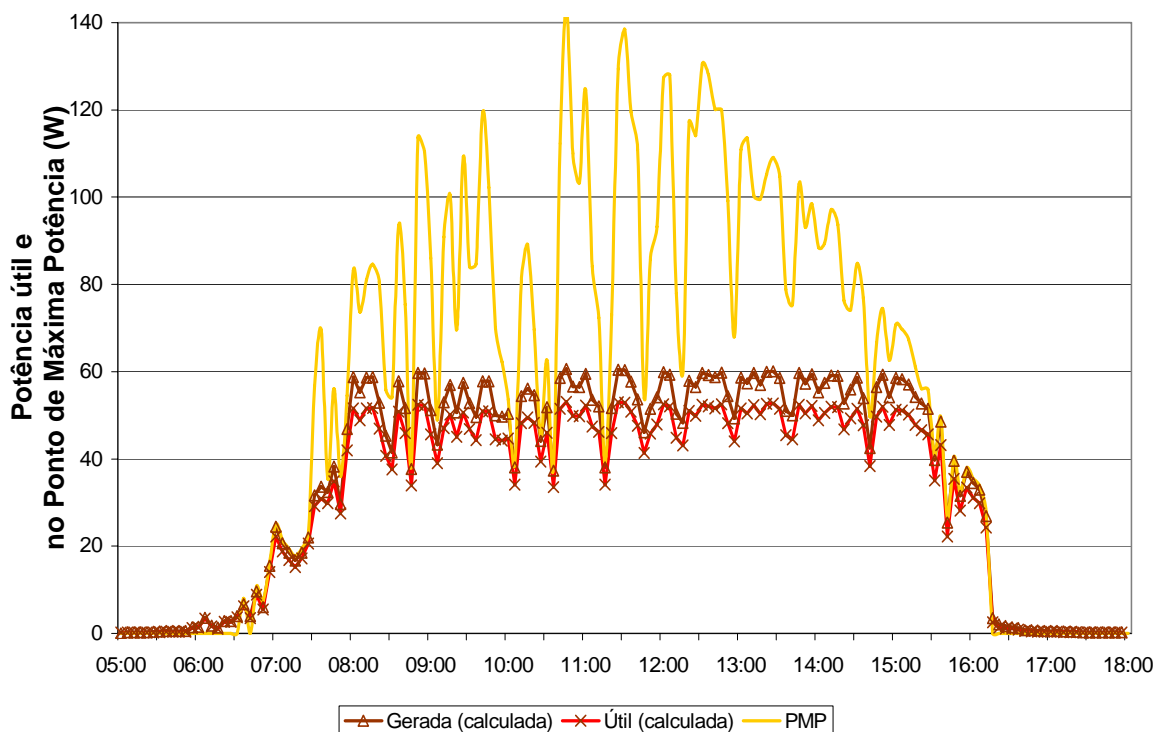


Figura 4.45 – Sistema 2: Potência gerada, útil e no PMP - 27/11/04

A comparação desses sistemas pode começar pela potência útil disponível para a carga. A Figura 4.46 mostra claramente que, a baixas radiações ($300 - 600 \text{ W.m}^{-2}$), o Sistema 2 disponibiliza mais energia à carga, possibilitando uma partida a um nível de radiação mais baixo. Ambos os sistemas possuem uma potência útil média próxima aos 40 W, entretanto, como pode ser visto na Figura 4.47 e 4.48, os sistemas apresentam características de pressão e vazão diferentes. A primeira colocação cabível, é que, apesar de possuírem potências parecidas, a relação tensão-corrente é diferente, isto é, para alcançar uma pressão mais elevada, o Sistema 2 possui um valor de corrente superior ao Sistema 1 modificado. Esse gráfico indica que o conversor CC-CC entrega a energia à carga de forma mais eficiente que o Sistema 1 modificado. Essas figuras mostram ainda a diferença de estabilidade dos dois sistemas: enquanto o Sistema 2 quase não sente as perturbações, o outro sistema apresenta várias paradas.

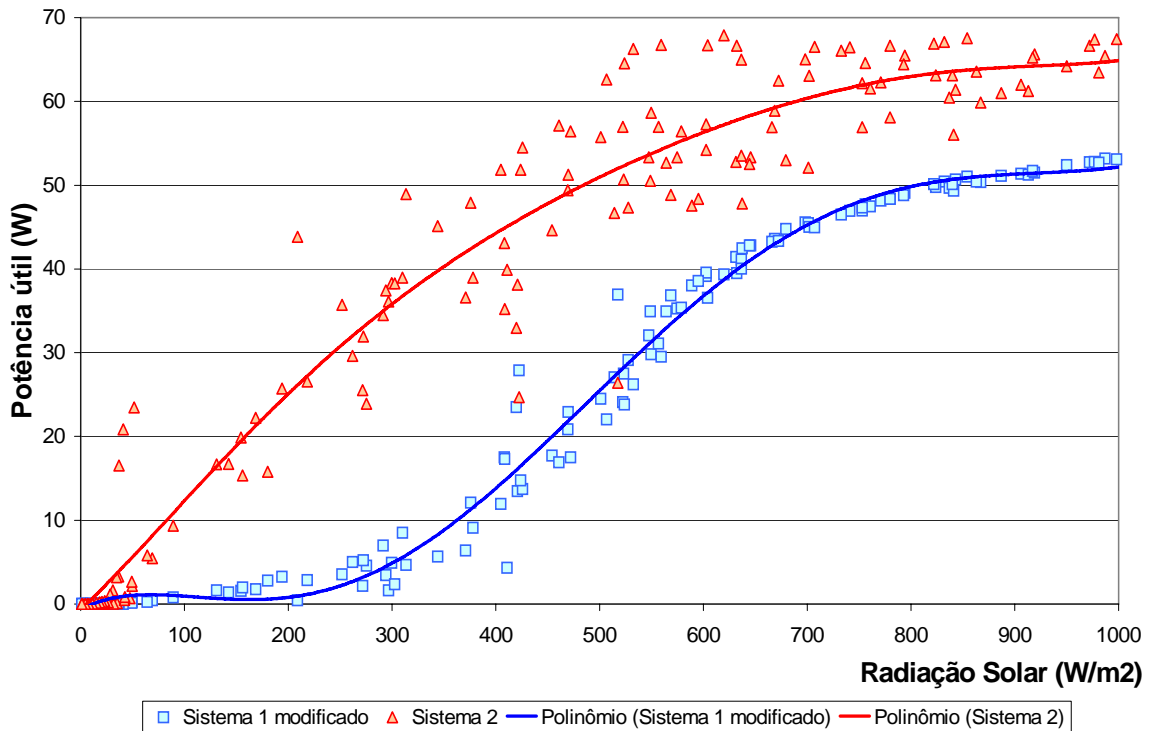


Figura 4.46 – Comparação 2: Potência útil - 27/11/04

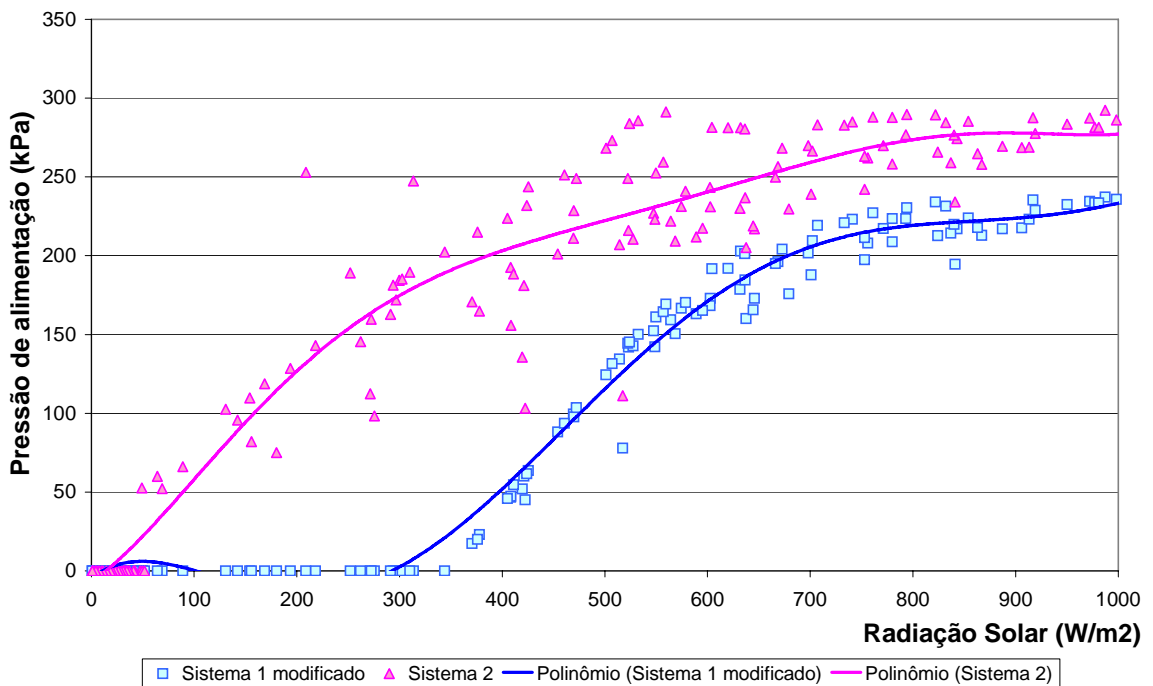


Figura 4.47 – Comparação 2: Pressão de alimentação

A Figura 4.48 revela a grande diferença de produtividade (água permeada) existente entre os dois sistemas, especialmente a níveis mais baixos de radiação solar. Acima de $500 W.m^{-2}$, o Sistema 2 produz, em média, mais de $30 L.h^{-1}$, enquanto o Sistema 1 modificado precisa de $800 W.m^{-2}$. A vantagem do Sistema 2

é também visualizada no gráfico do consumo específico (Figura 4.49). Analisando essa figura, reforça-se que o Sistema 2 aproveita de forma mais eficiente a energia gerada.

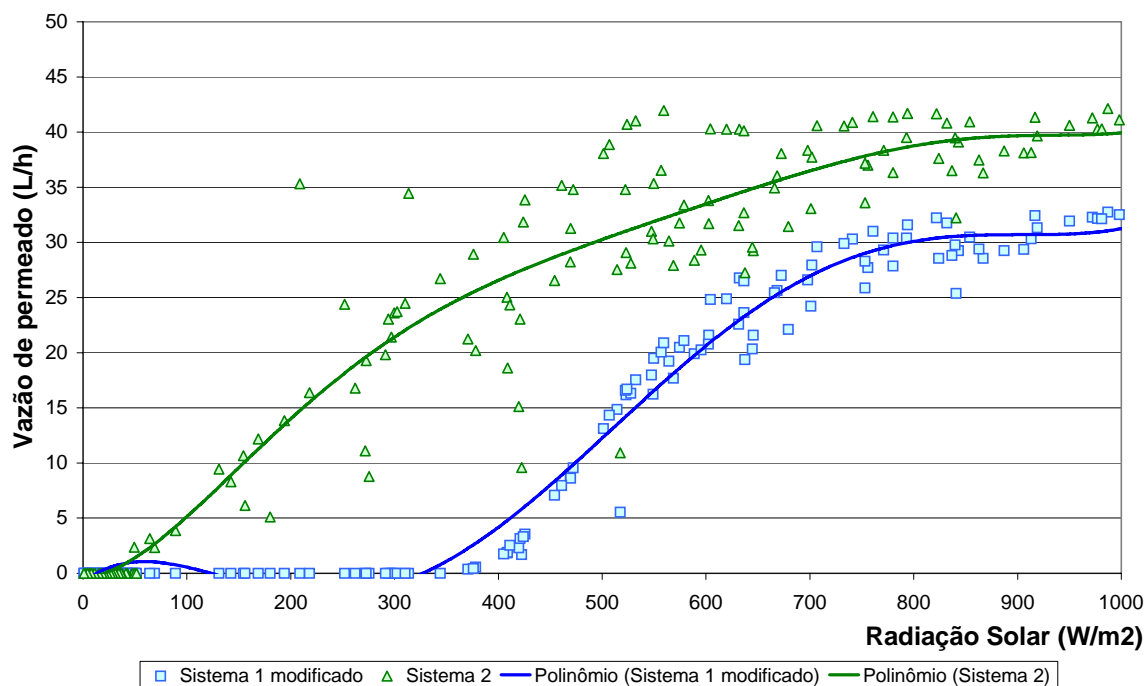


Figura 4.48 – Comparação 2: Vazão de permeado

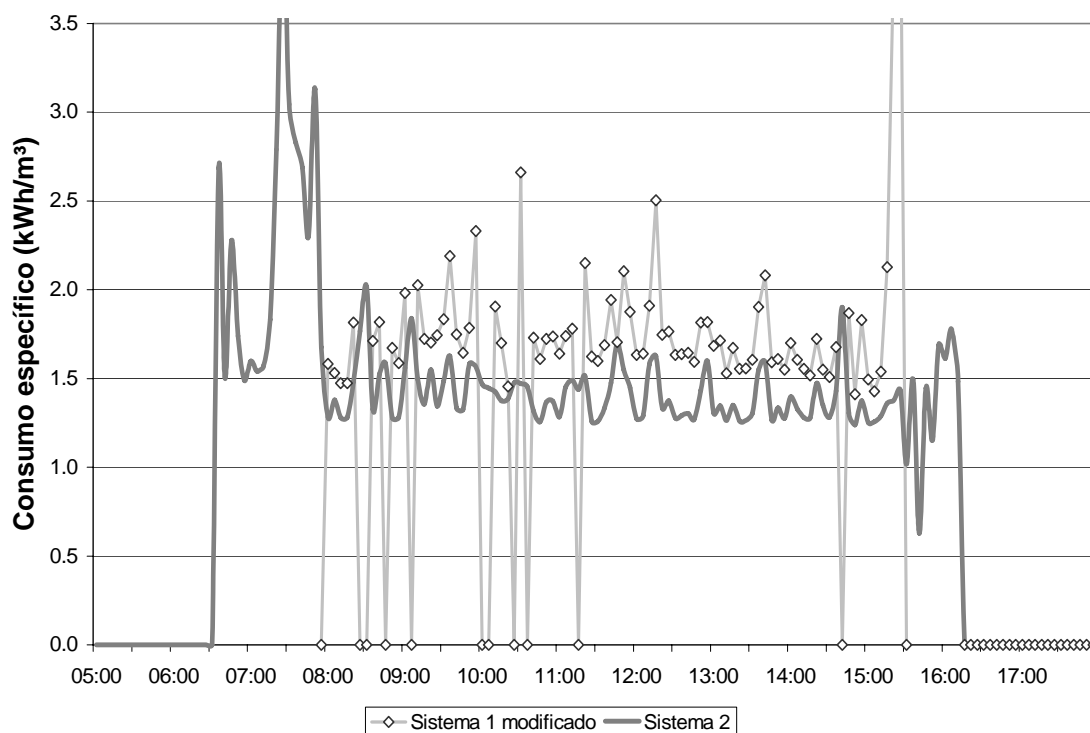


Figura 4.49 – Comparação 2: Consumo específico - 27/11/04

Quanto à salinidade do permeado, os dois sistemas exibiram resultados semelhantes, com pequena vantagem para o Sistema 2, conforme Figura 4.50.

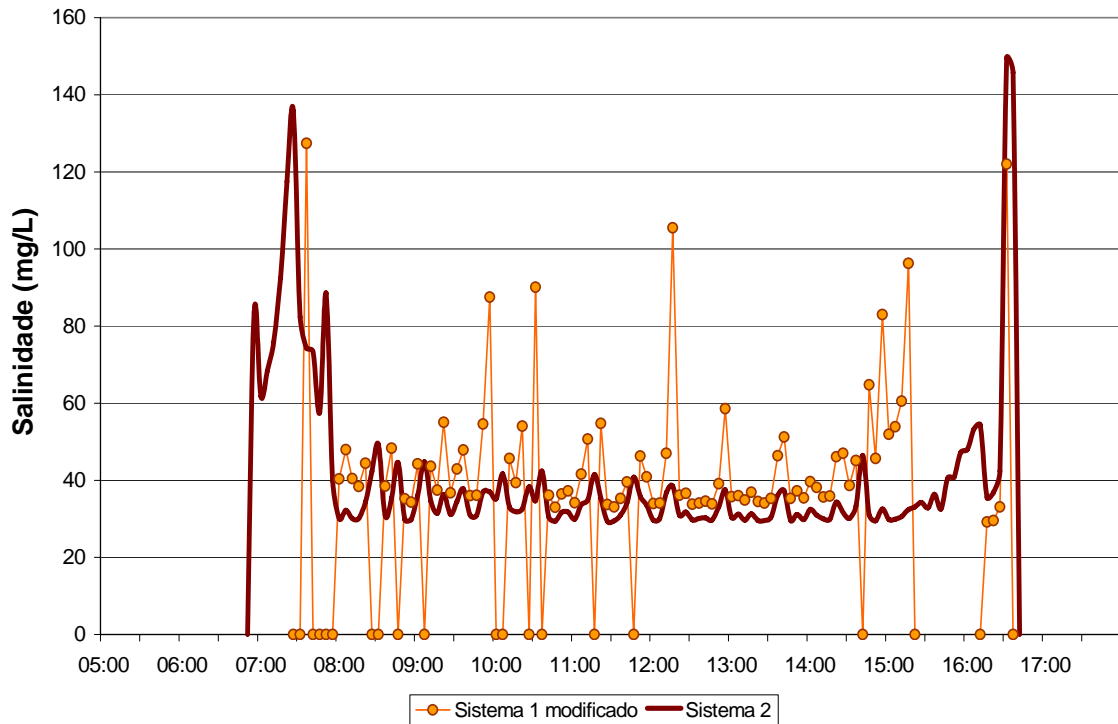


Figura 4.50 – Comparação 2: Salinidade do permeado - 27/11/04

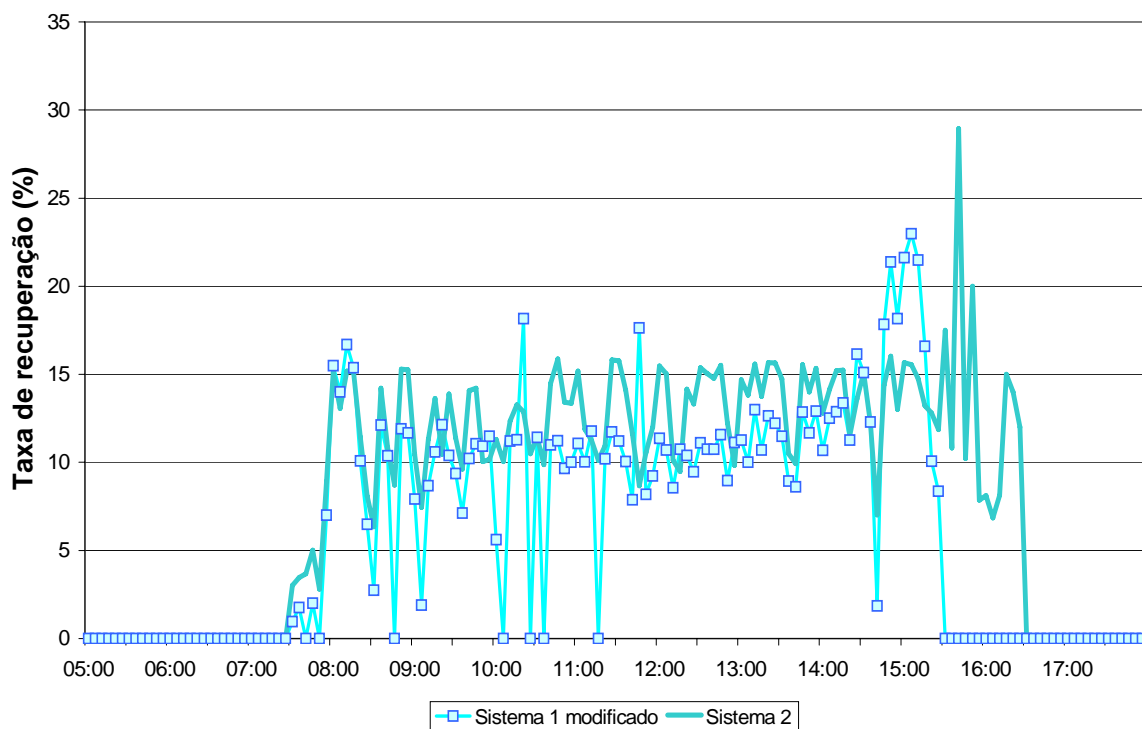


Figura 4.51 – Comparação 2: Taxa de recuperação - 27/11/04

A Figura 4.51 reflete a variação da taxa de recuperação dos dois sistemas, ambos apresentam variações, com pequena vantagem de estabilidade para o Sistema 1 modificado. Se fossem utilizados os dados de pressão sem atenuação, a taxa de recuperação média ficaria próxima aos 23 %.

Em quase todos os gráficos apresentados, existe alguns picos, principalmente na simulação do Sistema 2; isso se deve ao fato que esse sistema apresenta elementos armazenadores de energia, como capacitores e indutores, que no transitório da simulação apresentam alguns erros. Medições foram feitas e verificou-se que esses erros não influenciam muito no resultado, menos de 5 %. A incerteza de quase todas as unidades ficou, em média, próxima a isso. Em alguns casos, onde varia muito, o erro chegou a 20 %.

A inserção da válvula de alívio no Sistema 1 melhorou muito os índices e a performance do sistema em geral. Na Tabela 4.4 foram compilados os principais índices de comparação das unidades OR-FV. Nota-se, sobretudo, uma vantagem técnica significativa do Sistema 2, em comparação ao Sistema 1, com válvula de alívio ou não. O Sistema sem nenhum tipo de controle da pressão, como o Sistema 1, não apresenta praticamente nenhuma vantagem em relação aos demais. Se for analisado o tempo médio de funcionamento, o consumo específico ou a taxa de recuperação, a vantagem fica com os sistemas com controle da pressão.

Tabela 4.4 – Resultados do dia 27/11/04: índices de operação

Índice	Sistema 1	Sistema 1 modificado	Sistema 2
Produção diária de permeado	49,93 L	153,4 L	287,7 L
Salinidade do permeado (STD)	39,0 mg.L ⁻¹	39,8 mg.L ⁻¹	34,3 mg.L ⁻¹
Pressão média de operação	198,7 kPa	193,8 kPa	232,9 kPa
Taxa de recuperação média	3,38 %	10,2 %	11,3%
Período diário de operação	1,9 h	6,1 h	9 h
Consumo específico médio	14,6 kWh.m ⁻³	1,57 kWh.m ⁻³	1,53 kWh.m ⁻³
Relação potência-produção	2,20 Wp.L ⁻¹	0,72 Wp.L ⁻¹	0,57 Wp.L ⁻¹
Eficiência média em seguir o PMP	62,61 %	53,8 %	71,1 %
Perda média total	2,19 W	2,17 W	5,79 W

Outros índices que não foram medidos, mas com certeza apresentariam vantagem ao Sistema 2, são o número de paradas diárias, o tempo médio que a unidade fica parada e a quantidade de vezes que o relé de sobre-pressão atua.

Um ponto importante que deve ser ressaltado é que, o Sistema 2 não apresentou grandes variações de seus índices em todos os dias ensaiados, o que não ocorreu no Sistema 1. Para exemplificar, pode-se comparar os resultados do Sistema 1 das tabelas 4.1 e 4.4. Os índices que apresentaram as maiores diferenças foram a produção diária de permeado e o consumo específico médio. O motivo dessas variações entre os índices obtidos em dias diferentes, que chegaram a ser superior a 6 vezes, é a relação direta entre a radiação solar, a corrente elétrica de alimentação do motor, a pressão e a produção de água permeada. O seja, em momentos de baixa radiação, a corrente gerada pelo arranjo FV cai, reduzindo a pressão e, conseqüentemente, a quantidade de água permeada. Essa grande variação encontrada entre os dias ensaiados no Sistema 1 - sem SMP, demonstram a condição conservadora que os sistemas foram comparados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

"Mestre não é quem sempre ensina, mas quem de repente aprende"

*João Guimarães Rosa
Escritor brasileiro (1908-1967)*

O abastecimento de água potável e energia elétrica ainda é uma questão não resolvida para uma grande parcela da população mundial. A região semi-árida nordestina, onde se localizou esta pesquisa, reflete bem essa realidade. Esse trabalho procurou contribuir com o suprimento de água potável, através da dessalinização da água salobra oriunda de poços profundos, em regiões sem acesso à rede convencional de energia elétrica.

As tecnologias adotadas no projeto da unidade de dessalinização foram a fotovoltaica (FV) e a osmose reversa (OR). A união dessas duas tecnologias é justificada pela possibilidade de racionalizar a utilização dos recursos naturais locais (água e energia), alcançada através da complementaridade sazonal existente entre a precipitação de chuva e a radiação solar. Felizmente, as piores condições de radiação solar coincidem com a época mais chuvosa. Devido a isso, a unidade foi projetada considerando somente o pior caso do período seco. Os dados do período chuvoso devem servir de base para estudos da necessidade de se implantar outros meios de obtenção de água potável, como as cisternas.

Visando dar sustentabilidade ao suprimento de água potável à população sertaneja, medidas voltadas à redução dos custos e da necessidade de manutenção foram tomadas. A mais importante, entre elas, foi a proporcionada pela ausência do banco de baterias entre a geração FV e a carga. Ao mesmo tempo, a falta dessa altera, sobremaneira, a operação da unidade, tornando-a totalmente subordinada às condições instantâneas da radiação solar e da temperatura.

5.1. CONCLUSÕES

Um método foi desenvolvido para projetar unidades OR-FV sem baterias, envolvendo um estudo estatístico com médias a cada 10 minutos da radiação solar e da temperatura ambiente. Trabalhando esses dados foi possível gerar gráficos, para facilitar a visualização dos resultados que variam no tempo, sendo eles: histogramas da distribuição mensal nas diversas faixas de radiação solar, período contínuo máximo que a radiação solar ficou acima de um valor mínimo, no caso 300 W.m^{-2} , e a quantidade de minutos acumulados nessas condições no

mês. Esse método se mostrou capaz de estimar as condições mínimas mensais de funcionamento, isto é, o suprimento mínimo de água potável para a população.

Dois sistemas foram matematicamente modelados e validados experimentalmente. O Sistema 1 possui um motor-bomba acoplado diretamente a 2 módulos FV de 55 Wp cada. Para o Sistema 2 foram acrescentados 1 módulo FV de mesma potência e um conversor CC-CC abaixador com seguidor de máxima potência entre o arranjo FV e a carga. A validação foi realizada comparando os valores calculados com as medições reais em campo, admitindo um erro médio máximo de 10 %; com exceção da membrana de OR que foi validada via programa computacional do fabricante.

Analisando os algoritmos comerciais, para seguir o ponto de máxima potência (PMP), notou-se que esses apresentam dificuldades para regular a energia entregue à carga, devido à utilização do ponto de inflexão da curva de potência do módulo FV como método de encontrar o PMP. No caso do Sistema 2, onde a geração pode ser superior à demanda da carga, a adoção de meios que limitem a potência entregue a carga se torna obrigatória. As especificidades do Sistema 2 motivaram o desenvolvimento, nessa dissertação, do conversor CC-CC abaixador e de um algoritmo para seguir o ponto de máxima potência, chamado Melhor Tensão Fixa - MTF. Resultados experimentais mostraram que, além de alcançar a mesma eficiência de seguir o ponto de máxima potência (PMP) da maioria dos equipamentos comerciais, cerca de 80,5 %, esse algoritmo proporciona maior simplicidade, robustez, baixo custo e a possibilidade do controle da energia entregue à carga com a simples variação de um valor de tensão.

As simulações possibilitaram a comparação entre os dois sistemas, realizada em duas situações: com e sem a inserção de uma válvula de alívio no Sistema 1. Todas as comparações mostraram uma ampla vantagem do Sistema 2, seja na produção média diária de permeado, no período diário de operação, no consumo específico, na eficiência em seguir o ponto de máxima potência ou na relação potência FV por litro de água permeada. Devido à radiação solar possuir uma característica aleatória, fica comprometido o cálculo de um valor universal para esses índices, na verdade eles só são válidos para aquele dia em específico. Nota-se, com isso, a dificuldade de escolher o dia a ser realizada as comparações. Procurou-se, então, um dia onde exista uma vantagem acentuada para

o Sistema 1. Isso porque o intuito foi provar justamente o contrário. No dia 27/11/04, a unidade OR-FV sem baterias, utilizando o SMP, representado pelo Sistema 2, conseguiu operar durante 9 h. Como resultado, tem-se a 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 1,53 kWh.m⁻³. A salinidade da água de alimentação utilizada nas comparações possuía 800 mg.L⁻¹ de sólidos totais dissolvidos.

Comparando os resultados obtidos nessa dissertação com os dados operacionais das experiências mundiais de dessalinização da água salobra utilizando unidades OR-FV (Tabela 2.1), pode-se notar que a unidade proposta apresentou um baixo consumo específico. Os principais fatores que influenciam diretamente esses resultados é a salinidade da água de alimentação e a pressão de operação. A presente unidade se assemelha muito com a unidade implantada em Lisboa, Portugal, no entanto, os resultados da presente unidade foram significativamente superiores. Os principais fatores que influenciaram nesses resultados foram: a diferença da salinidade da água de alimentação, o algoritmo seguidor do ponto de máxima potência, desenvolvido na presente dissertação, e as condições locais de radiação solar.

Os resultados mostraram, ainda, que as bombas volumétricas, no caso de diafragma, possuem a relação pressão-vazão indicada para aplicações em unidades de osmose reversa. No entanto, para virem a ser alimentadas via arranjos FV, torna-se necessária a adoção de seguidores de máxima potência. Salienta-se, ainda, que um acréscimo na capacidade de geração FV pode melhorar muito a performance do sistema. Com esses cuidados, as unidades OR-FV sem baterias tornam-se viáveis tecnicamente em comunidades com ausência da rede elétrica convencional.

Analisando os resultados que a eliminação do banco de baterias proporcionou à unidade, pode-se facilmente citar o acréscimo na robustez, conseqüentemente na confiabilidade, e a redução de custos de investimento e da necessidade de manutenção. Esses pontos são considerados, muitas vezes, decisivos na sustentabilidade de um projeto deste porte. Ressalta-se que as análises e resultados obtidos neste trabalho podem servir de base para outras aplicações semelhantes.

5.2. ESPECIFICIDADES LOCAIS

Algumas considerações podem ser feitas a respeito da inserção dessas tecnologias no Nordeste, visto que essa região apresenta condições ambientais favoráveis. Entretanto, o custo desses equipamentos ainda representa um gasto muito acima da capacidade financeira dos municípios, particularmente dos mais pobres. Assim, na maioria dos casos a inserção depende de um suporte financeiro das outras esferas de governo, seja estadual ou federal, para viabilizar a instalação dessa infra-estrutura de dessalinização da água (MONTEIRO, 2002).

Sabe-se, contudo, que o êxito de projetos que utilizam tecnologias “novas” está intimamente ligado a sua correta inserção na realidade da comunidade. A população precisa sentir confiança para, assim, colaborar com o sucesso do projeto. O fracasso de diversas tecnologias, muitas vezes, não está ligado diretamente com suas características técnicas, mas sim, com o modo como essa tecnologia foi vista pela sociedade. Fedrizzi (1997) acrescenta ainda, como possíveis causas de insucesso, a falta de informação sobre a realidade econômica e sócio-cultural dos usuários, a dificuldade em avaliar a real necessidade e a própria viabilidade do projeto no contexto em que se encontra. Com isso, aconselha-se que, em trabalhos de campo ou possíveis instalações de unidades OR-FV sem baterias, os conhecimentos básicos sejam repassados aos usuários do projeto, proporcionando assim a sua sustentabilidade e a conseqüente redução das chances de fracasso.

5.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação não teve a pretensão de esgotar as análises sobre unidades OR-FV sem baterias, ao contrário, iniciarem aqui diversos pontos que merecem ser desenvolvidos. Fica como sugestão para trabalhos futuros:

- a) validar experimentalmente o modelo da membrana de OR;
- b) comparar unidades OR-FV sem e com baterias;
- c) propor meios de utilização do concentrado da dessalinização;
- d) implementar uma unidade que utilize a energia excedente, em momentos de intensa radiação solar, para o bombeamento de água do poço ou mesmo para outro fim;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, G. L.; 1982. **Electricidad Solar Fotovoltaica: Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. Universidad Politecnica de Madrid. ETSI Telecomunicación. Parte I: Fundamentos de la electricidad solar fotovoltaica, 3 "La célula solar", Madrid, p. 118-176.
- BARBI, I.; 2001. **Projetos de Fontes Chaveadas**. Edição do Autor, Florianópolis, SC.
- BARBI, I.; MARTINS, D.C.; 2000. **Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. Edição dos Autores.
- BOEDEKER, K.W.; 1984. Membranverfahren in der Wasserentsalzung. **Vom Wasser**, 62. Band, Alemanha.
- CALLADO, S.M.G.; 2003. **Identificação e Análise dos Fatores Condicionantes do Desempenho dos Dessalinizadores no Estado do Ceará**. Fortaleza. Dissertação (Mestrado em Economia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará.
- CAMPBELL SCIENTIFIC; 2004a. **CR10X Measurement and Control Module Operator's Manual**. Disponível em: <<ftp://ftp.campbellsci.com/pub/outgoing/manuals/cr10x-ov.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2004.
- CAMPBELL SCIENTIFIC; 2004b. **CM3 Pyranometer instruction manual**. Disponível em: <<ftp://ftp.campbellsci.com/pub/outgoing/manuals/cm3.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2004.
- CARVALHO, P.C.M.; 1997. **Photovoltaik- und Windkraftbetriebene Umkehrosmoseanlagen im Inselbetrieb**. Paderborn, Alemanha. Tese (Doutor em Fachbereich Elektrotechnik), Universität-Gesamthochschule-Paderborn.

- CARVALHO, P.C.M.; FREIRE, C.A.S.; LIMA, S.E.U.; 2003. A Static Linear Simulation for the Thermal Behavior of Photovoltaic Modules. In: PROCEEDINGS OF RIO 3 - WORLD CLIMATE & ENERGY EVENT, 2003, Rio de Janeiro, RJ. **Proceedings**. Rio de Janeiro. p. 81-84.
- CAVALCANTE, F.P.; 2003. **Técnicas de Diagnóstico de Falhas para Dessalinizadores de Pequeno Porte Instalados no Interior do Ceará e Propostas de Melhorias**. Fortaleza. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará.
- COELCE – Companhia Energética do Ceará; 1995. **Suprimento de Água para Pequenas Comunidades via Energia Solar Fotovoltaica – Relatório Final**, DFACE, Fortaleza-CE.
- COLANGELO, A. ; MARANO, D.; SPAGNA, G.; SHARMA, V. K.; 1999. Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Sea-water Desalination Systems. **Applied Energy**, Elsevier Science B.V., v. 64, p. 289-305.
- CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito; 1999. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ.
- CRUTCHER, J.L.; WOOD, J.R.; NORBEDO, A.J. *et al.*; 1981. A Stand-alone Seawater Desalting System Powered by an 8 kW Ribbon Photovoltaic Array. In: 19TH INTERNATIONAL ENERGY SOCIETY CONGRESS, 1981, Brighton. **Proceedings**. Brighton. p. 1110-1119.
- DOW Liquid Separations; 2004. **FILMTEC Reverse Osmosis Membranes Technical Manual**. Disponível em: <http://www.dow.com/liquidseps/lit/down_lit.htm>. Acesso em: 14 out. 2004.
- FEDRIZZI, M.C.; 1997. **Fornecimento de Água com Sistemas de Bombeamento Fotovoltaicos: Dimensionamento Simplificado e Análise de Competitividade para Sistemas de Pequeno Porte**. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo.

- FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F.; 1995. **Energia Solar: Fundamentos e Tecnologia de Conversão Heliotérmica e Fotovoltaica**. 1. ed. Recife, PE: Ed. Universitária da UFPE.
- FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos; 2002. **Dados Pluviométricos do Ceará**.
- GEORGE FISCHER; 2004a. **Datasheet - SIGNET 515/2536 Rotor-X Flow Sensors**. Disponível em: <<http://www.gfsignet.com/products/pdf/515-2536spec.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2004.
- GEORGE FISCHER; 2004b. **Datasheet - SIGNET 8512 Flow Transmitter Instructions**. Disponível em: <<http://www.gfsignet.com/products/pdf/8512spec.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2004.
- GOETZBERGER, A.; KNOBLOCH, J.; VOSS, B.; 1998. **Crystalline Silicon Solar Cells**. 1. ed. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.
- HENNE, K.; 1980. **Trinkwassergewinnung aus Brackwasser im Binnenland unter Berücksichtigung von Umweltschutzgesichtspunkten mittels eines Hybridverfahrens**; Aquisgrana, Alemanha: Institut für Verfahrenstechnik der RWTH Aachen.
- HEROLD, D.; NESKAKIS, A.; 2001. A Small PV-driven Reverse Osmosis Desalination Plant on the Island of Gran Canaria. **Desalination**, Elsevier Science B.V., v. 137, p. 285-292.
- HOHM, D.P.; ROPP, M.E.; 2003. Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, John Wiley & Sons Ltd, v. 11, n. 1, p. 47-62, Jan.
- JUCÁ, S.C.S.; 2004. **Comparação de Métodos de Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos: Aplicação a uma Unidade de Eletrodialise**. Fortaleza. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará.
- KEEFER, B.G.; HEMBREE, R.D.; SCHRACK, F.C.; 1985. Optimized matching of solar photovoltaic power with reverse osmosis desalination. **Desalination**, Elsevier Science B.V., v. 54, p. 89-103.

- KEHAL, S.; 1991. Reverse osmosis unit of 0,85 m³/h capacity driven by photovoltaic generator in south Algeria. In: NEW TECHNOLOGIES FOR THE USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN WATER DESALINATION, 1991, Athens. **Proceedings**. Athens. p. 8-16.
- KLEEMANN, M.; MELISS, M.; 1988. **Regenerative Energiequellen**. Alemanha: Springer Verlag.
- LOUREIRO, D.; JOYCE, A.; RODRIGUES, C. *et al.*; 2001. Small reverse osmosis units PV system for water purification in rural places. **Desalination**, Elsevier Science B.V., v. 137, p. 39-44.
- MAHAN, L.K.; ESCOTT-STUMP, S.; 2002. **Krause Alimentos, Nutrição & Dietoterapia**. 10. ed. São Paulo: Roca.
- MATTOS, E.E.; FALCO, R.; 1998. **Bombas Industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Interciência.
- MAUREL, A.; 1991. Desalination by reverse osmosis using renewable energies (solar - wind) - Cadarache Centre Experiment. In: NEW TECHNOLOGIES FOR THE USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN WATER DESALINATION, 1991, Athens. **Proceedings**. Athens. p. 17-26.
- MAYCOCK, P.; 2004. PV market update. **Renewable ENERGY World**, James & James Ltd, v. 7, n. 4., p.
- MAYER, O.; BECHTELER, W.; BUCHER, W.; 1994. Progress in the Adaptation of Displacement Pumps for PV Applications. In: 12TH EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE, 1994, Amsterdam. **Proceedings**. Amsterdam. p. 249-251.
- MEISSNER, D.; 1993. **Solarzellen**. Alemanha: Vieweg.
- MELLO, L.F.P.; 1996. **Analise e Projeto de Fontes Chaveadas**. São Paulo, SP: Erica.
- MME – Ministério de Minas e Energia; 2003. **Projeto Cadastro da Infra-estrutura Hídrica do Nordeste – Relatório Preliminar**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/rehi/projeto.pdf>>. Acesso em: 11 mai. 2004.

- MONTEIRO, V.P.; 2002. **Critérios para Implantação de Tecnologias de Abastecimento de Água Potável em Regiões Afetadas pelo Alto Teor de Sal**. Fortaleza. Dissertação (Mestrado em Economia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará.
- MONTENEGRO, F.F.D.; 2001. **Projeto e Avaliação Econômica de Instalação Pioneira no Brasil de Planta de Osmose Reversa acionada por Painéis Fotovoltaicos**. Fortaleza. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL; 2004. **Review of the Desalination and Water Purification Technology Roadmap**. Washington, D.C.: The National Academies Press. Disponível em: <<http://www.nap.edu/books/0309091578/html/>>
- PALMA, F.; 1991. Photovoltaic powered sea water desalination unit. In: NEW TECHNOLOGIES FOR THE USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN WATER DESALINATION, 1991, Athens. **Proceedings**. Athens. p. 1-7.
- PERAL, J.M.A.; GÓMEZ, A.C.; TRUJILLO, J.M.; 1991. IDM - Project: Results of one year of operation. In: NEW TECHNOLOGIES FOR THE USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN WATER DESALINATION, 1991, Athens. **Proceedings**. Athens. p. 56-80.
- PEREIRA, J.A.B.; 2001. **Desenvolvimento de Dessalinizadores Móveis de Águas Salobras e Avaliação de Modelos Gestores, como Alternativa ao Sistema de Distribuição por Carros-pipa em Pequenas Comunidades do Estado do Ceará**. Fortaleza. Dissertação (Mestrado em Gestão e Modernização Pública) – Universidade Internacional (UI)/ Universidade Estadual do Vale do Acaraú - UVA.
- PESSOA, L.C.C.; 2000. **Análise do Desempenho e do Impacto Ambiental de Dessalinizadores por Osmose Reversa instalados no Interior do Ceará**. Fortaleza. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do

- Ceará.
- POMILIO, J.A.; 2004. **Fontes Chaveadas**. Campinas. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/fonte.zip>>. Acesso em: 19 ago. 2004.
- RAUTENBACH, R.; ALBRECHT, R.; 1981. **Membrantrennverfahren**. Alemanha: Otto Salle Verlag.
- REIS, L.B.; 2003. **Geração de Energia Elétrica: Tecnologia, Inserção Ambiental, Planejamento, Operação e Análise de Viabilidade**. 3. ed. Barueri, SP: Manole.
- SCHNEIDER, R.P.; TSUTIYA, M.T.; 2001. **Membranas Filtrantes para o Tratamento de Água, Esgoto e Água de Reuso**. 1 ed. São Paulo: ABES.
- THOMSON, M.; MIRANDA, M.; GWILLIM, J.; ROWBOTTOM, A.; DRAISEY, I.; 2001. **Batteryless Photovoltaic Reverse-Osmosis Desalination System**. Crown. Disponível em: <<http://www.dti.gov.uk/energy/renewables/publications/pdfs/SP200305.pdf>>
- UNESCO; 2003. **Water for people - water for life - the United Nations world water development report**, UNESCO Publishing / Berghahn Books.
- WALKER, G.R.; 2001. Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model, **Journal of Electrical & Electronics Engineering**, v. 21, no. 1, p. 49-56.
- WALKER, J.; 2005. **Earth and Moon Viewer**. Disponível em: <<http://www.fourmilab.ch/earthview/vplanet.html>>. Acesso em: 22 mar. 2005.

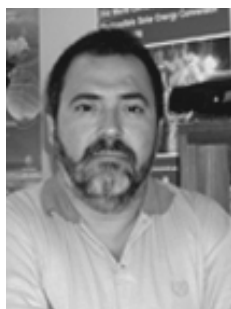
APÊNDICE A
Biografias e as
Publicações Geradas dessa Pesquisa

Biografias



Douglas Bressan Riffel nasceu em Curitiba - PR, Brasil, onde recebeu o grau de Engenheiro Eletricista em 2002 do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná (CEFET-PR). Essa dissertação é parte integrante dos requisitos à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Suas linhas de pesquisa envolvem o suprimento de energia e água para comunidades rurais, tais como: geração fotovoltaica e eólica, piscinas solares e a dessalinização.



Paulo Cesar Marques de Carvalho recebeu o grau de Engenheiro Eletricista da Universidade Federal do Ceará (UFC) em 1989, o grau de Mestre da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em 1992 e o de Doutor da Universidade de Paderborn, Alemanha, em 1997.

Suas pesquisas envolvem: sistemas fotovoltaicos, energia eólica e a dessalinização.

Paulo foi o orientador dessa dissertação.



Ricardo Silva Thé Pontes nasceu em Fortaleza, Brasil, onde recebeu o grau de Engenheiro Eletricista da Universidade Federal do Ceará (UFC) em 1979. O grau de Mestre e Doutor foi obtido na Universidade Federal de Viçosa (UFV) em 1983 e 2002, respectivamente.

Suas pesquisas envolvem máquinas elétricas alimentadas por energia solar fotovoltaica.

Ricardo foi coorientador dessa dissertação.

Publicações Geradas dessa Pesquisa

Revista Internacional:

- CARVALHO, P.C.M.; FREIRE, C.; MONTENEGRO, F.F.D.; RIFFEL, D.B. **The Brazilian Experience with a Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant**, Progress in Photovoltaics: Research and Applications; vol. 12, nº 5, agosto de 2004.

Revista Nacional em revisão:

- CARVALHO, P.C.M.; PAIVA, M.A.X.; RIFFEL, D.B.; SABINO, F.R. **Consumo de Energia Elétrica do Município de Fortaleza: Desenvolvimento e Perspectivas**, Revista Econômica do Nordeste, em revisão.

Artigos em congressos:

RIO 3 - World Climate & Energy Event

- CARVALHO, P.C.M.; RIFFEL, D.B. **Analysis of the use of Wind Powered Reverse Osmosis Sea Water Desalination Plants in the Northeast Region, Brazil**. Rio de Janeiro - RJ, dezembro de 2003.

Agrener GD 2004

- CARVALHO, P.C.M.; OLIVEIRA JR., D.S.; RIFFEL, D.B.; OLIVEIRA, R.G.V.; MESQUITA, S.B. **Estudo Estatístico de Radiação Solar visando o Projeto de Unidades de Dessalinização acionadas por Painéis Fotovoltaicos sem Baterias**, Campinas – SP, outubro de 2004.

IEEE Latin America T-D 2004

- CARVALHO, P.C.M.; PONTES, R.S.T.; OLIVEIRA JR, D.S.; RIFFEL, D.B.; OLIVEIRA, R.G.V.; MESQUITA, S.B. **Control Method of a Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant without Batteries based on Maximum Power Point Tracking**, São Paulo – SP, novembro de 2004.

RIO 5 - World Climate & Energy Event

- CARVALHO, P.C.M.; PONTES, R.S.T.; OLIVEIRA JR, D.S.; RIFFEL, D.B.; OLIVEIRA, R.G.V. **Mathematical Model of a Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant without Batteries**. Rio de Janeiro - RJ, fevereiro de 2005.

XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

- RIFFEL, D.B.; CARVALHO, P.C.M.; PONTES, R.S.T.; OLIVEIRA JR, D.S.; OLIVEIRA, R.G.V. **Operação de uma Unidade de Osmose Reversa acionada por Painéis Fotovoltaicos sem Baterias**, (artigo aceito e enviado).

20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition

- CARVALHO, P.C.M.; PONTES, R.S.T.; OLIVEIRA JR., D.S.; RIFFEL, D.B.; OLIVEIRA, R.G.V.; **A small-scale Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant without Batteries in Stand-Alone Operation for Equatorial Áreas**. (resumo aceito).