



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Ciências e Tecnologia  
Unidade Acadêmica de Engenharia Química  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO  
DE ÁGUA VIA MEMBRANA DE MICROFILTRAÇÃO**

**ROBSON ROGACIANO FERNANDES DA SILVA**

CAMPINA GRANDE, PB  
MARÇO, 2015

**ROBSON ROGACIANO FERNANDES DA SILVA**

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO  
DE ÁGUA VIA MEMBRANA DE MICROFILTRAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada  
ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Química da Universidade  
Federal de Campina Grande.

**Orientador:** Prof. Kepler Borges França (Ph.D)

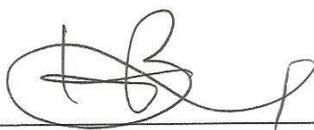
CAMPINA GRANDE, PB  
MARÇO, 2015

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO  
DE ÁGUA VIA MEMBRANA DE MICROFILTRAÇÃO**

Robson Rogaciano Fernandes da Silva

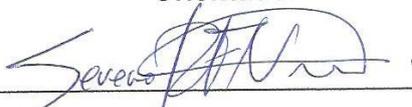
Dissertação de Mestrado em Engenharia Química

**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Kepler Borges França (Ph.D)  
**Orientador**



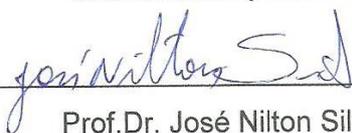
---

Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto  
**Examinador (Interno)**



---

Prof. Dr. Vímário Simões Silva  
**Examinador (Externo)**



---

Prof. Dr. José Nilton Silva  
**Examinador (Externo)**

## FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- S546p Silva, Robson Rogaciano Fernandes da.  
Potencial Energético de um sistema de bombeamento de água via membrana de microfiltração / Robson Rogaciano Fernandes da Silva. – Campina Grande, 2015.  
91 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2015.
- "Orientação: Prof. Dr. Kepler Borges França".  
Referências.
1. Energia Solar Fotovoltaica – Engenharia Química. 2. Microfiltração. 3. Cisternas do LABDES. I. França, Kepler Borges. II. Título.
- CDU 66.0:551.521.37(043)

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Marival, Izaura e minha esposa Ailanti pela dedicação e amor a mim conferido e pelo incondicional apoio na realização dos meus projetos.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus que me concedeu o dom da vida, saúde e me permitiu chegar ao final de mais uma etapa acadêmica.

A minha mãe e ao meu pai (In memorian), maiores incentivadores da minha busca pelo conhecimento, a quem devo tudo que sou e conquistei.

A minha Esposa Ailanti de Melo Costa Lima pela sua dedicação, carinho e amor nas horas mais difíceis na conclusão deste trabalho.

Aos meus irmãos que contribuíram, para a conclusão desta etapa tão importante da minha vida.

Ao meu Orientador, Prof Kepler Borges França, pela paciência e dedicação durante a elaboração deste trabalho.

As minhas amigas Carolina Pereira Dantas e Maria Aparecida, pela ajuda sem interesse na produção deste trabalho.

Aos professores João Onofre, Ruben Godoy e ao aluno Flávio Palmiro da Universidade federal do Mato Grosso do Sul.

Aos professores Severino Rodrigues, Vimário Simões, José Nilton da Universidade Federal de Campina Grande

À coordenação do programa de Pós Graduação em Engenharia Química pela atenção.

À CAPES pela ajuda financeira.

# POTÊNCIAL ENERGÉTICO DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA VIA MEMBRANA DE MICROFILTRAÇÃO

## RESUMO

Este trabalho trata do estudo da potencialidade energética de geradores fotovoltaicos em acionar um sistema de bombeamento de água via processo de microfiltração. A avaliação do sistema permitiu caracterizar o efeito da disponibilidade de potencia elétrica e da pressão de operação do sistema, para determinação da quantidade de água produzida. Na avaliação do sistema, foi utilizada uma alimentação de água da Cisterna do LABDES (água da chuva captada pelas telhas), fazendo uso de um Motor Bomba Centrífuga de potência de 0,5 Hp, e atuando com variações de pressões entre 0 a 2 kgf/cm<sup>2</sup>. Inicialmente, foi realizada a caracterização do sistema, através de sua operação com disponibilidade de potência elétrica variável (Energia convencional), sendo verificado seu perfil de funcionamento a partir da avaliação dos seguintes parâmetros: vazão do permeado, Pressão, Potência e remoção de cor e turbidez. A avaliação do sistema, permitiu caracterizar o efeito da disponibilidade de potência elétrica e da pressão de operação do sistema na quantificação e qualidade da água produzida. Utilizando os dados do potencial solarimétrico (LEIAM-UFCG) da cidade de Campina Grande – PB, para o período de Outubro/2013 à Setembro/2014, realizou-se um estudo da oferta de energia solar disponibilizada para o período especificado, onde verificou-se que 70,5% da irradiação média mensal encontra-se na faixa entre 200 e 1400 W/m<sup>2</sup>. Posteriormente, avaliou-se o funcionamento do sistema operando efetivamente com energia solar fotovoltaica, o qual atingiu uma produção média de 0,36 L/min ou 174,4 L/dia (média dos Dias 1, Dias 2 e Dias 3), durante 8 horas de funcionamento do sistema por dia. Com uma pressão média de operação de 0,99 kgf/cm<sup>2</sup> durante os 3 dias.

**Palavras-chave:** Energia Solar Fotovoltaica; Microfiltração; Água.

# POTENTIAL ENERGY OF A WATER PUMPING SYSTEM VIA MEMBRANE MICROFILTRATION

## ABSTRACT

This work deals with the study of the effectiveness of photovoltaic generators drive a via microfiltration water pumping system. The rating system allows to characterize the effect of the availability of electric power and operation of the system pressure to determine the amount of water produced. In the evaluation system used was a cistern of the water supply LABDES (rainwater captured by tile), using a 0.5 hp motor pump power centrifuged, and the variations in operating pressures from 0 to 2 kgf / cm<sup>2</sup>. Initially the system characterization was performed by means of operation with variable availability of electrical power (conventional Energy), confirmed its working profile from the evaluation parameters: permeate flow, pressure, power and removing color and turbidity. The rating system allowed us to characterize the effect of the availability and the electrical power system operating pressure in the quantity and quality of water produced. Using potential data solarimetric (read-UFCG) of Campina Grande - PB for the period October / 2013 to September / 2014, there was a study of solar energy supply available for the specified period, where it was found that 70.5% of the monthly average irradiation is between 200 and 1400 W / m<sup>2</sup>. Subsequently, we evaluated the system works effectively operating with photovoltaic solar energy, which reached an average production of 0.36 L / min or 174.4 L / day (mean of Days 1, 2 Days and Days 3) for 8 hours of operation of the system per day, with an average operating pressure of 0.99 kgf / cm<sup>2</sup> for 3 days.

**Keywords:** Solar Photovoltaic Energy; microfiltration; Water

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Área da Membrana
$J$	Fluxo Permeado
$\nabla P$	Gradiente de Pressão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
$I_{cc}$	Corrente de curto-circuito
$V_{oc}$ ,	Tensão de circuito aberto
$V_{MP}$	Tensão de máxima potência
$I_{MP}$	Corrente de máxima potência
FF	Fator de forma
$\eta$	Eficiência
$E_p$	Consumo de energia prático
$P_{ot}$	Potência ativa consumida pelo sistema
$Q_p$	Vazão do permeado
$C_i^m$	Concentração média do soluto
$D_i$	Coefficiente de difusão do soluto na fase líquida
$C_i$	Varição de soluto ao longo da espessura da membrana.
d	Dia
$\varepsilon$	Porosidade superficial da membrana;
$r$	Raio médio dos poros da membrana;
$\eta$	Viscosidade do solvente
$\tau$	Tortuosidade dos poros;
$\nabla z$	Espessura da membrana;
$L_p$	Permeabilidade da membrana
FV	otovoltaico
h	Hora
I	Corrente Elétrica
$J_i$	Fluxo Mássico do Solute
$J_p$	Fluxo do Permeado

$J_w$  Fluxo de Solvente

$K_i$  Coeficiente de Transferência de Massa do Solute

$K_w$  Coeficiente de Transferência de Massa do Solvente

L Litro

LEIAM Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas

LABDES Laboratório de Referência em Dessalinização

mg Miligrama

min Minuto

$P_a$  Pressão de Alimentação

$P_c$  Pressão do Concentrado

$P_p$  Pressão do Permeado

$Q_a$  Vazão de Alimentação

$Q_p$  Vazão do Permeado

$Q_c$  Vazão do Concentrado Total

UFMG Universidade Federal de Campina Grande

UFMS Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

V Tensão

$P_{ot}$  Potência

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Representação Esquemática da Separação com Membranas.....	07
<b>Figura 2:</b> Representação Esquemática da Seção Transversal dos Diferentes Tipos de Morfologia de Membranas.....	08
<b>Figura 3:</b> Principais Características dos Processos que Utilizam Diferença de Pressão como Força Motriz.....	13
<b>Figura 4:</b> Tipos de Radiação.....	21
<b>Figura 5:</b> Configuração Básica de Sistemas Fotovoltaicos.....	24
<b>Figura 6:</b> Diagrama de Sistemas Fotovoltaicos em Função da Carga Utilizada.....	25
<b>Figura 7:</b> Modelos de Módulos Fotovoltaicos.....	27
<b>Figura 8:</b> Circuito Equivalente da Célula Solar (Modelo Ideal).....	28
<b>Figura 9:</b> Circuito Equivalente da Célula Solar (Modelo Real).....	28
<b>Figura 10:</b> Fatores que Influenciam a Curva Característica dos Módulos Fotovoltaicos.....	29
<b>Figura 11:</b> Curva Característica $I \times V$ , com Definição do FF, e a Curva de Potência do Módulo.....	30
<b>Figura 12:</b> Arranjo Série dos Módulos.....	30
<b>Figura 13:</b> Arranjo Paralelo dos Módulos.....	31
<b>Figura 14:</b> Fluxograma de Execução de Atividades.....	42
<b>Figura 15:</b> Sistema de Geração de Energia para Etapa I.....	43
<b>Figura 16:</b> Sistema de Geração de Energia para Etapa III.....	44
<b>Figura 17:</b> Sistema Experimental de bombeamento de Água.....	45
<b>Figura 18:</b> Sistema Experimental de bombeamento de Água.....	46
<b>Figura 19:</b> Conversor CC-CA.....	48
<b>Figura 20:</b> Motor de Indução.....	49
<b>Figura 21:</b> Esquema do Módulo de Microfiltração.....	51
<b>Figura 22:</b> Sistema de Aquisição de Dados (FieldLogger).....	51
<b>Figura 23:</b> Variação da vazão do permeado e de potência em função das pressões.....	57
<b>Figura 24:</b> Perfil de Irradiância Diária (01 de Maio de 2014).....	59
<b>Figura 25:</b> Perfil de Irradiância Diária (30 de Janeiro de 2014).....	59
<b>Figura 26:</b> Perfil de Irradiância Diária (14 de Março de 2014).....	60

<b>Figura 27:</b> Perfil de Irradiância Diária (26 de Julho de 2014).....	60
<b>Figura 28.a:</b> Perfil de Irradiância Solar Média (Outubro de 2013).....	61
<b>Figura 28.b:</b> Perfil de Irradiância Solar Média (Novembro de 2013).....	61
<b>Figura 28.c:</b> Perfil de Irradiância Solar Média (Dezembro de 2013).....	61
<b>Figura 28.d:</b> Perfil de Irradiância Solar Média (Janeiro de 2013).....	61
<b>Figura 28.e:</b> Perfil de Irradiância Solar Média (Fevereiro de 2014).....	62
<b>Figura 28.f:</b> Perfil de Irradiância Solar Média (Março de 2014).....	62
<b>Figura 28.g:</b> Perfil de Irradiância Solar Média (Abril de 2014).....	62
<b>Figura 28.h:</b> Perfil de Irradiância Solar Média (Maio de 2014).....	62
<b>Figura 28.i:</b> Perfil de Irradiância Solar Média (Junho de 2014).....	62
<b>Figura 28.j:</b> Perfil de Irradiância Solar Média (Julho de 2014).....	62
<b>Figura 28.k:</b> Perfil de Irradiância Solar Média (Agosto de 2014).....	63
<b>Figura 28.l:</b> Perfil de Irradiância Solar Média (Setembro de 2014).....	63
<b>Figura 29:</b> Percentual de Irradiância Solar Média.....	63
<b>Figura 30:</b> Perfil de Irradiação Solar (Dia 01).....	66
<b>Figura 31:</b> Variação da potência elétrica disponibilizada pelo painel solar fotovoltaico (Dia 01).....	66
<b>Figura 32:</b> Variação da pressão de operação do sistema (Dia 01).....	67
<b>Figura 33:</b> Variação da vazão do permeado do sistema (Dia 01).....	67
<b>Figura 34:</b> Perfil de Irradiação Solar (Dia 02).....	69
<b>Figura 35:</b> Variação da potência elétrica disponibilizada pelo painel solar fotovoltaico (02).....	69
<b>Figura 36:</b> Variação da pressão de operação do sistema em uma função de tempo (Dia 02).....	70
<b>Figura 37:</b> Variação da vazão do permeado do sistema em uma função de tempo (Dia 02).....	70
<b>Figura 38:</b> Perfil de Irradiação Solar em uma função de tempo (Dia 03).....	72
<b>Figura 39:</b> Variação da potência elétrica disponibilizada pelo painel solar fotovoltaico em uma função de tempo (Dia 03).....	72
<b>Figura 40:</b> Variação da pressão de operação do sistema (Dia 03).....	73
<b>Figura 41:</b> Variação da vazão do permeado do sistema (Dia 03).....	73
<b>Figura 42:</b> Vazão do permeado em função da energia consumida (Dia 4).....	74
<b>Figura 43:</b> Energia consumida e Energia disponível em função do tempo (Dia 4)...	75

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Processos de Separação por Membranas.....	10
<b>Tabela 2:</b> Especificações do Painel Solar.....	47
<b>Tabela 3:</b> Especificações do Motor CA <i>Dancor</i> .....	49
<b>Tabela 4:</b> Especificações da Membrana de Microfiltração (PAM).....	50
<b>Tabela 5:</b> Características da Água de Alimentação.....	55
<b>Tabela 6:</b> Remoção de turbidez do sistema de bombeamento de água.....	56
<b>Tabela 7:</b> Remoção de cor do sistema de bombeamento de água.....	56
<b>Tabela 8:</b> Horas de irradiação solar média mensal.....	65

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>03</b>
2.1 Objetivo Geral.....	03
2.2 Objetivos Específicos.....	03
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>04</b>
3.1 A Água.....	04
3.2 Processos de Separação por Membranas.....	06
3.3 Parâmetros que Caracterizam as Membranas Poliméricas.....	11
3.4 Processos que Utilizam o Gradiente de Pressão como Força Motriz.....	12
3.4.1 O Processo de Microfiltração.....	13
3.5 Parâmetros de Desempenho de um Processo de Microfiltração.....	14
3.5.1 Fluxo Permeado.....	14
3.5.2 Fluxo do Concentrado.....	17
3.5.3 Consumo de Energia.....	17
3.6 A Microfiltração Aplicada ao Bombeamento de Água.....	17
<b>4. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....</b>	<b>20</b>
4.1 Radiação Solar.....	20
4.2 Disponibilidade Solar.....	22
4.3 Energia Solar.....	23
4.4 Configurações Básicas de Sistemas Fotovoltaicos.....	24
4.5 Componentes Básicos de Sistemas Fotovoltaicos.....	26
4.5.1 Módulo Fotovoltaico.....	26
4.5.2 Baterias.....	31
4.5.3 Controladores de Carga.....	32
4.5.4 Inversores.....	33
4.6 Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos.....	34
4.6.1 Avaliação do Recurso Solar.....	34
4.6.2 Estimativa da Curva de Carga.....	35
4.6.3 Escolha da Configuração.....	36

4.6.4 Dimensionamento do Sistema de Armazenamento.....	36
4.6.5 Dimensionamento da Geração Fotovoltaica.....	36
4.6.6 Especificação dos Demais Componentes Básicos.....	37
4.6.7 Projeto Elétrico.....	37
4.7 Energia Solar e recursos humanos.....	38
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
5.1 Metodologia Proposta.....	42
5.1.1 Etapa I.....	43
5.1.2 Etapa II.....	44
5.1.3 Etapa III.....	44
5.2 Sistema Experimental.....	45
5.2.1. Elementos do Sistema de bombeamento de Água.....	46
5.2.1.1 Painel Solar Fotovoltaico.....	46
5.2.1.2 Sistema de Conversão de Energia.....	47
5.2.1.3 Motor Bomba Dancor.....	48
5.2.1.4 Membranas de Microfiltração.....	49
5.2.2 Sistema de Aquisição de Dados.....	51
5.3 Procedimento Experimental.....	52
5.3.1 Parâmetros Calculados.....	53
5.3.2 Potência.....	53
5.3.3 Vazão.....	53
5.3.4 Energia disponível e Energia consumida.....	54
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>55</b>
6.1 Caracterização do Sistema de bombeamento de Água.....	55
6.2 Estudo da Oferta de Energia Solar da Região de Campina Grande.....	58
6.3 Desempenho do Sistema de bombeamento de Água Acionado por Energia Solar Fotovoltaica.....	65
6.4 Vazão do permeado em função da energia consumida.....	74
6.4.1 Energia Disponível e Energia consumida em função do tempo.....	74

<b>7 CONCLUSÕES.....</b>	<b>76</b>
<b>8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>78</b>
<b>9 REFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>79</b>
<b>10 ANEXOS.....</b>	<b>83</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos mais abundantes da Terra, essencial para o desenvolvimento econômico, social e ambiental (ARAUJO, 2013). Cerca de 97% de toda a água presente na Terra se encontra nos oceanos, e o restante, cerca de 3% é água doce que está contida nos pólos, água subterrânea, lagos e rios. Desta 70% encontra-se no estado sólido, sob a forma de glaciares, icebergues, entre outros. Os restantes 30% dizem respeito à água subterrânea, aquíferos de difícil acesso (EL-GHONEMY, et al, 2012).

A disponibilidade dos recursos de água doce tem diminuindo ao longo do tempo, devido não só ao aumento da população e do crescimento da indústria, mas também pelo uso irracional, desperdício e poluição deste recurso. (MATHIOULAKIS, 2007).

O consumo de água duplicou em relação à taxa de crescimento da população, neste último século (ARAUJO, 2013). Estima-se que cerca de 25% da população mundial, não tem água doce disponível, e como tal não tem de forma a suprir as suas necessidades básicas de sobrevivência. Muitos países já se encontram com graves problemas de escassez de água, prevendo-se que no futuro outros países terão que se deparar com essa realidade, principalmente a nível regional e local onde a disponibilidade deste recurso é menor. (MATHIOULAKIS 2007; LARANJEIRAS, 2010; PENATE, 2012).

Não se imagina o exercício da plena cidadania sem que a água e a energia estejam presentes. Os recursos hídricos sempre foram indispensáveis à vida humana. Atualmente, em razão do modo de vida da civilização humana, os recursos energéticos se tornaram tão importantes quanto os recursos hídricos (LIMA, 2006).

A energia captada do sol é uma das técnicas mais importantes para o desenvolvimento sustentável. As vantagens da captação de energia são: A facilidade e baixo custo da instalação, transmissão, manutenção e longa vida útil, proporcionam grande satisfação e retorno financeiros de todo capital gasto ao usuário. Em resumo, o sistema passa a gerar energia, de forma confiável (OLIVARES et AL., 2012).

Em virtude das vantagens apresentadas, a tecnologia fotovoltaica torna-se viável para a utilização em sistema de microfiltração, especialmente em locais sem

---

acesso a rede elétrica. A incidência de radiação solar influencia diretamente na energia entregue ao sistema, e conseqüentemente, na quantidade de água produzida. A operação de sistema com tais características visa garantir o suprimento de água a comunidade com problemas de escassez hídrica (OLIVEIRA 2007).

O presente trabalho visou estudar o comportamento energético de um sistema de bombeamento de água, fazendo uso de geradores fotovoltaicos sem acumuladores eletroquímicos, com utilização de uma membrana de microfiltração. Neste contexto buscando o desenvolvimento de um sistema de tratamento de água que utiliza o processo de microfiltração (MF), o qual garante a obtenção de água potável, tendo como diferencial o acionamento do subsistema hidráulico através da tecnologia solar fotovoltaica.

---

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo Geral**

Estudar o comportamento energético de um sistema de bombeamento de água, fazendo uso de geradores fotovoltaicos sem acumuladores eletroquímicos (Baterias), com utilização de uma membrana de microfiltração .

### **2.2 Objetivos Específicos**

Para isso, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- (a) Caracterizar o sistema de bombeamento de água;
- (b) Estudar a potencialidade da energia solar da região de Campina Grande;
- (c) Avaliar desempenho do sistema de bombeamento de água acionado por energia solar fotovoltaica sem acumuladores eletrolíticos.

---

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 A Água

A água é um dos constituintes mais abundantes e característicos do nosso planeta, além de tratar-se de um recurso natural essencial para a sobrevivência de todas as espécies que habitam a Terra.

Uma das principais causas da diminuição da disponibilidade de água potável no planeta está no crescente aumento do consumo, no desperdício e na poluição, das águas superficiais e subterrâneas por esgotos domésticos e resíduos tóxicos, provenientes da indústria e da agricultura. O que evidencia a necessidade do uso de tecnologias que visam tratar a água de modo a torná-la apta ao consumo.

Segundo (Furriela, 2001) o grande desafio para a humanidade é a tomada de consciência de que não existe um suprimento inesgotável de água potável no planeta. Nesta perspectiva medidas devem ser tomadas para garantir o suprimento de água em quantidade e padrões aceitáveis. Desta maneira cabe a sociedade o dever de reduzir o nível de degradação da água por meio de medidas como conservação, melhoria do saneamento básico, redução da utilização de pesticidas, produção industrial mais limpa e gerenciamento do consumo.

Na natureza a água nunca é encontrada quimicamente pura, e sim com gases dissolvidos e sais minerais de diversos tipos, em maior ou menor concentração. A composição da água depende naturalmente dos seus constituintes e das características do compartimento onde se encontra (superficial ou subterrânea).

Atualmente, a população em geral tem direcionado sua atenção aos aspectos ambientais, dentre os quais, talvez o mais preocupante, seja os recursos hídricos. Problemas relacionados à falta de água já fazem parte do cotidiano de muitas pessoas. O comprometimento da disponibilidade de água é causado principalmente por usos inadequados, bem como pela deterioração de sua qualidade ocasionada principalmente pelo descarte de efluentes tratados inadequadamente ou simplesmente não-tratados (GIACOBBO *et al.*, 2011).

A ameaça da falta de água, em níveis que podem até mesmo inviabilizar a nossa existência, pode parecer exagero, mas não é. Os efeitos na qualidade e na quantidade da água disponível, relacionados com o rápido crescimento da população mundial e com a concentração dessa população em megalópoles já são evidentes em várias partes do mundo (MME, 2005).

Segundo o Relatório das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos no Mundo, gestões equivocadas, recursos limitados e mudanças climáticas têm trazido sérios problemas com relação à água: um quinto da população do planeta não possui acesso à água potável e 40% não dispõe de condições sanitárias básicas. Até 2025, dois bilhões e setecentos milhões de pessoas vão sofrer severamente com a falta de água. Esse fato tem levado ao desenvolvimento de novas técnicas de utilização, tratamento e recuperação dos recursos hídricos, onde se incluem os PSM (Processo de separação por membranas), que vêm ganhando espaço como técnica de separação viável e segura. Esses processos utilizam uma membrana para promover a separação (OLIVEIRA, 2007).

A tecnologia convencional de tratamento de água geralmente envolve coagulação com sais de ferro ou alumínio, sedimentação, filtração e desinfecção final com cloro, ou seja, o tratamento consiste numa combinação de filtração/desinfecção (Schneider e Tsutiya, 2001). No caso da remoção de material particulado e coloidal por filtros convencionais, seja por retenção física, adsorção, sedimentação ou floculação, não apresentam barreiras absolutas para as partículas. Além disso, sua eficiência é limitada devido ao acúmulo de material no seu interior, necessitando de ciclos de retrolavagem em períodos muito curtos (FRANÇA, 2006).

No início da década de sessenta surge uma nova classe de processos de separação, em escala industrial, que utilizam membranas como barreiras seletivas. As membranas são capazes de restringir total ou parcialmente, o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes na corrente a ser tratada. Inúmeras vantagens fizeram com que os PSM adquirissem “*status*” de processo comercial, tais como economia de energia, alta seletividade, separação de termolábeis e simplicidade operacional.

Dentre os PSM mais utilizados no tratamento de águas estão: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF), osmose reversa (OR) e eletrodialise (ED) (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001). Estas tecnologias vêm sendo utilizadas nos mais diversos setores da atividade industrial, abrangendo desde a indústria química, alimentícia, farmacêutica, médica até a biotecnologia.

Recentemente a Microfiltração (MF) começou a ser utilizada na purificação de águas superficiais visando a produção de água potável, o que poderá ser o grande mercado da MF no futuro (HABERT *et AL.*, 2006).

Dentro deste contexto consideramos os processos de separação com membranas (PSM) uma alternativa bastante eficaz e atrativa no tratamento de água haja vista o seu baixo custo e sua alta eficiência na remoção de impurezas.

### **3.2 Processos de Separação com Membranas**

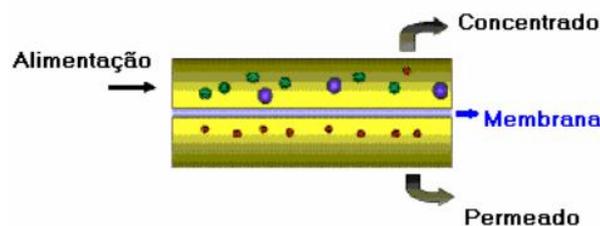
Os processos de separação com membranas, tem conquistado um espaço importante como técnica de separação viável e segura. Sendo utilizada nos mais diversos setores, as quais incluem indústria química, área médica, biotecnologia, indústria alimentícia e farmacêutica e tratamento de águas. As membranas de microfiltração, ocupam um lugar de destaque no mercado de membranas, com aplicações na esterilização de águas, filtração do ar, entre outras (LUCAS, 2009).

Os processos com membranas, tem como principais vantagens a economia de energia, a seletividade, a separação de compostos termolábeis (que se decompõem com o aquecimento) e a simplicidade de operação e escalonamento (LUCAS, 2009).

Dentro do contexto comercial as membranas sintéticas, em sua grande maioria, são provenientes de duas classes distintas de materiais: os materiais orgânicos e os materiais inorgânicos. Em virtude das vantagens pertinentes, as membranas poliméricas, as quais compreendem principalmente baixo custo e maior versatilidade quanto as morfologias possíveis, apresentam um mercado mais amplo e difundido, sendo portanto mais utilizadas.

Membranas poliméricas podem ser consideradas como uma barreira permeável ou semipermeável separando duas fases e restringindo total ou parcialmente o transporte de uma ou várias espécies químicas (solutos) presentes em solução. Após a passagem pela membrana, o líquido é chamado de permeado e o material retido de rejeito (SCHENEIDER e TSUTIYA, 2001). Na Figura 1 está representado o esquema de um processo de separação por membranas.

Figura 1: Representação Esquemática do processo de Separação com Membranas.



Fonte: (FRANÇA NETA, 2005)

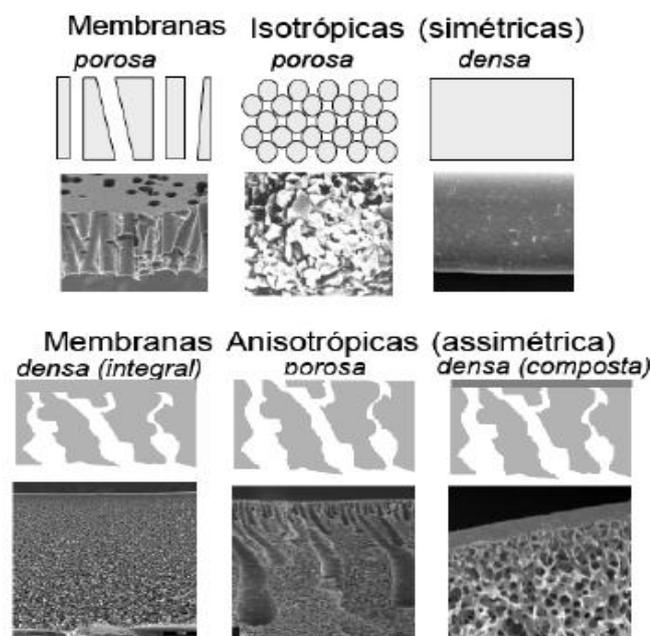
Desde os anos 50, quando foram desenvolvidas membranas de acetato de celulose para a osmose reversa, descobriu-se o potencial das membranas poliméricas no tratamento de águas. Algumas destas aplicações incluem dessalinização, abrandamento, remoção de matéria orgânica natural (MON), remoção de pesticidas, micro poluentes orgânicos metálicos e remoção de nitratos. Desde então, muitos processos têm sido propostos não somente para a dessalinização, mas também nos campos da ultra e microfiltração. Muitas companhias de abastecimento de água da Holanda, Inglaterra, Estados Unidos da América, Austrália, Países das Nações Árabes, Japão, etc., estão construindo várias instalações de filtração por membranas para a produção de água potável (RIBEIRO *et AL.*, 2002).

As membranas poliméricas podem ser classificadas segundo diversos critérios. Em relação a sua morfologia podem ser denominadas isotrópicas (simétricas), quando suas propriedades são constantes ao longo da seção transversal; ou anisotrópicas (assimétricas), quando a morfologia e, portanto, suas propriedades variam ao longo da seção transversal. A morfologia da membrana e a natureza do material que a constitui são algumas das características que vão definir

o tipo de aplicação e a eficiência da separação. Na Figura 2 está ilustrado a representação do esquema de membranas isotrópicas e anisotrópicas (BAKER, 2004).

As membranas simétricas podem ser classificadas em duas classes distintas as membranas densas ou homogêneas e as porosas ou heterogêneas, sendo que as porosas apresentam porosidade uniforme ao longo da sua espessura. Por sua vez, as membranas assimétricas apresentam um gradiente de porosidade ao longo da sua espessura, podendo ser totalmente porosa ou formada por dupla camada constituída de uma parte densa, responsável pela seletividade, e outra porosa que funciona como suporte, as quais são chamadas de assimétricas integrais. Quando a camada superior da membrana e o suporte poroso são feitos por materiais diferentes, a membrana é denominada composta (LUCAS, 2009).

Figura 2: Representação Esquemática da Seção Transversal dos Diferentes Tipos de Morfologia de Membranas.



Fonte: (BAKER, 2004)

Em processos que utilizam membranas porosas, a capacidade seletiva está diretamente associada à relação entre o tamanho das espécies presentes e o

---

tamanho dos poros da membrana. Este é o caso de processos como a microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e diálise (D). Além disso, as espécies presentes devem ser na medida do possível, inertes em relação ao material que constitui a membrana. Para membranas porosas, em função do tipo de força motriz aplicada, o transporte das espécies através da membrana pode ser tanto convectivo como difusivo. No caso da microfiltração, ultrafiltração e nanofiltração, para os quais a força motriz é o gradiente de pressão através da membrana, o fluxo é fundamentalmente convectivo. No caso da diálise, a força motriz é o gradiente de concentração das espécies através da membrana, e o fluxo de permeado é de natureza difusiva. Nesse caso, as espécies se difundem, no meio em que se encontram, através dos poros da membrana (HABERT *et al.*, 2006).

Nos processos que utilizam membranas densas a capacidade seletiva está relacionada com a afinidade das diferentes espécies com o material da membrana (etapa de natureza termodinâmica) e da difusão das espécies através do filme polimérico (etapa de natureza cinética). Os processos que apresentam tais características compreendem a osmose inversa (OI), a pervaporação (PV) e a permeação de gases (PG) (HABERT *et al.*, 2006).

Os processos de separação por membranas envolvem portanto, a separação de componentes de uma suspensão/solução através de membranas semipermeáveis especiais. Estes processos diferem entre si quanto ao tipo de membrana utilizada na separação, as condições de operação e a força motriz promotora do movimento. As forças motrizes podem ser de natureza distinta, tais como diferenças de potencial elétrico, de concentração, de pressão e de pressão de vapor.

Na Tabela 1 estão apresentados os Processos de Separação com Membranas (PSM) comerciais, bem como suas principais características, força motriz e alguns exemplos típicos de aplicação.

Tabela 1: Processos de Separação por Membranas

Processo	Força Motriz	Material Retido	Material Permeado	Aplicações
Microfiltração (MF)	$\Delta P$ (0,5 – 2 atm)	Material em suspensão Bactérias. PM > 500.000 (0,01 $\mu\text{m}$ )	Água e Sólidos Dissolvidos	Esterilização Bacteriana Clarificação de Vinhos e Cerveja Concentração de Células Oxigenação de Sangue
Ultrafiltração (UF)	$\Delta P$ (1 – 7 atm)	Coloides Macromoléculas PM > 5.000 (0,01 $\mu\text{m}$ )	Água (solvente), Sais Solúveis de Baixo PM	Fracionamento/Concentração de Proteínas Recuperação de Pigmentos/ Óleos
Nanofiltração (NF)	$\Delta P$ (5 – 25 atm)	Moléculas de Peso Molecular Médio 500 < PM < 2.000	Água, Sais e Moléculas de Baixo PM	Purificação de Enzimas Bioreatores a Membrana
Osmose Inversa (OI)	$\Delta P$ (15 – 80 atm)	Todo material solúvel em suspensão	Água (solvente)	Dessalinização de Águas Concentração de Sucos Desmineralização de Águas
Diálise (D)	$\Delta C$	Moléculas de PM > 5.000	Íons e orgânicos de Baixo PM	Hemodiálise Rim Artificial Recuperação de NaOH
Eletrodiálise (ED)	$\Delta E$	Macroléculas e Compostos Iônicos	Íons	Concentração de Sol. Salinas Purificação de Águas
Permeação de Gases (PG)	$\Delta P \Rightarrow \Delta C$ (0,5 – 2 atm)	Gás menos permeável	Gás mais permeável	Recuperação de Hidrogênio Separação $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ Fracionamento do Ar
Pervaporação (PV)	Pressão de Vapor	Líquido menos permeável	Líquido mais permeável	Desidratação de Alcoóis Eliminação de VOC da Água

Fonte: (HABERT *et al.*, 2006)

As membranas podem ser fabricadas sob duas formas geométricas: planas ou cilíndricas. Na geometria cilíndrica, são encontradas as membranas dos tipos tubular, capilar e de fibra oca. As membranas planas, são acondicionadas em módulos de permeação do tipo placa/quadro e espiral. As membranas cilíndricas, darão origem aos módulos de fibra oca ou capilares e módulos tubulares (FRANÇA NETA, 2005).

### 3.3 Parâmetros que Caracterizam as Membranas Poliméricas

Alguns parâmetros que caracterizam as membranas são importantes para a determinação da sua aplicabilidade, ou seja, conhecer algumas características das membranas nos permite identificar que uso podemos dar as membranas. Dentro deste contexto podemos ter os seguintes parâmetros:

#### a. Porosidade

A porosidade é uma relação entre o volume dos poros e o volume da membrana. Esta pode ser relativa apenas à parte superficial da membrana (pele filtrante), ou ainda ser relativa a toda a membrana. Quanto maior a porosidade, menor será a resistência ao fluxo de solvente através da membrana. Uma maior porosidade superficial pode estar relacionada com um maior número de poros ou com um aumento em seus diâmetros médios (SCHULZ, 2005).

#### b. Espessura

Tanto as membranas densas como as porosas podem ser isotrópicas ou anisotrópicas. Ou seja, podem ou não apresentar as mesmas características morfológicas ao longo de sua espessura. As membranas anisotrópicas se caracterizam por uma região superior muito fina ( $\approx 1\mu\text{m}$ ) mais fechada (com poros ou não) chamada de “pele”, suportada em uma estrutura porosa que fornece resistência mecânica sem, entretanto, influenciar na separação ou no fluxo do permeado, e representa de 90-99% da espessura da membrana (BHAVE, 1991)

#### c. Diâmetro de Poros

A forma, tamanho e distribuição dos poros são parâmetros fundamentais na avaliação e caracterização das membranas porosas. O mecanismo de separação partículas/água é por exclusão de tamanho das partículas em suspensão na água. Desta forma, a aplicabilidade da membrana é função do diâmetro médio de poros da membrana (LEAL, 2007).

O tamanho de poros varia de tal modo que, a determinação do tamanho médio destes poros é obtida a partir de uma curva de distribuição de tamanho de poros. A inclinação da curva de distribuição do tamanho dos poros está relacionada com a seletividade a membrana, ou seja, quanto mais íngreme a curva mais estreita será a distribuição de tamanho dos poros e, conseqüentemente, mais seletiva será a membrana (LEAL, 2007).

---

#### d. Permeabilidade

A permeabilidade permite quantificar o material que atravessa a membrana e, depende das condições de operação e das características da solução a ser filtrada. Por exemplo, o aumento da temperatura eleva o fluxo de permeado devido à redução da viscosidade da solução, além de promover o aumento da difusão através da membrana. Entretanto, o aumento de temperatura deve respeitar os limites de estabilidade da membrana e do produto. Geralmente para membranas poliméricas são utilizadas temperaturas variando de 30°C a 60°C (SCHULZ, 2005).

### 3.4 Processos que Utilizam o Gradiente de Pressão como Força Motriz

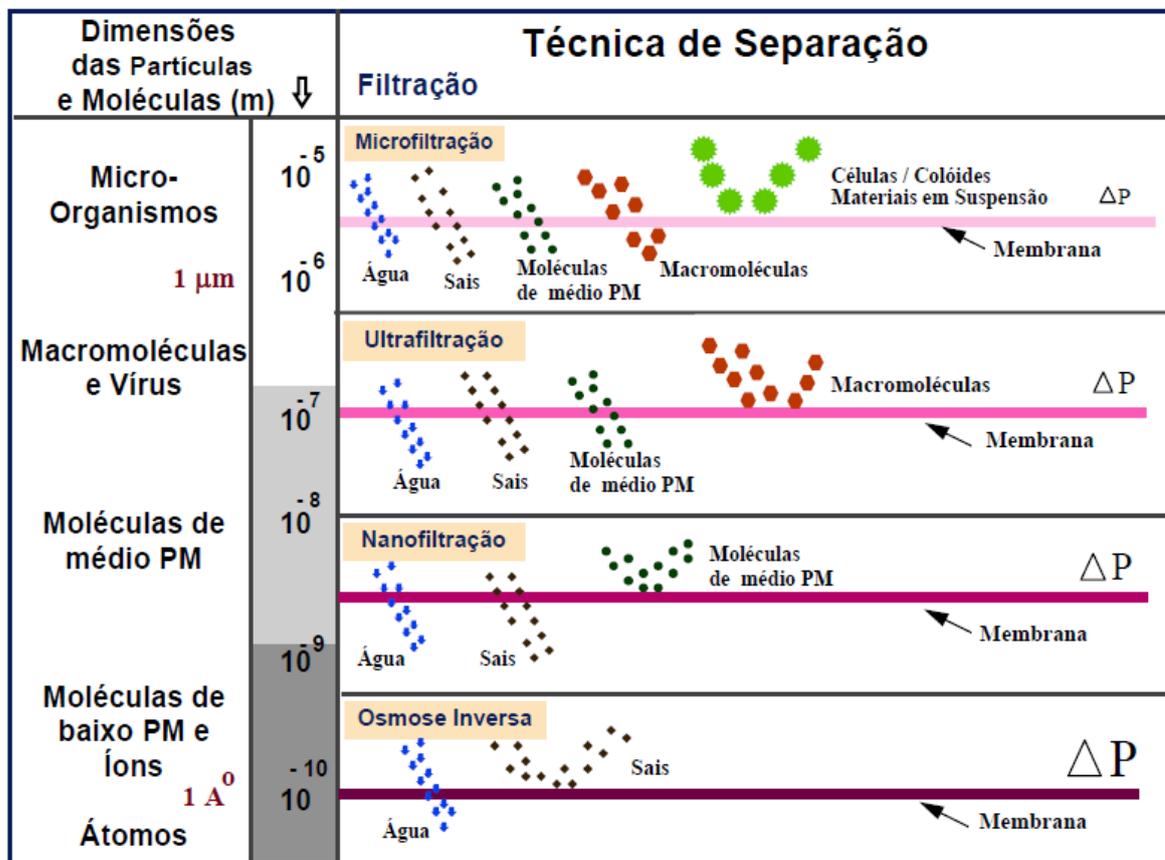
Os Processos de Separação por Membranas (PSM), que utilizam a diferença de pressão através da membrana como força motriz, têm sido utilizados para concentrar, fracionar e purificar soluções diluídas, em particular soluções aquosas. Em função da natureza e dos tipos de solutos e da presença ou não de partículas em suspensão, membranas com diferentes tamanhos e distribuição de poros ou mesmo densas, são empregadas caracterizando os processos conhecidos como Microfiltração (MF), Ultrafiltração (UF) e Osmose Inversa (OI). A Nanofiltração (NF), é um nome de utilização mais recente, e define um processo com membranas capaz de efetuar separações de moléculas de massa molar média entre 500 e 2.000 Dalton, situado-se entre o limite superior da ultrafiltração e o limite inferior da osmose inversa. Trata-se, portanto, de um processo que utiliza uma membrana “fechada” de ultrafiltração ou uma membrana “aberta” de osmose inversa (HABERT *et al.*, 2006).

Os processos que utilizam o gradiente de pressão como força motriz (MF, UF, NF e OI), podem ser caracterizados como uma extensão dos processos de filtração clássica que fazem uso, em função do tipo de método utilizado, de meios filtrantes (membranas) cada vez mais fechados, o que correspondem a poros cada vez menores. Membranas com poros menores oferecem uma maior resistência à transferência de massa, dessa forma para que seja possível obter fluxos permeados economicamente viáveis, se faz necessário aumentar a pressão de operação (HABERT *et al.*, 2006).

Em resumo, pode-se dizer que a MF, a UF, a NF e a OI são processos de separação por membranas, os quais diferem entre si na dimensão física do material retido pela membrana.

A Figura 3 apresenta as principais características dos PSM que utilizam a diferença de pressão como força motriz.

Figura 3: Principais Características dos Processos que Utilizam Diferença de Pressão como Força Motriz.



Fonte: (HABERT *et al.*, 2006)

### 3.4.1 O Processo de Microfiltração

Segundo Queiroz (2004), a microfiltração é um processo que utiliza o gradiente de pressão como força motriz, junto a uma superfície permeável (membrana) que visa garantir a separação de partículas. Neste caso, a membrana está sujeita a um gradiente de pressão, para conduzir o solvente e as pequenas espécies através dos seus poros, enquanto as moléculas maiores ficam retidas.

Assim, a vazão de alimentação é dividida em duas, a vazão do concentrado que será enriquecida de macromoléculas retidas e a vazão do permeado que será deficiente ou isenta de macromoléculas.

A microfiltração (MF) utiliza membranas porosas com poros na faixa entre 0,1 e 10  $\mu\text{m}$  sendo, portanto, indicado para a retenção de materiais em suspensão e emulsão. Como as membranas de MF são relativamente abertas, as pressões empregadas como força motriz para o transporte são pequenas, dificilmente ultrapassam 3 bar. Na microfiltração, o solvente e todo o material solúvel permeia a membrana. Apenas o material em suspensão é retido (HABERT *et al.*, 2006).

Os contaminantes mais importantes removidos por membranas de microfiltração são: contaminantes biológicos, os quais incluem protozoários (*cryptosporidium*, giárdia, *microsporidium*), algas e cianofíceas (Microcystis), bactérias e vírus e contaminantes abióticos, os quais correspondem a turbidez, óxido de ferro e manganês particulados e sílica particulada (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

Na prática porém, o permeado nunca é uma solução estéril, contendo sempre alguns microrganismos, mesmo que em baixo número. Como a sua operação não ocorre sob condições de assepsia, a retenção total da microbiota da água bruta, criará condições para o estabelecimento de outra microbiota no permeado, que utilizará os componentes orgânicos que atravessaram a membrana como fonte de carbono e energia.

### **3.5 Parâmetros de Desempenho de um Processo de Microfiltração**

#### **3.5.1 Fluxo Permeado**

Genericamente, para os processos que utilizam o gradiente de pressão como força motriz, o fluxo permeado é diretamente proporcional ao próprio gradiente de pressão, ou seja:

$$J = A \times \nabla P \quad (3.1)$$

Onde:

$J$  – fluxo permeado;

$A$  – constante de proporcionalidade que depende das características da membrana e da solução a ser processada;

$\nabla P$  – gradiente de pressão através da membrana.

O parâmetro  $A$ , pode apresentar uma forte dependência com as condições operacionais do sistema e com as propriedades da membrana. Considerando o transporte de massa numa única direção (direção  $z$ , transversal à membrana), o fluxo permeado é dado por:

$$J = A (dP/dz) = A (\Delta P / \Delta z) \quad (3.2)$$

Para o caso de membranas porosas, considerando que a membrana possa ser aproximada por uma matriz contendo poros cilíndricos passantes, o fluxo de solvente pode ser calculado com o auxílio da equação de *Hagen-Poiseuille* (escoamento em tubos) representada pela equação (HABERT, 2006):

$$J_v = \frac{\varepsilon r^2}{8\eta\tau} \frac{\Delta P}{\Delta z} = L_p \cdot \Delta P \quad (3.3)$$

Onde:

$\varepsilon$  – porosidade superficial da membrana;

$r$  – raio médio dos poros da membrana;

$\eta$  – viscosidade do solvente ou da solução que permeia através dos poros da membrana;

$\tau$  – tortuosidade dos poros;

$\nabla z$  – espessura da membrana;

$L_p$  – permeabilidade da membrana ao solvente ou a solução e depende tanto das características da membrana como do fluido que a permeia.

Considerando que a permeabilidade da membrana pode ser entendida como uma medida da facilidade que a membrana oferece a passagem de um dado solvente, tendo que o inverso da permeabilidade é uma medida de resistência (R) que o meio oferece ao fluxo/transporte desse solvente. Dessa forma, a equação 3.4 pode ser expressa por:

$$J_v = \frac{1}{\eta R} \Delta P \quad (3.4)$$

### 3.5.2 Fluxo do Concentrado

O fluxo de soluto ou fluxo de concentrado,  $J_i$ , pode ser calculado a partir da Lei de *Fick* (HABERT, 2006), sendo representado pela seguinte equação:

$$J_i = J_v C_i^m - D_i \frac{dC_i}{dz} \quad (3.5)$$

Onde, neste caso:

$C_i^m$  – concentração média do soluto entre os dois lados da membrana;

$D_i$  – coeficiente de difusão do soluto na fase líquida, no interior dos poros;

$C_i$  – variação de soluto ao longo da espessura da membrana.

Na equação de fluxo do concentrado o primeiro termo está relacionado a contribuição convectiva, ou seja, representa a quantidade de soluto que atravessa a membrana, por unidade de área e de tempo, devido ao fluxo do próprio solvente. Já o segundo termo está relacionado a contribuição difusiva, ou seja, a quantidade de soluto que atravessa a membrana devido a existência de um gradiente de concentração ao longo da membrana. Para os processos com membranas onde a

força motriz é o gradiente de pressão, temos que a contribuição difusiva é ao fluxo de soluto é desprezível comparada a parcela convectiva.

### 3.5.3 Consumo de Energia

O custo de energia elétrica para operação de membranas é o elemento mais importante dos custos de operação e manutenção de sistemas de tratamento de água, operadas com membranas convencionais.

Na prática, para os sistemas de tratamento de água que estudamos, o consumo de energia é dado pela razão entre a potência consumida pela bomba e a vazão do permeado (OLIVEIRA, 2002). Dada por:

$$E_p = \frac{P_{ot}}{Q_p} \quad (3.6)$$

Onde, neste caso:

$E_p$  – consumo de energia prático (Wh/m<sup>2</sup>);

$P_{ot}$  – potência ativa consumida pelo sistema (W);

$Q_p$  – vazão do permeado (m<sup>3</sup>/h).

A potência ativa consumida pelo sistema é dada por:

$$P_{ot} = V \cdot I \quad (3.7)$$

Na qual:

$V$  – tensão elétrica (V);

$I$  – corrente elétrica (A).

## 3.6 A Microfiltração Aplicada ao Tratamento de Água

As previsões referentes a disponibilidade de água para o presente milênio, são extremamente pessimistas. Em função disso, governos e entidades privadas,

vêm propondo uma série de ações visando minimizar o desperdício e preservar os seus mananciais (SURERUS *et al.*, 2012). Além disso, a sociedade também tem buscado aprimorar as técnicas de tratamento de águas, com o objetivo de reduzir os danos ambientais e possibilitando a reutilização da água tratada em usos urbanos potáveis e não potáveis.

Processos de produção de água para consumo humano e industrial por membranas poliméricas, tem se expandido consideravelmente nos últimos anos. Recentes aplicações no campo da água potável envolvem a Microfiltração (MF), a Ultrafiltração (UF) e os processos de membranas a baixas pressões (RIBEIRO, 2002).

Águas naturais aplicáveis a processo de filtração por membranas têm sido classificadas em função dos problemas de qualidades a serem resolvidos:

- Águas com turbidez variável e problemas de contaminação microbiológica;
- Águas com pouca turbidez e cor;
- Águas duras;
- Águas contaminadas com micropoluentes específicos (pesticidas, solventes clorados, etc.) que podem ocorrer em algumas das situações acima;
- Águas superficiais que apresentem todos os problemas de poluição citados anteriormente e com variabilidade na composição no tempo e no espaço.

Na primeira categoria, os problemas de contaminação estão relacionados com partículas, o que permite o uso das membranas de microfiltração e ultrafiltração pela sua capacidade para clarificar e desinfetar a água.

No caso de águas duras e/ou águas coloridas, os processos adequados de membranas são respectivamente a nanofiltração e a ultrafiltração com baixo peso molecular de corte. Assim, nas três primeiras categorias de águas citadas anteriormente, os processos de membranas são suficientes para a potabilização da água (RIBEIRO, 2002).

No processo de microfiltração (MF) o solvente e todo o material solúvel permeiam a membrana. Por outro lado, o processo retém todos os materiais em

---

suspensão e na forma de micro emulsão, bem como 99,99% dos microrganismos (vírus e bactérias) presentes na água de alimentação, fornecendo um microfiltrado sanitizado e isento de sólidos (SURERUS *et al.*, 2012).

---

## 4. Energia Solar Fotovoltaica

### 4.1 Radiação Solar

A radiação solar é radiação eletromagnética que se propaga a uma velocidade de 300.000 km/s, podendo-se observar aspectos ondulatórios e corpusculares. Além das condições atmosféricas, como: nebulosidade, umidade relativa do ar etc. A disponibilidade de radiação solar, também denominada energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano) (CRESESB, 2005).

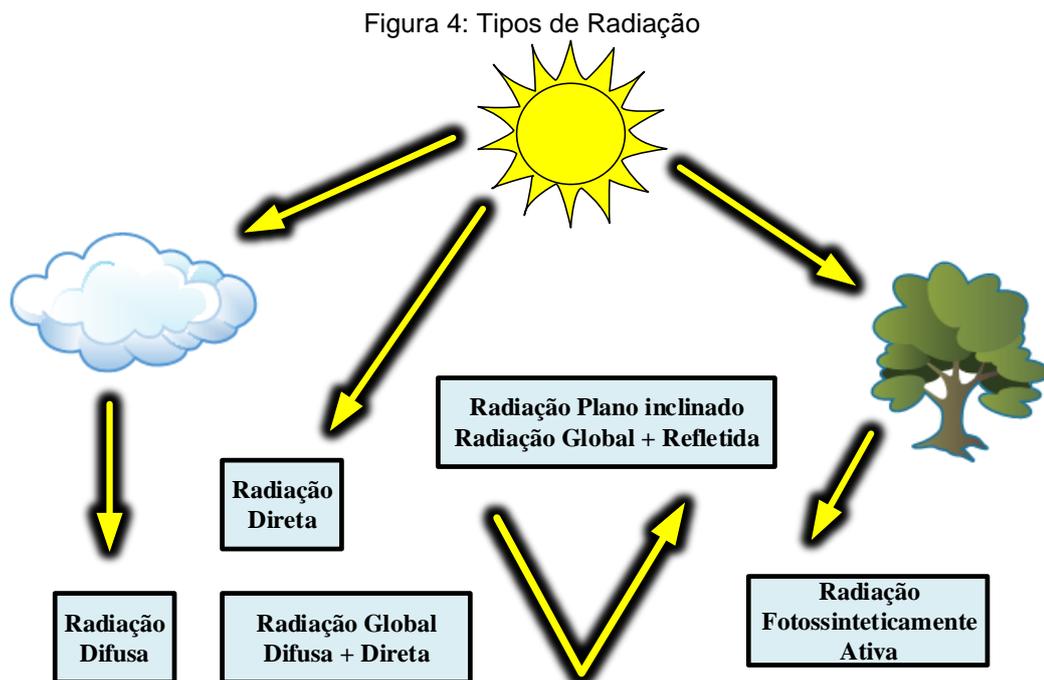
Os níveis de radiação solar em um plano horizontal na superfície da Terra, conseqüentemente potencial de energia disponível, podem ser determinados apenas de forma aproximada, devido, principalmente, à inclinação de seu eixo de rotação em relação ao plano da órbita em torno do Sol.

A radiação solar pode ser dividida nos seguintes segmentos:

- Radiação direta: Que consiste na irradiância incidente numa superfície horizontal que não sofreu nenhum processo radiativo na atmosfera;
- Radiação difusa: Que consiste na irradiância incidente numa superfície horizontal decorrente do espalhamento por constituintes atmosféricos, como: (moléculas, material particulado, nuvens etc.), responsável pela iluminação de áreas que não recebem iluminação direta do sol;
- Radiação global: Que consiste na totalidade da irradiância incidente numa superfície horizontal, isto é, a somatória das radiações direta e difusa;
- Radiação solar na faixa espectral fotossinteticamente ativa (PAR): é a radiação que compreende a faixa espectral da radiação solar de comprimento de onda de 0,4 à 0,7 nm. Apresenta grande importância em estudos sobre taxa de crescimento vegetal e fotossintética por ser a radiação que excita as moléculas de clorofila das plantas, iniciando o fluxo de energia durante o processo de fotossíntese.

- **Radiação do plano inclinado:** trata-se da média anual da radiação solar diária incidente sobre um plano com inclinação igual à latitude do pixel em consideração. Essa radiação não leva em conta a topografia local.

Na Figura 4 descreve-se os tipos de radiações existentes.



Fonte: PEREIRA, 2014

De toda a radiação solar que chega às camadas superiores da atmosfera, apenas uma fração atinge a superfície terrestre, devido à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. Esta fração que atinge o solo é constituída por uma componente direta (ou de feixe) e por uma componente difusa (CRESESB, 2005).

A medição da radiação solar, tanto a componente direta como a componente difusa na superfície terrestre, é importante para os estudos das influências das condições climáticas e atmosféricas. Com um histórico dessas medidas, pode-se viabilizar instalações de sistemas térmicos e fotovoltaicos em uma determinada região garantindo o máximo aproveitamento ao longo do ano onde, as variações da intensidade da radiação solar sofrem significativas alterações (CRESESB, 2005).

## 4.2 Disponibilidade Solar

A energia solar que atinge a atmosfera a cada ano é de  $1,52 \times 10^{18}$  kWh, e o consumo primário anual de energia no mundo em 2010 ficou em torno de  $1,40 \times 10^{14}$  kWh. Isso significa que um aproveitamento de apenas 0,01% da radiação solar seria suficiente para suprir toda a demanda energética mundial. Esses números resumem o interesse na energia solar (OLIVARES *et al.*, 2012).

As preocupações ambientais globais, a crescente demanda de energia e o constante desenvolvimento e aperfeiçoamento de novas tecnologias estão impulsionando o incremento da utilização de energias renováveis, tornando-as cada vez mais atraentes neste século XXI. A energia solar é a mais abundante, inesgotável e limpa de todos os recursos energéticos renováveis até a presente data (PARIDA *et al.*, 2011).

Com o avanço da utilização da energia solar, a previsão da radiação solar na superfície do planeta também cresce em importância no gerenciamento de sistemas de geração e distribuição de eletricidade (MARTINS *et al.*, 2011).

O Brasil, por ter sua maior parte localizada na região intertropical, possui grande potencial para aproveitamento de energia solar durante todo o ano (PEREIRA *et al.*, 2006). Existe um grande leque de possibilidades a médio e longo prazos para aproveitamento dessa abundante forma de energia renovável, que vai desde pequenos sistemas fotovoltaicos autônomos até as grandes centrais que empregam energia solar concentrada. No entanto essa energia ainda tem uma participação incipiente na matriz energética brasileira. Apenas a energia solar térmica para aquecimento de água tem despertado interesse no mercado nacional. Logo, existe uma lacuna quanto à adaptação do Brasil a essas fontes de energia renováveis em detrimento do desenvolvimento sustentável (PALMIRO *et al.*, 2013).

### 4.3 Energia Solar

Quase todas as fontes de energia – hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos – são formas indiretas de energia solar. Além disso, a radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, através de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoelétrico e o fotovoltaico (ANEEL, 2002).

A conversão direta de energia solar em energia elétrica, ocorre através de efeitos da radiação sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. Uma forma de conversão bastante difundida é a que utiliza o efeito fotoelétrico, na qual os fótons contidos na luz solar são convertidos em energia elétrica, através do uso de células solares (CRESESB, 2005).

A geração de energia elétrica a partir da luz solar, dar-se através do uso de captadores denominados células solares ou fotovoltaicas. As células fotovoltaicas, são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (Si) e podendo ser constituída de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo. Pela baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, agrupam-se várias células formando um módulo ou painel (CRESESB, 2005).

Os módulos são encapsulados com materiais que garantem rigidez mecânica que protegem as células contra danos e condições climáticas, e evitam que a umidade do ar atinja os contatos elétricos e conduzem bem o calor, para reduzir a temperatura de trabalho das células.

Um sistema fotovoltaico não precisa exclusivamente do brilho do sol para operar. Ele também gera eletricidade em dias nublados, mas a quantidade de energia gerada depende da densidade das nuvens e pode ser consideravelmente menor, tornando o sistema antieconômico (MARTINS, 2011).

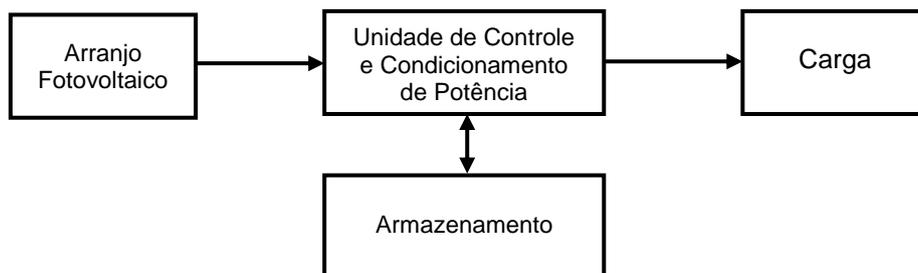
#### 4.4 Configurações Básicas de Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são classificados em três categorias principais: isolados, híbridos ou conectados a rede elétrica, os quais são utilizados de acordo com a aplicação e/ou disponibilidade de recursos energéticos.

Sistemas autônomos, não conectados à rede elétrica, podem ou não apresentar fontes de energia complementares à geração fotovoltaica. Quando a configuração não se restringe à geração fotovoltaica, temos os sistemas híbridos. Se o sistema é puramente fotovoltaico, então ele é chamado de sistema isolado (CRESESB, 1999).

Na Figura 5, esquema de um sistema fotovoltaico básico.

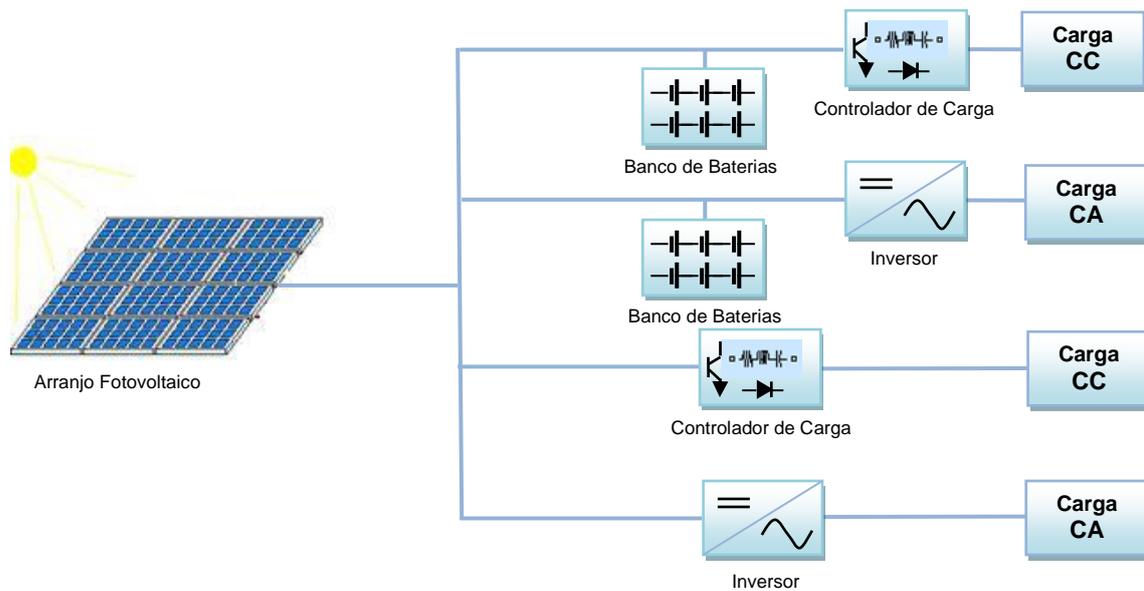
Figura 5: Configuração Básica de Sistemas Fotovoltaicos



Em alguns sistemas é possível operar sem o armazenamento de energia. Nestes casos, a oferta de energia define o ponto de operação. Desta forma, para o sistema em estudo a energia captada é convertida para instantaneamente para realização do processo de microfiltração da água.

Os sistemas isolados apresentam quatro configurações possíveis para o acoplamento com a carga, sendo estas mostradas na Figura 6 e descritas a seguir.

Figura 6: Diagrama de Sistemas Fotovoltaicos em Função da Carga Utilizada



Fonte: RAFAELA, 2014

- **Carga CC com Armazenamento:** Neste tipo de configuração a energia elétrica é utilizada independente de haver ou não geração fotovoltaica simultânea, fornecendo energia a equipamentos elétricos que operam em corrente contínua. É comum o uso de controlador de carga de modo a proteger as baterias de danos por sobrecarga ou descarga profunda.
- **Carga CC sem Armazenamento:** Neste tipo de configuração a energia elétrica é utilizada no momento da geração por equipamentos que operam em corrente contínua. Para este caso utiliza-se um circuito de controle a fim de evitar eventuais sobrecargas ao sistema.
- **Carga CA com Armazenamento:** Neste tipo de configuração a energia elétrica é utilizada independente de haver geração fotovoltaica simultânea, sendo aplicada a equipamentos que operam em corrente alternada. Para isto, é necessária a utilização de um inversor entre os painéis e a carga, além de um seguidor de máxima potência que pode estar embutido no próprio inversor.

- **Carga CA sem Armazenamento:** Neste tipo de configuração a energia elétrica é utilizada no momento da geração por equipamentos que operam em corrente alternada sem o uso de baterias, necessitando, para tanto, a introdução de um inversor entre o arranjo fotovoltaico e o equipamento a ser utilizado a fim de converter a corrente contínua proveniente dos painéis em corrente alternada necessária a carga.

## **4.5 Componentes Básicos de Sistemas Fotovoltaicos**

De acordo com a Figura 6 os sistemas fotovoltaicos são compostos por três elementos básicos: o arranjo de módulos fotovoltaicos, o subsistema de condicionamento de potencia, o qual converte a saída do arranjo em potência útil, e as baterias, que armazenam a energia elétrica.

A célula solar que está localizada no módulo é o dispositivo mais importante de todo o sistema, sendo responsável pela conversão de energia solar em energia elétrica. O subsistema de condicionamento de potencia compreende: controlador de carga, inversor, conversor e seguidor de máxima potencia (CRESESB, 1999).

### **4.5.1 Módulo Fotovoltaico**

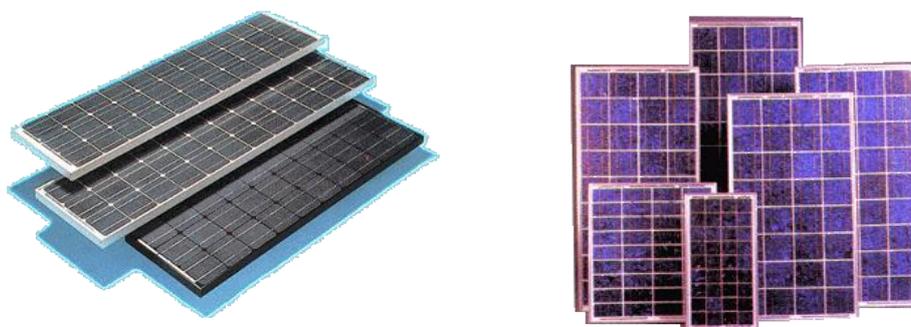
O módulo fotovoltaico corresponde a unidade básica de todo o sistema, sendo composto por células conectadas em arranjos produzindo tensão e corrente suficientes para a utilização da energia.

Montado a partir de conjunto de células "*wafer*" de silício, texturizadas, laminadas e tratadas com materiais específicos que aumentam sua absorção e vida útil. Geram tensões e correntes que são condicionadas às ligações em paralelo ou em série, das células. A parte frontal dos módulos é revestida com resina ou vidro temperado de alta transparência com resistência a tempestade, neve, granizo, salinidade, umidade e poeira. Os painéis costumemente são fornecidos emoldurados em perfis de alumínio e contém terminais de conexão. A energia proveniente do painel é em corrente contínua e pode alimentar diretamente equipamentos que utilizam esta propriedade e carregar baterias.

Pelas características típicas das células: corrente máxima em torno de 3 Ampères e tensão em torno de 0,7 Volts, ou seja, baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, agrupam-se várias células formando um módulo. O arranjo das células nos módulos pode ser feito conectando-as em série, em paralelo ou misto (CRESESB, 2005).

O módulo fotovoltaico é a menor unidade do ponto de vista comercial. Cada módulo mede cerca de 50 cm de largura e 1 metro de comprimento, como mostrado na Figura 7, produzindo de 12 a 15 Volts de tensão e potência de até 50 Watts, dependendo da insolação.

Figura 7: Modelos de Módulos Fotovoltaicos



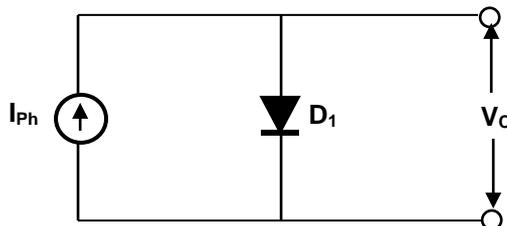
Fonte: <http://www.kyocerasolar.com.br/>

### a) Célula Fotovoltaica

A conversão de energia solar em energia elétrica é obtida utilizando-se um material semicondutor como elemento transformador, conhecido como célula fotovoltaica ou célula solar.

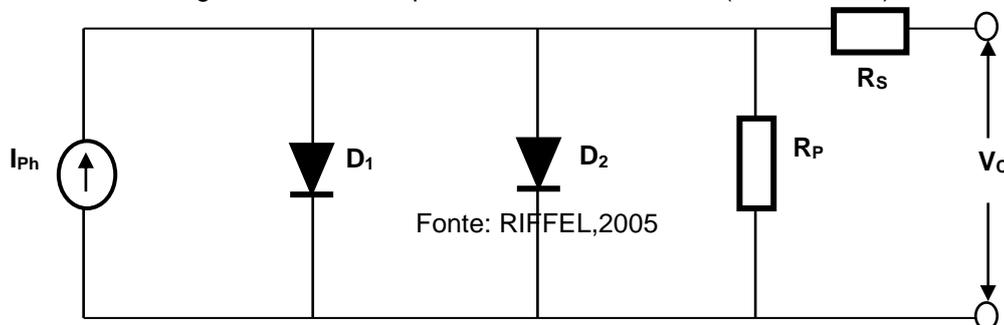
O comportamento elétrico da célula fotovoltaica pode ser descrito através de um circuito elétrico equivalente, composto de uma fonte de corrente (fotocorrente) e um diodo em paralelo conforme mostra a Figura 8. Entretanto, em um modelo real a célula apresenta perdas. Algumas dessas perdas são representadas através de resistências inseridas no modelo elétrico da célula ideal (RIFFEL, 2005).

Figura 8: Circuito Equivalente da Célula Solar (Modelo Ideal)



Na Figura 9 se tem o modelo elétrico real da célula fotovoltaica, onde a resistência em série,  $R_s$ , descreve a queda de tensão devido as perdas ôhmicas do material semicondutor; e a resistência em paralelo,  $R_p$ , descreve as perdas que surgem principalmente devido a perturbações elétricas entre as partes da frente e de trás da célula, assim como devido a 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.

Figura 9: Circuito Equivalente da Célula Solar (Modelo Real)



Fonte: RIFFEL,2005

## b) Características Elétricas dos Módulos

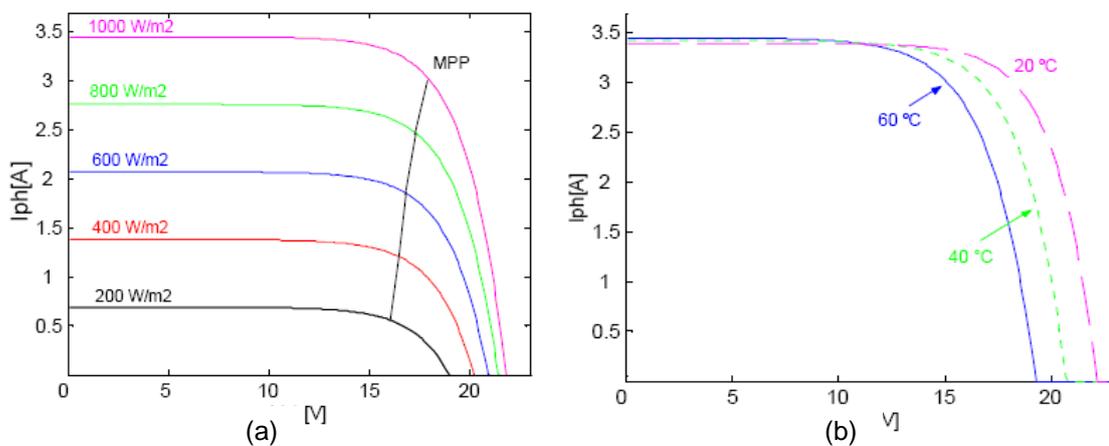
Os módulos fotovoltaicos normalmente operam em condições diferentes da condição padrão, tendo suas principais grandezas elétricas alteradas com variações da radiação e da temperatura. Sendo estas variações decorrentes de mudanças climáticas do ambiente.

A radiação solar incidente em uma célula fotovoltaica provoca o aparecimento de uma fotocorrente,  $I_{ph}$ , que é diretamente proporcional a essa radiação, conforme

se observa na figura 10.a. Do mesmo modo se comporta a corrente de curto-circuito da célula,  $I_{cc}$ , se os efeitos da resistência  $R_s$  forem desprezados (RIFFEL, 2005).

A temperatura também provoca uma diminuição da banda de energia do material semiconductor, 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% por °C, resultando que a potência gerada diminui em 1% a cada 2,7K de elevação da temperatura, conforme é observado na Figura 10.b.

Figura 10: Fatores que Influenciam a Curva Característica dos Módulos Fotovoltaicos



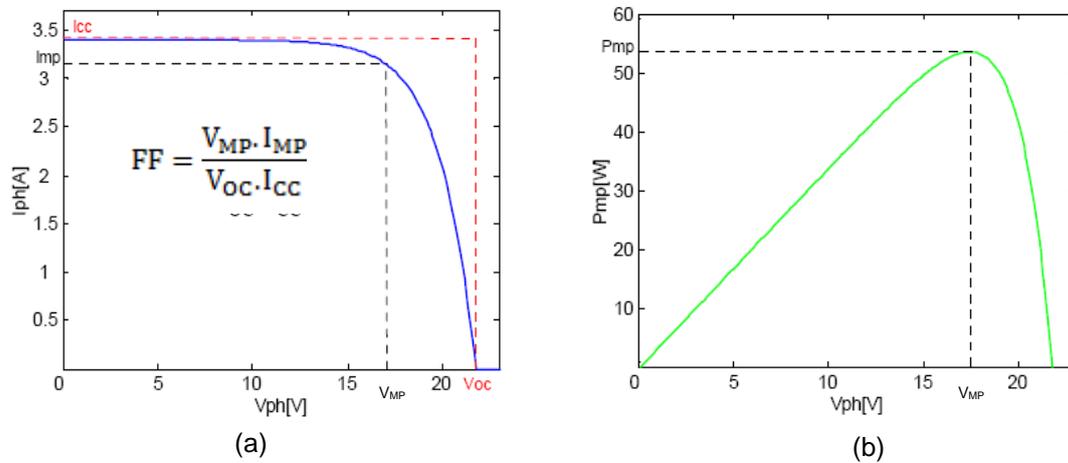
Fonte: (RIFFEL, 2005)

Os principais parâmetros de especificação de uma célula solar são:

- A corrente de curto-circuito,  $I_{cc}$ ;
- A tensão de circuito aberto,  $V_{oc}$ ,
- A tensão e corrente de máxima potência, respectivamente,  $V_{MP}$  e  $I_{MP}$ ;
- O fator de forma (FF);
- A eficiência ( $\eta$ ).

O fator de forma é uma grandeza que expressa quanto a curva característica se aproxima de um retângulo no diagrama  $I \times V$ . Estando alguns desses parâmetros mostrados na Figura 11.

Figura 11: Curva Característica IxV, com Definição do FF, e a Curva de Potência do Módulo

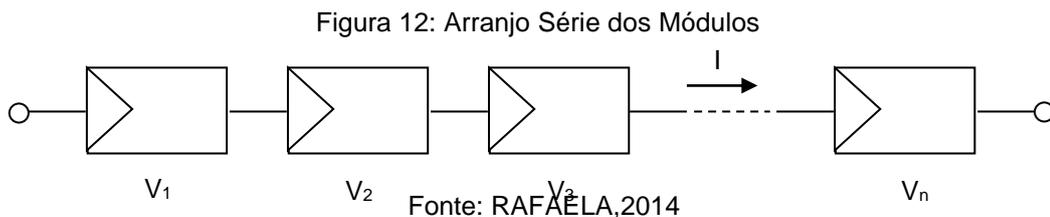


Fonte: (RIFFEL, 2005)

**c) Arranjo dos Módulos**

Os módulos, assim como as células em um módulo, podem ser conectados em ligações série e/ou paralelo, dependendo da potência e tensão desejadas.

A conexão em série dos dispositivos fotovoltaicos é feita mediante a ligação de um terminal positivo de um módulo ao terminal negativo de outro, e assim por diante. Conforme mostrado na Figura 12.



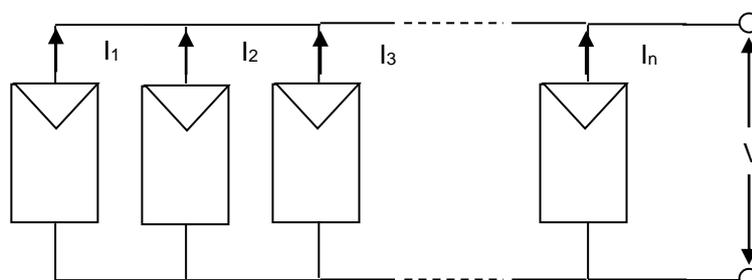
No arranjo série (isto é idêntico para células, módulos e painéis) as tensões são adicionadas e a corrente é a mesma em todos os módulos, ou seja:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \tag{4.1}$$

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n \tag{4.2}$$

A conexão em paralelo de dispositivos fotovoltaicos é feita mediante a ligação de terminais positivos unidos e terminais negativos também unidos. Conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13: Arranjo Paralelo dos Módulos



Fonte: RAFAELA,2014

O arranjo em paralelo permite obter-se uma corrente resultante correspondente à soma de todos os valores de corrente de cada uma das células individuais, sendo a tensão na carga a mesma de qualquer uma das células, ou seja:

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

Ao assumir-se as correntes e tensões individuais iguais para os arranjos série e paralelo, significa considerar-se módulos idênticos sob as mesmas condições de radiação e temperatura.

#### 4.5.2 Baterias

As baterias, também denominadas de acumuladores de carga, são conhecidas por ser uma conveniente forma de armazenamento de energia.

A mais simples unidade de operação de uma bateria é a chamada célula eletroquímica. Dependendo do tipo de célula utilizada as baterias podem ser classificadas em recarregáveis e não-recarregáveis.

As células primárias compõem as baterias que podem ser utilizadas uma única vez (não-recarregáveis), as quais são geralmente empregadas como fontes de energia de baixa potência. Já as células secundárias compõem as baterias

recarregáveis, ou seja, aquelas que podem ser carregadas com o auxílio de uma fonte de tensão ou de corrente e reutilizadas várias vezes, utilizadas na maioria das aplicações por longos períodos.

Nas instalações fotovoltaicas pode-se utilizar a energia captada pelos painéis diretamente, que é a forma de melhor aproveitamento desta energia, como é o caso do sistema em estudo. No entanto, é interessante observar que a potência fornecida à carga é variável de acordo com a hora do dia (potencial de insolação), nebulosidade, clima, etc.

A maioria dos sistemas fotovoltaicos tende a operar por vários dias ou semanas sem adequado recarregamento das baterias, em virtude da falta de energia solar, o que ocasiona a redução de sua vida útil.

Os fatores determinantes para a não utilização de baterias em sistemas de tratamento de água, a exemplo dos processos de separação por membranas, são o elevado custo e a reduzida vida útil das baterias, além da necessidade de manutenção periódica, operação em ambientes de temperatura controlada, controle de sobrecargas e sobredescargas.

#### **4.5.3 Controladores de Carga**

A função principal dos controladores de carga é facilitar a máxima transferência de energia do arranjo solar fotovoltaico para a bateria e protegê-la contra cargas e descargas excessivas, aumentando, conseqüentemente, a sua vida útil.

Um controlador ideal para a aplicação fotovoltaica deve, além de satisfazer os seus objetivos básicos, gerenciar a carga de acordo com a disponibilidade de energia solar, necessitando para tal, possuir uma informação confiável do estado de carga da bateria em um dado instante. Espera-se, ainda, dos controladores boa estabilidade térmica e baixo consumo.

#### 4.5.4 Inversores

Os inversores, também chamados de conversores, são elementos cuja finalidade é adaptar as características da corrente gerada à demanda total ou parcial do sistema.

Os inversores usam um mecanismo de chaveamento para alternar o fluxo de corrente entre as direções positiva e negativa. Transistores de potência, retificadores controlados de silício (SCRs) e, mais recentemente, os IGBTs (*Insulated Gats Bipolar Transistor*) são tipicamente usados como chaves semicondutoras.

Em outras aplicações, as quais incluem elementos que trabalham em corrente alternada, é necessário a presença de um inversor que transforme a corrente contínua, proveniente dos painéis, em corrente alternada.

Um inversor caracteriza-se, principalmente, pela tensão de entrada, que deve se adaptar a do gerador, a potência máxima que pode proporcionar e a eficiência. Esta última se define como a relação entre a potência elétrica entregue a carga (potência de saída) e a potência elétrica extraída do gerador (potência de entrada).

Para especificar um inversor, é necessário considerar tanto a tensão de entrada quanto a tensão de saída. Além disso, todas as exigências que a carga fará ao inversor devem ser observadas, não somente em relação à potência, mas também variações de tensão, frequência e forma de onda (CRESESB, 1999).

A eficiência do inversor varia em função da potência consumida pela carga. É necessário conhecer essa variação, sobretudo se a carga em corrente alternada é variável, a fim de que o ponto de operação do equipamento se ajuste o melhor possível a um valor médio especificado. Pode-se considerar a eficiência de 70% da carga como um parâmetro aceitável de eficiência do inversor. Porém, deve-se projetar um inversor visando alcançar eficiência superior a 90%.

A escolha do inversor a ser utilizado deve ser feita considerando, obviamente, as características da carga de trabalho, a qual definirá a necessidade de equipamentos mais ou menos complexos.

## 4.6 Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos

O projeto de um sistema fotovoltaico é o “casamento” entre a energia fornecida pelo Sol ao sistema e a demanda de energia da carga. O critério para o dimensionamento pode ser: custo da energia gerada, confiabilidade, eficiência ou uma combinação destes fatores.

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico deve considerar a robustez e facilidade de instalação e manutenção, tendo em vista que, na maioria dos casos, eles serão utilizados em locais remotos e inóspitos. Também devem ser consideradas as perdas relativas aos componentes (condutores, diodos de bloqueio, proteções, etc.).

Para o projeto de sistemas fotovoltaicos alguns fatores são de grande importância para a garantia de um dimensionamento eficiente, os quais destacam-se os dados meteorológicos e a estimativa da curva de carga, além dos componentes necessários à operação segura e confiável do sistema.

As principais etapas do projeto de um sistema fotovoltaico são:

- Avaliação do recurso solar;
- Estimativa da curva de carga;
- Escolha da configuração;
- Dimensionamento do sistema de armazenamento;
- Dimensionamento da geração fotovoltaica;
- Especificação dos demais componentes (controladores de carga e dispositivos de condicionamento de potência);
- Projeto elétrico.

### 4.6.1 Avaliação do Recurso Solar

Nesta fase do projeto busca-se quantificar a radiação global incidente sobre o painel fotovoltaico de forma a podermos calcular a energia gerada.

Os dados de radiação solar podem estar especificados em termos de fluxo de potência (valores instantâneos) ou energia (com diversos períodos de integração) por unidade de área. A forma mais comum de apresentação dos dados de radiação é através de valores médios mensais para a energia acumulada ao longo de um dia.

Uma forma bastante conveniente de se expressar o valor acumulado de energia solar ao longo do dia é através do número de horas de sol pleno. Esta grandeza reflete o número de horas em que a radiação solar deve permanecer constante e igual a  $1 \text{ kW/m}^2$  ( $1.000 \text{ W/m}^2$ ) de forma que a energia resultante seja equivalente à demanda acumulada para o dia e local em questão (CRESESB, 1999).

Os métodos de tratamento de dados utilizam modelos que tentam, com o máximo de fidelidade, estimar as grandezas cuja medição é mais complexa ou dispendiosa, ou aproveitar uma grande base dados disponíveis.

#### **4.6.2 Estimativa da Curva de Carga**

Para o dimensionamento do sistema de geração, precisamos analisar a demanda de energia pela carga. O objetivo desta análise é construir com a maior fidelidade possível, uma curva de carga, identificando as possíveis sazonalidades. O levantamento preciso da curva de carga, pode implicar uma redução significativa do custo do sistema e prevenir contra efeitos de possíveis variações localizadas no comportamento da carga.

A forma mais comum de se especificar uma carga, é através do seu consumo diário de energia. É comum utilizar-se o valor de consumo correspondente a dias em que a relação “consumo/disponibilidade de energia solar” é máxima. O consumo é expresso em Ampères-Hora (Ah), ou em casos de sistemas que dispõe de seguidores de máxima potência, é mais conveniente utilizar o Watts-Hora (Wh). (CRESESB, 2005).

Outro fator importante na avaliação da carga, é a determinação dos valores extremos de consumo (mínimo e máximo), para que os componentes possam ser dimensionados segundo as condições críticas de operação. Tensão nominal e características adicionais sobre os equipamentos (CA ou CC, eficiências, etc.) completam a especificação da carga.

### 4.6.3 Escolha da Configuração

Esta etapa, compreende a definição da configuração do sistema de geração fotovoltaica, os quais baseiam-se nas características da carga e na disponibilidade de recursos energéticos; sendo definidas como: sistemas autônomos ou interconectados à rede elétrica, CA ou CC, com ou sem armazenamento, etc.

### 4.6.4 Dimensionamento do Sistema de Armazenamento

Baterias são, na atualidade, o meio mais difundido de armazenamento de energia elétrica. O processo de dimensionamento de um banco de baterias é iterativo. O projetista oscila entre a escolha do modelo (tecnologia, capacidade, etc.), e o cálculo do número de unidades necessárias para um dado sistema, considerando aspectos como vida útil, confiabilidade e custo.

Os parâmetros mais importantes para o dimensionamento do banco de baterias são a eficiência, a máxima profundidade de descarga (para ciclos diários e ciclos esporádicos) e a autonomia do sistema.

### 4.6.5 Dimensionamento da Geração Fotovoltaica

De posse dos dados meteorológicos de relevância, e da expectativa de demanda de energia para o sistema, pode-se estabelecer o dimensionamento dos painéis fotovoltaicos. Assim, como para as baterias, nesta etapa temos um processo iterativo, onde o projetista, oscila entre a escolha do modelo e o cálculo do número de unidades necessárias para o sistema (CRESESB, 2005).

A escolha do tipo e do número de módulos fotovoltaicos a serem utilizados depende de uma série de fatores, dentre eles:

- Tensão nominal do sistema;
- Curva característica  $I \times V$  do módulo;
- Custo da área disponível para instalação;

- Degradação da performance em função da temperatura ambiente e tempo de vida módulos;
- Custo e expectativa de vida para o módulo.

Os parâmetros mais importantes para o dimensionamento são:

- Consumo calculado para a carga;
- Radiação solar global no plano do módulo;
- Eficiência do banco de baterias;
- Perdas causadas por componentes adicionais;
- Valores típicos de corrente que corresponde ao ponto de máxima potência;
- Tensão de operação.

#### **4.6.6 Especificação dos Demais Componentes Básicos**

Esta etapa compreende a especificação de controladores de carga e dispositivos de condicionamento de potência com inversores ou conversores. Estes componentes, que integram-se ao sistema em função da aplicação e/ou configuração, precisam de uma correta especificação para uma boa operação.

Componentes especificados corretamente, e apenas com as funções realmente necessárias reduzem a complexidade, o custo e aumentam a confiabilidade do sistema.

Controladores de Carga: o valor máximo de corrente e a tensão de operação são os parâmetros mínimos para a especificação.

Inversores e Conversores: os parâmetros básicos são a tensão de entrada, a potência nominal e as características de saída.

#### **4.6.7 Projeto Elétrico**

Para o projeto elétrico os fatores mais importantes são:

- Interconexão dos diversos componentes do sistema de forma eficiente, evitando perdas de energia;
- Obtenção de um projeto seguro, sob o ponto de vista elétrico, considerando a segurança do sistema e do usuário;
- Verificação da obediência aos códigos locais para instalações elétricas.

Estes aspectos, incluem desde a escolha dos condutores até o dimensionamento/especificação de dispositivos de proteção.

#### **4.7 Energia Solar e Recursos Hídricos**

A interação entre recursos hídricos e sistemas fotovoltaicos, tem sido aplicada e desenvolvida em diversas áreas do conhecimento, dentre as que ganham maior destaque estão a irrigação, dessalinização, tratamento de esgoto e abastecimento de água.

Desde que os sistemas PV foram inventados, sistemas de bombeamento fotovoltaico já foram implementados nas principais regiões remotas do mundo, como fonte de energia alternativa (SHORT *et al.*, 2003). Muitas regiões do planeta, são áreas remotas de natureza rural ou de difícil acesso e, conseqüentemente, não possuem linhas de distribuição de energia elétrica em muitas partes das vilas, fazendas ou comunidades ribeirinhas. As fontes naturais de energias renováveis, como a eólica, a hídrica e a solar, estão disponíveis a todos, o que torna o bombeamento de água movida a um sistema PV, o mais rentável em aplicações nas áreas de pequena escala (MEAH *et al.*, 2008).

Em comparação com os sistemas tradicionais, muitas vantagens são atribuídas aos sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água para abastecimento: a viabilização do desenvolvimento em regiões remotas, onde o custo da eletrificação pela rede convencional é demasiadamente alto, com relação ao retorno financeiro do investimento; a regulação da oferta de energia em períodos de estiagem; a diminuição da dependência do mercado de petróleo; e a redução das emissões de gases poluentes na atmosfera, como estabelece a Conferência de Kyoto (1991). Os motores a Diesel ou gás propano, exigem não apenas combustíveis caros, eles

também geram ruído e poluição do ar em muitas áreas intocadas pelo homem. Sistemas solares são amigos do ambiente, de baixa manutenção, e não têm custo de combustível (PEREIRA *et al.*, 1997).

O estudo do acoplamento da tecnologia fotovoltaica, com métodos de dessalinização teve um aumento significativo nas últimas décadas (QTAISHAT *et al.*, 2013). A utilização da energia solar para sistemas de tratamento de água, é bastante difundida para os processos com membrana, que utilizam a dessalinização via osmose inversa, como método de separação. Essa é uma combinação já consolidada e bastante atrativa, a qual constitui uma excelente opção para o fornecimento de água dessalinizada, em pequenas comunidades remotas que têm acesso ao mar ou à água salobra.

O sistema utilizado nesta pesquisa, busca o uso da energia solar fotovoltaica, aplicada ao tratamento de água via membrana de microfiltração, o que corresponde a uma combinação inovadora e com perspectivas bastante promissoras. Considerando que, para sistemas desse tipo o consumo energético pode ser bem menor quando comparado a sistemas que utilizam a osmose inversa, como mecanismo de tratamento de água, haja vista, os níveis de pressão de operação utilizados. Além disso, a microfiltração, visa o tratamento de águas doces, porém contaminadas por microrganismo, material em suspensão, presença de cor e/ou turbidez, o que abrange uma gama bastante vasta de fonte hídrica de captação de água de alimentação para o sistema.

Considerando que a escassez hídrica, para fins de potabilidade se configura pela indisponibilidade do recurso água em condições aceitáveis para o consumo humano, temos o processo de microfiltração, como um mecanismo bastante eficiente e consolidado, o qual garante a retenção de todos os materiais em suspensão, e na forma de micro emulsão, bem como remoção de 99,99% dos microrganismos (vírus e bactérias) presentes na água de alimentação, fornecendo um microfiltrado sanitizado e isento de sólidos (SURERUS *et al.*, 2012).

Outro diferencial desta pesquisa, seria o desenvolvimento de um sistema que não utiliza o armazenamento de energia (baterias), fazendo uso do recurso solar, instantaneamente a sua captação.

---

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata da descrição dos materiais e métodos aplicados ao desenvolvimento da parte experimental desta pesquisa.

O trabalho foi realizado no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) em conjunto com o Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM), ambos da Universidade Federal de Campina Grande e com o Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul.

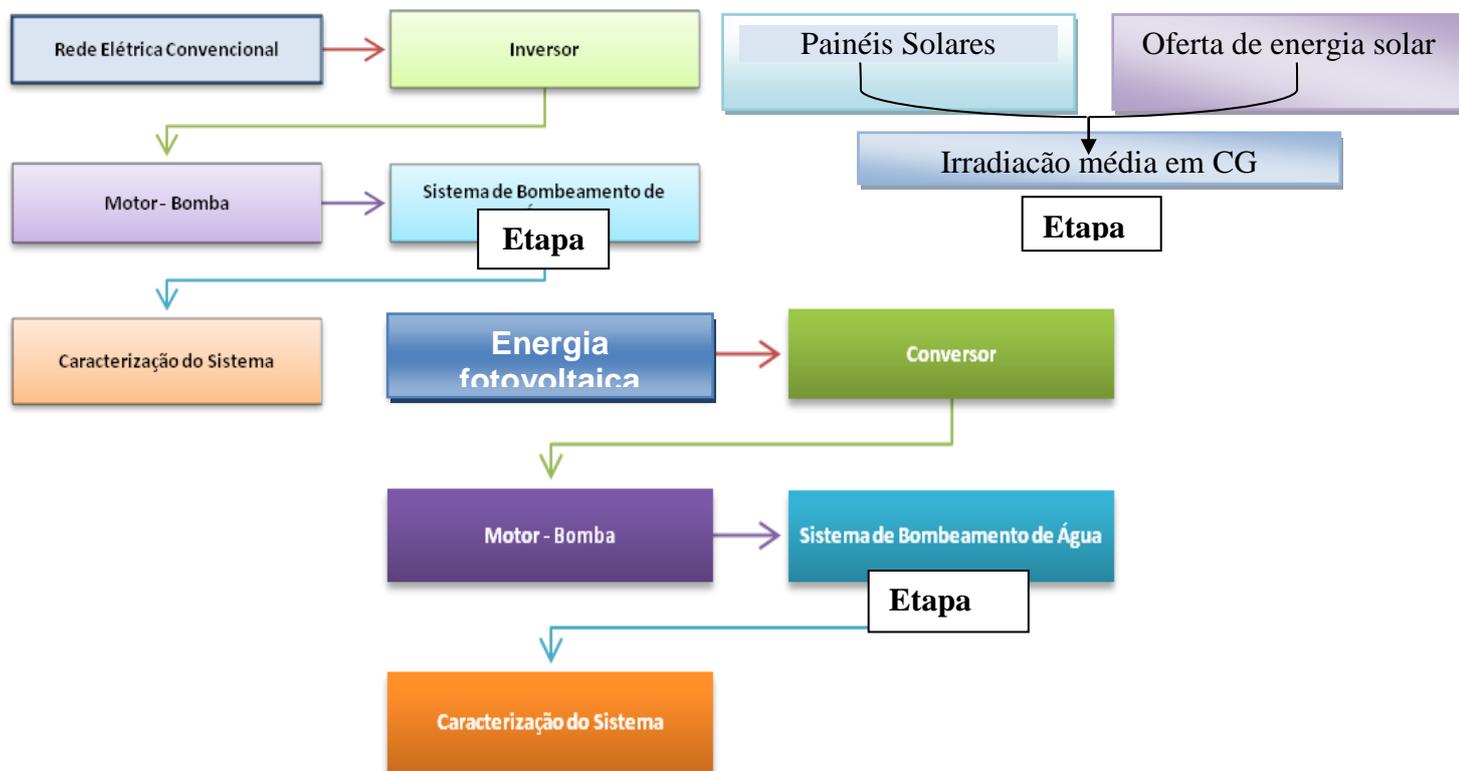
Na fase inicial foi feita a caracterização do sistema de bombeamento de água sob o aspecto de consumo de energia e produção de água (Etapa I), para isso foi utilizado como fonte de geração de energia a rede elétrica convencional, o qual nos permitiu a verificação do desempenho submetido a diferentes níveis de energia ofertada, variando assim as pressões exercidas no sistema de bombeamento. Posteriormente foi feito um estudo da disponibilidade da energia solar da região de Campina Grande (Etapa II), durante 12 meses.

Na fase final foi realizada a operação do sistema fazendo uso efetivamente da geração solar fotovoltaica utilizando 3 painéis fotovoltaicos de 110 w da Kyocera (Etapa III), o que nos permitiu verificar a funcionalidade do mesmo operando com demanda variável de energia.

### 5.1. Metodologia Proposta

O fluxograma ilustrado na Figura 14 mostra as etapas realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

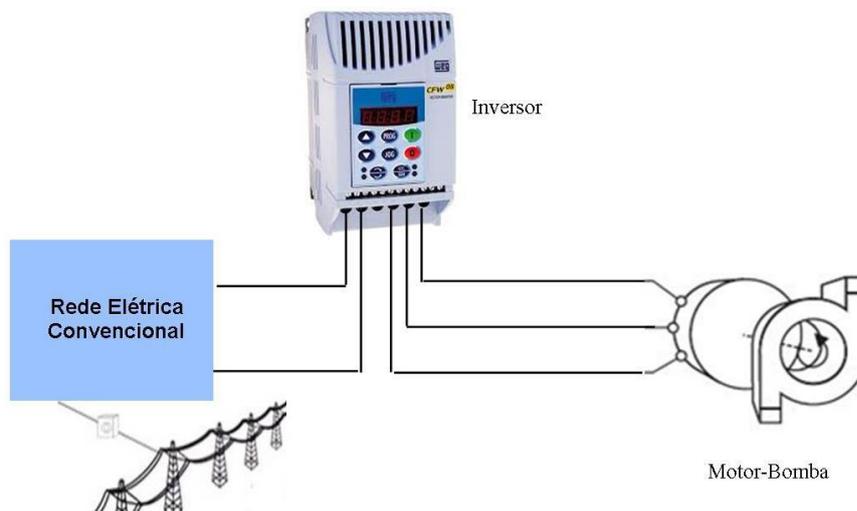
Figura 14: Fluxograma de Execução de Atividades



### 5.1.1. Etapa I

Na etapa I o sistema de bombeamento de água foi operado utilizando como fonte de energia a rede elétrica convencional, dessa forma o sistema de geração de energia esteve configurado de acordo com a Figura 15.

Figura 15: Sistema de Geração de Energia para Etapa I



Fonte: RAFAELA, 2014

Nesta etapa, para se adequar a energia proveniente da rede elétrica (monofásica) ao sistema de bombeamento de água (trifásico), utilizou-se um inversor comercial o qual fez a adequação do sinal elétrico de alimentação ao sistema motor-bomba (carga).

Esta etapa, permitiu a caracterização do sistema de bombeamento de água, mediante análise do seu funcionamento submetido a diferentes níveis de velocidade e energia disponibilizada. O que permitiu obter curvas de produção de água em função da potência elétrica entregue a carga, da vazão do permeado, da pressão de operação do sistema. Além disso, verificou-se a capacidade de remoção de cor e turbidez para o sistema de microfiltração utilizado.

### 5.1.2. Etapa II

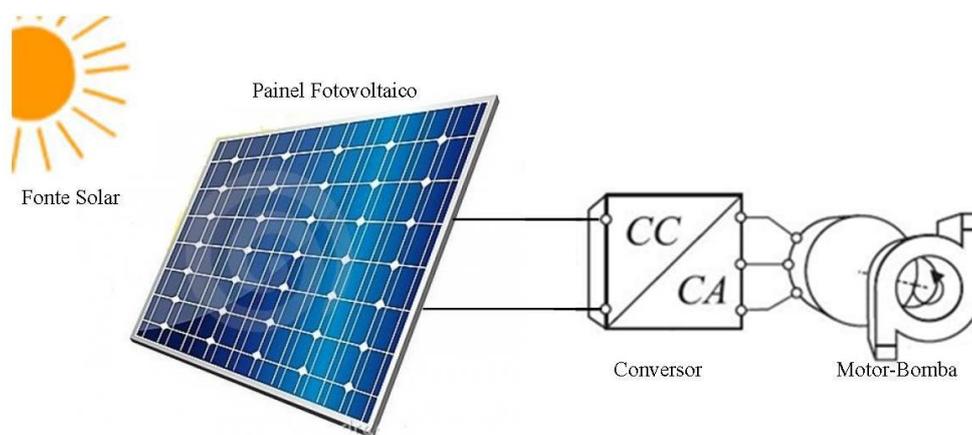
O estudo da oferta de energia solar, foi realizado mediante análise estatística dos níveis de radiação, o qual permitiu identificar as faixas de radiação solar, que apresentam períodos contínuos máximos e, dessa forma, a partir do arranjo fotovoltaico utilizado, prever a potência gerada pelos painéis fotovoltaicos.

Os dados de irradiação solar, utilizados, referem-se ao período de um ano, especificamente de *outubro/2013 à setembro/2014*, para a região de Campina Grande – PB.

### 5.1.3. Etapa III

Na etapa III, o sistema de bombeamento de água, foi operado utilizando a energia solar fotovoltaica, dessa forma o sistema de geração de energia esteve configurado de acordo com a Figura 16.

Figura 16: Sistema de Geração de Energia para Etapa III



Fonte: RAFAELA,2014

Esta etapa, permitiu verificar o funcionamento do sistema operando efetivamente com uma fonte solar fotovoltaica, para tanto utilizou-se um conversor CC/CA, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, a fim de adequar a energia proveniente do painel solar, que apresenta características contínuas, a necessidade do sistema de bombeamento de água, que opera a partir da oferta de energia alternada e trifásica.

## 5.2. Sistema Experimental

Na Figura 17, está apresentado o sistema de bombeamento de água utilizado nesta pesquisa. O qual é constituído basicamente de um reservatório de água, um sistema motor-bomba, uma membrana de microfiltração com área de permeação de 0,5 m<sup>2</sup>, válvulas e manômetros de controle analógicos, sensores de pressão e vazão, sistema de monitoramento e o sistema de geração de energia.

Figura 17: Sistema Experimental de bombeamento de Água



**A) Painéis Solares**



**B) Reservatório**



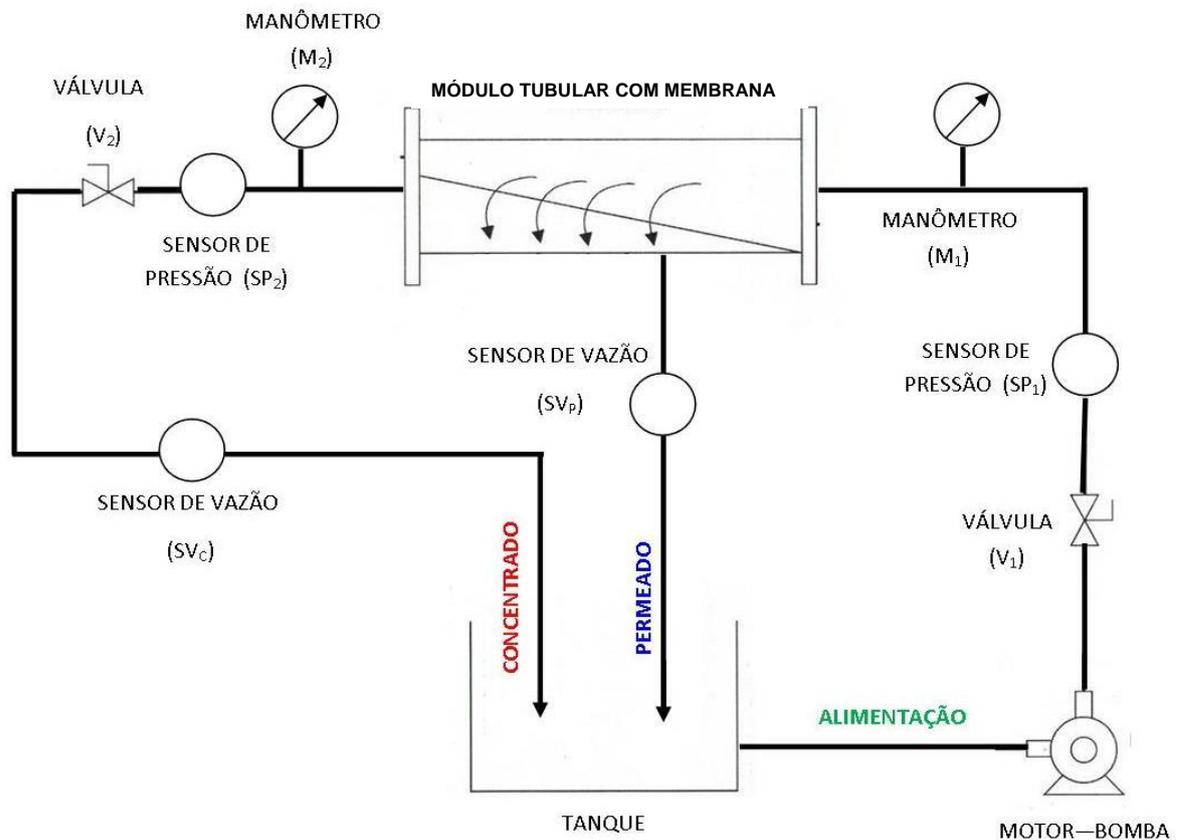
**C) Sistema de Bombeamento**



**D) Membrana de Microfiltração**

O sistema de geração de energia foi operado de dois modos diferentes, conforme descrito nas etapas I e III. Sistema de bombeamento de água esteve configurado de acordo com a Figura 18:

Figura 18: Sistema Experimental de bombeamento de Água



Fonte: RAFAELA,2014

## 5.2.1. Elementos do Sistema de bombeamento de Água

### 5.2.1.1 Painel Solar Fotovoltaico

O gerador fotovoltaico é o elemento responsável pela conversão da radiação solar em eletricidade. A ABNT (NBR 10889/TB-328), define o módulo fotovoltaico como sendo o “menor conjunto ambientalmente providos de células solares interligadas, com o objetivo de gerar energia elétrica em corrente contínua”.

Para o sistema em questão, faz-se uso de 3 painéis solares com potência máxima de 110 W, cujas especificações são descritas na Tabela 2.

Tabela 2: Especificações do Painel Solar

<b>Especificações do Painel Solar Modelo KC 110-1 Kyocera</b>	
<b>Desempenho Elétrico sob Condições de Teste Padrão (Para Irradiação de 1000 W/m<sup>2</sup> e Temperatura de 25°C)</b>	
<b>Máxima Potência (P<sub>MAX</sub>)</b>	110 W
<b>Tensão de Máxima Potência (V<sub>MPP</sub>)</b>	16,5 V
<b>Corrente Máxima Potência (I<sub>MPP</sub>)</b>	6,67 A
<b>Voltagem de Circuito Aberto (V<sub>CA</sub>)</b>	21,1 V
<b>Coefficiente de Temperatura da Tensão</b>	- 1.20x10 <sup>-1</sup> V/°C
<b>Comprimento</b>	1425 mm
<b>Largura</b>	652 mm
<b>Espessura</b>	52 mm
<b>Peso</b>	11,9 Kg

Fonte: Kyocera Solar (2014)

Neste sistema é utilizado um motor de indução trifásico de potência nominal 0.50 HP, o que corresponde a aproximadamente 387,5 W. Considerando o rendimento do gerador fotovoltaico, as taxas de irradiação solar, condições climáticas e utilizando-se um sistema de controle adequado, é possível alimentar este motor utilizando 3 painéis solares fotovoltaicos de modo a fornecer condições necessárias para sua operação de modo eficiente.

### 5.2.1.2 Sistema de Conversão de Energia

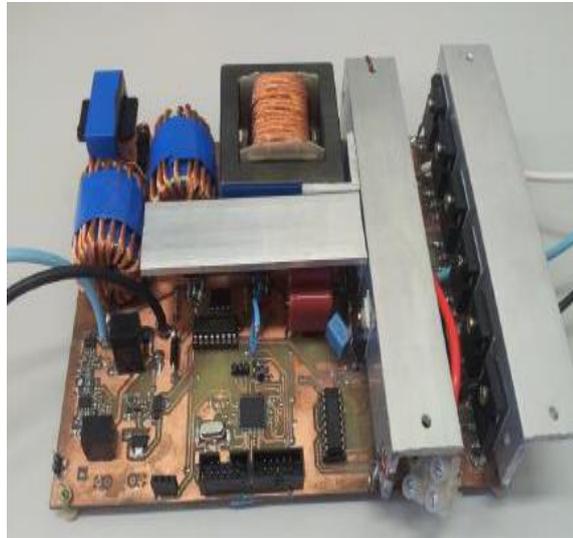
De acordo com o modo de operação do sistema, utilizou-se sistemas distintos para adequação do sinal elétrico disponibilizado e o necessário ao acionamento do sistema motor-bomba.

Para a Etapa I, onde a fonte de energia foi a rede elétrica convencional utilizou-se um inversor de frequência comercial da marca Weg, série CFW-08, o qual é mostrado na Figura 4.2. Sua função é basicamente converter o sinal monofásico alternado da rede elétrica, em sinal trifásico alternado necessário ao acionamento do motor.

Para a Etapa III, onde a fonte de energia foi o painel solar fotovoltaico, utilizou o conversor CC/CA desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, o qual é mostrado na Figura 19, e tem como função adequar o sinal contínuo proveniente do painel solar fotovoltaico, em

sinal trifásico alternado necessário ao acionamento do motor-bomba responsável pelo bombeamento de água do sistema.

Figura 19: Conversor CC-CA



Fonte: Próprio

### 5.2.1.3 Motor-Bomba Centrífuga

No sistema de purificação em estudo, o motor de indução é o dispositivo responsável por transformar a energia elétrica de alimentação do sistema, em energia mecânica capaz de realizar o deslocamento do fluido sob pressão para o interior da membrana de microfiltração.

Para o acionamento da bomba, foi utilizado um motor DANCOR, modelo CAM-W4, trifásico de indução, de 0,50 HP, cujas características são descritas na Tabela 3.

O motor de indução é o tipo de motor elétrico Figura 20 é utilizado, tanto para motorização de sistemas, quanto para processos industriais. Sua principal vantagem é a eliminação do atrito de todos os contatos elétricos deslizantes e uma construção bastante simples, o que possibilitou sua construção a um custo ainda mais baixo, sendo que estas máquinas são fabricadas para grande variedade de aplicações, desde alguns watts até muitos megawatts. Além de ser robusto em termos de operação, proporcionando vantagens econômicas consideráveis tanto na aquisição, quanto na manutenção (CAD, 2000).

Figura 20 : Motor de indução



Tabela 3: Especificações do Motor CA DANCOR

<b>Especificações do Motor</b>	
<b>Modelo</b>	CAM-W4
<b>Carcaça</b>	42
<b>Potência</b>	0,50 HP
<b>Tensão Nominal</b>	220/380V
<b>Pólos</b>	2
<b>Frequência</b>	60 Hz
<b>RPM</b>	3500
<b>Corrente Nominal</b>	1,70/0,98 <sup>a</sup>
<b>Corrente a Vazio</b>	2,50/1,44 <sup>a</sup>
<b>Rendimento</b>	70%
<b>Fator de Potência</b>	de 1,6
<b>Isolamento</b>	B

Fonte: Dancor

#### 5.2.1.4. Membranas de Microfiltração

Para purificação da água, foi utilizado a microfiltração que é usada para separar pequenas partículas insolúveis, bactérias e materiais em suspensão de córregos aquosos. Utiliza membranas porosas com poros na faixa entre 0,1 e 10  $\mu\text{m}$ . As membranas de microfiltração apresentam porosidade variando de 5 a 70%. O fluido passa através de canais tortuosos, enquanto as partículas são barradas na superfície da membrana. A força motriz desse processo é o gradiente de pressão entre os dois lados da membrana. A eficiência de uma membrana de microfiltração depende diretamente da uniformidade do tamanho dos poros, densidade dos poros e a espessura da camada na qual os poros têm diâmetro mínimo (camada ativa).

O sistema é equipado com um módulo de microfiltração da PAM Membranas Seletivas, cujas características são descritas na Tabela 4. O módulo utilizado é composto por membranas poliméricas de polieterimida (PEI) apresentando geometria cilíndrica do tipo fibra oca e camada seletiva externa.

Tabela 4: Especificações da Membrana de Microfiltração

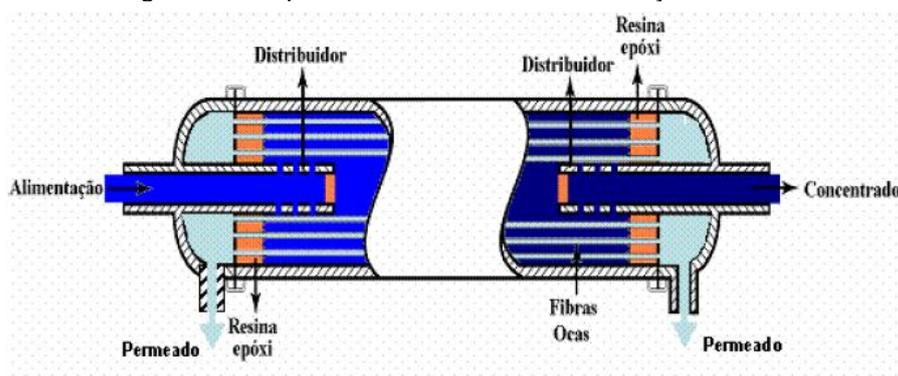
<b>Propriedades do Módulo</b>	
<b>Processo</b>	Microfiltração
<b>Comprimento Útil (mm)</b>	420
<b>Diâmetro Externo (mm)</b>	50
<b>Empacotamento (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)</b>	800
<b>Área de Filtração (m<sup>2</sup>)</b>	0,5
<b>Material de Construção</b>	PVC
<b>Conexão</b>	BSP Fêmea de ½”
<b>Sentido de Filtração</b>	Fora para dentro da fibra
<b>Pressurização</b>	Carcaça
<b>Pressão de Operação</b>	Depende do fluido
<b>Pressão Máxima de Operação (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	4,0
<b>Temperatura Máxima de Operação (°C)</b>	55

Fonte: PAM Membranas Seletivas

A água de alimentação, a ser tratada (Purificada) escoa pela carcaça do módulo, enquanto o permeado microfiltrado, escoa pelo interior das fibras e a filtração ocorre de fora para dentro das fibras, conforme pode ser observado no esquema abaixo. A pressão de operação do sistema, deve ser entre 0 e 2,0 kgf/cm<sup>2</sup>, conforme recomendação do fabricante, no entanto o módulo suporta pressões de até 4,0 kgf/cm<sup>2</sup>. O diâmetro externo das fibras varia entre 0,9 e 1,0 nm e o tamanho médio dos poros na superfície externa das fibras é de 0,4µm.

O esquema do módulo, bem como a correta disposição dos fluxos, é mostrado na figura 21.

Figura 21: Esquema do Módulo de Microfiltração



Fonte: PAM Membranas Seletivas

### 5.2.2. Sistema de Aquisição de Dados

Para a aquisição dos dados experimentais do sistema de geração de energia e do sistema de bombeamento de água foi utilizado um FieldLogger, da marca Novus, mostrado na Figura 22.

Figura 22 : Sistema de Aquisição de Dados (FieldLogger)



Fonte: Própria

O FieldLogger consiste em um módulo de leitura e registro de variáveis analógicas e digitais, com grande resolução e velocidade. Dispõe de oito entradas analógicas configuráveis por software para sinais de tensão, corrente, termopares, entre outros, duas entradas a relé e oito portas digitais individualmente configuráveis

como entrada ou saída. Além de 128 canais para cálculo de grandezas das variáveis medidas.

É possível realizar a configuração e coleta de dados a partir de uma interface remota (computador, pendrive, etc), como também localmente a partir da IHM (Interface Homem Máquina) do equipamento, o qual dispõe de um display que é acoplado ao dispositivo. O software configurador do FieldLogger, é de simples manipulação, permitindo alterações nas configurações do sistema de modo rápido, via ethernet, USB ou RS485, além de monitoramento on-line, coleta de registro e exportação em diversos formatos.

Os sensores utilizados para aquisição de dados são:

- Sensores de Pressão: responsáveis pelo monitoramento das pressões de entrada ( $SP_1$ ) e de saída ( $SP_2$ ) da membrana;
- Sensores de Vazão: responsáveis pelo monitoramento das vazões do permeado ( $SV_P$ ) e do concentrado ( $SV_C$ );
- Sensores de Voltagem: responsáveis pelo monitoramento dos sinais elétricos do sistema (tensão e corrente do motor).

Além dos sensores digitais, utilizamos manômetros analógicos, responsáveis pelo monitoramento da pressão de entrada ( $M_1$ ) e de saída ( $M_2$ ) da membrana.

Para obtenção da vazão de alimentação do sistema, utilizou o recurso do FieldLogger que permite o uso de operações matemáticas para cálculo da referida variável.

### 5.3. Procedimento Experimental

O sistema de bombeamento de água, foi avaliado utilizando água com presença de sólidos suspensos e elevada cor e turbidez, proveniente de uma cisterna que contém água de chuva, proveniente da captação do telhado do Labdes.

A capacidade de produção do permeado e do concentrado, foi obtida por meio dos sensores de vazão presentes no sistema. O sistema de aquisição de dados forneceu, ainda, valores de pressão na alimentação e na saída do módulo com membrana e níveis de tensão e corrente no motor através dos sensores de pressão e de voltagem, respectivamente.

A amostragem de dados foi realizada na faixa de 1 a 15 segundos, sendo estes dados armazenados no FieldLogger e posteriormente coletados via interface USB e armazenados em um computador.

Para todos os ensaios de caracterização do sistema, o ajuste da pressão de operação foi realizado através da válvula ( $V_2$ ), estando sempre posicionada de modo a oferecer a pressão necessária para geração do permeado microfiltrado. Para o ajuste de potência e velocidade de rotação do motor, na Etapa I, utilizou-se os recursos de programação do próprio inversor.

### 5.3.1 Parâmetros calculados

### 5.3.2 Potência

O cálculo da potência gerada pelos painéis fotovoltaicos foi feito de acordo com a Equação 5.1:

$$P = V \times I \quad (5.1)$$

Em que:  $P$  é a potência (W);  $V$ , tensão (V) e  $I$ , corrente (A).

### 5.3.3 Vazão

A vazão é igual ao volume de água bombeado dividido pelo número de horas de funcionamento do sistema, de acordo com a Equação 5.2:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad (5.2)$$

Onde:  $Q$  é a vazão (L/h);  $v$ , volume de água (L); e  $t$ , tempo (h).

### 5.3.4 Energia disponível e energia consumida

As transformações da irradiação total em energia disponível e da potência em energia consumida foram feitas pelas Equações 5.3, 5.4 e 5.5, respectivamente:

$$E_d = R_t \times t \quad (5.3)$$

$$E_c = P \times t \quad (5.4)$$

Em que:

$$R_t = R_s \times A \quad (5.5)$$

$E_d$  é a energia disponível (Wh);  $E_c$ , energia consumida, (Wh);  $R_t$ , irradiação total (W);  $t$ , tempo (h);  $P$ , potência (W);  $R_s$ , irradiação solar global ( $Wm^{-2}$ ), e  $A$ , área útil do módulo ( $m^2$ ).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos e foram distribuídos em 3 etapas:

- Caracterização do sistema de bombeamento de água;
- Estudo da potencialidade de energia solar na região de Campina Grande;
- Avaliação do desempenho do sistema de bombeamento de água acionado por energia solar fotovoltaica sem acumuladores eletrolíticos;

### 6.1 Caracterização do Sistema de bombeamento de Água com energia convencional

A água de alimentação (água de cisterna proveniente de água de chuva captada do telhado LABDES) utilizada para o ensaio em questão apresenta as características apresentadas na Tabela 5:

Tabela 5: Características da Água de Alimentação

<b>Alimentação</b>	
<b>Turbidez (NTU)</b>	4,76
<b>Condutividade (<math>\mu</math>S)</b>	1120
<b>Cor (UC)</b>	20

O sistema foi operado com uma variação de pressão de 0,48 kgf/cm<sup>2</sup> à 1,93 kgf/cm<sup>2</sup> e realizada leitura de vazão do permeado em função da pressão de operação.

O sistema foi avaliado em sua capacidade de remoção de turbidez e cor em diferentes pressões de operação, os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6: Remoção de turbidez do sistema de bombeamento de água

Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Turbidez		
	Alimentação (NTU)	Permeado (NTU)	Remoção (%)
0,5	4,76	0,18	96,1
1,0	4,76	0,20	95,7
1,5	4,76	0,23	95,1
2,0	4,76	0,26	94,3

A Tabela 6 mostra o percentual de remoção da turbidez presente no meio aquoso antes e após o processo de purificação com a membrana de microfiltração. Observa-se que há uma tendência de diminuição da capacidade de remoção com o aumento pressão de operação. Tendo a pressão de 0,5 Kgf/cm<sup>2</sup> com maior remoção. Devido a membrana ser de microfiltração (poros relativamente grandes em relação as outras membranas), com o aumento da pressão, há uma tendência de passar soluções coloidais pelos poros, aumentando a turbidez e diminuindo a eficiência do sistema, por este motivo é recomendado trabalhar com a membrana de microfiltração em baixa pressão.

A turbidez do permeado e da alimentação encontram-se dentro dos padrões de potabilidade exigidos na Portaria 2.014/11 do Ministério da Saúde, que é de até 5 NTU, já a cor da alimentação está acima do aceitável que é de até 15 UC.

Tabela 7: Remoção de cor do sistema de bombeamento de água

Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Cor		
	Alimentação (UC)	Permeado (UC)	Remoção (%)
0,5	20	0	100
1,0	20	0	100
1,5	20	0	100
2,0	20	0	100

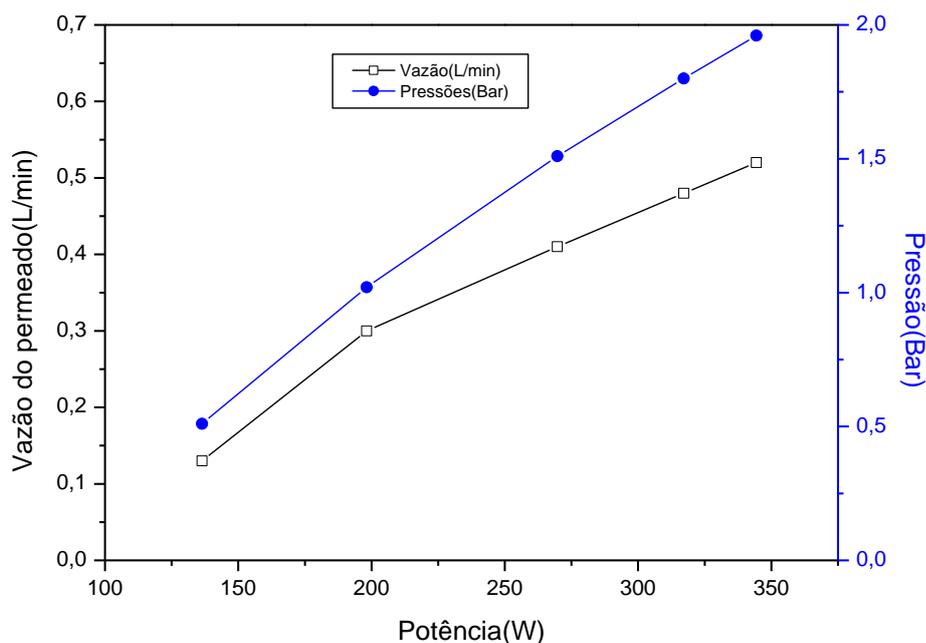
Os resultados apresentados na Tabela 7 demonstram que a membrana de microfiltração é capaz de remover 100% da cor, independentemente da pressão de

operação do sistema. Esse parâmetro é bastante importante, considerando que a presença de cor está associada a presença de contaminantes orgânicos ou inorgânicos, os quais correspondem a presença de contaminantes que afetariam a qualidade da água para o consumo humano.

A etapa de caracterização do sistema, quanto ao seu funcionamento, operou com variação da potência elétrica, utilizando energia convencional, que ocorreu com uma potência mínima de entrada de 136,4 W (para pressão de 0,5 Kgf/cm<sup>2</sup>), o que correspondeu aproximadamente 1/3 da potência nominal do motor que é de 387,5 W.

O sistema foi avaliado sob diferentes condições operacionais. Inicialmente variou-se a potência entregue a carga, a fim de observar o desempenho do sistema nessas condições. Para tanto estabeleceu-se as seguintes pressões de operação:  $P_1 = 0,5 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $P_2 = 1,0 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $P_3 = 1,5 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $P_4 = 2,0 \text{ kgf/cm}^2$ , as quais foram controladas pelo ajuste da válvula de saída da membrana ( $V_2$ ) e verificou-se, conforme é apresentado na Figura 5.1, o comportamento da vazão do permeado em função da potência entregue a carga (sistema motor-bomba).

Figura 23: Variação da vazão do permeado e da Pressão em função da Potência



A partir dos resultados obtidos é possível observar que a pressão mínima de operação é conseguida com uma potência de entrada de 136,4 W e disponibiliza o permeado com uma vazão média de 7,8 L/h ou 0,13 L/min.

Com o aumento da pressão de operação verifica-se que as curvas de vazão de permeado tornam-se cada vez mais semelhantes e o sistema atinge sua produção máxima na pressão de 2,0 kgf/cm<sup>2</sup>, o que corresponde a uma vazão média de 31,20 L/h ou 0,52 L/min.

Aplicada, uma potência de entrada mais elevada e submetendo o sistema a uma pressão de operação mais alta é possível observar que a vazão do permeado tende a aumentar, dessa forma se tem para a pressão  $P_1$ , vazão máxima de 7,8 L/h, para  $P_2$ , vazão máxima em torno de 18,0 L/h, para  $P_3$ , vazão máxima de 24,6 L/h e para  $P_4$ , vazão máxima em torno de 31,2 L/h.

Uma observação importante quanto ao funcionamento do sistema operando com variação da potência de entrada é que a pressão máxima de operação,  $P_4 = 2$  kgf/cm<sup>2</sup>, foi conseguida para valores de potência elétrica na faixa de 344,4 W, que corresponde ao nível de tensão muito próxima da condição nominal do motor que é de 387,5 W.

## **6.2 Estudo da Oferta de Energia Solar da Região de Campina Grande**

A coleta de dados referente ao potencial solarimétrico utilizados nesta etapa da pesquisa, foi realizada no Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM) da Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica (UAEE) e definem o perfil de irradiação solar da região de Campina Grande – PB.

A coleta de dados foi feita diariamente, iniciando-se por volta das 4:30 horas e estendendo-se até às 18:30 horas, o que corresponde a um período médio de coleta de 14 horas diárias, com intervalo de um segundo entre leituras.

Os dados de irradiação solar utilizados nesta pesquisa referem-se ao período de um ano, especificamente de outubro/2013 à setembro/2014, para a região de Campina Grande – PB.

Dessa forma, optou-se por avaliar a funcionalidade do sistema a partir da oferta de energia solar média ao longo dos meses, e que forneceu dados mais consistentes de produção ao longo do ano. Para tanto, foram gerados os gráficos do perfil de irradiância solar para o melhor e o pior dia de cada mês (Anexos), gráficos de irradiância solar média para cada um dos meses (Anexos) e gráficos de distribuição em horas de irradiância solar média mensal (Anexos).

De modo a ilustrar a distribuição de energia solar ao longo do dia demonstrados nas Figuras 24, 25, 26 e 27, as quais apresentam o perfil de irradiância solar para alguns dos dias coletados.

Média

Figura 24: Perfil de Irradiância Diária para o dia 01 de maio de 2014

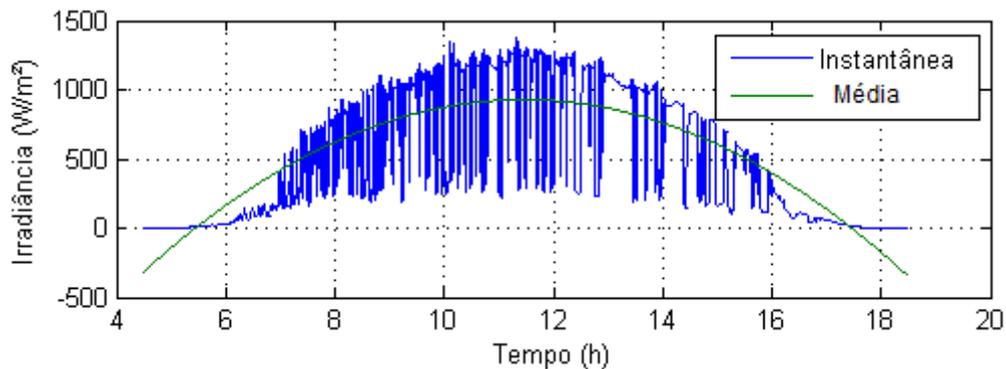


Figura 25: Perfil de Irradiância Diária para o dia 30 de Janeiro de 2014

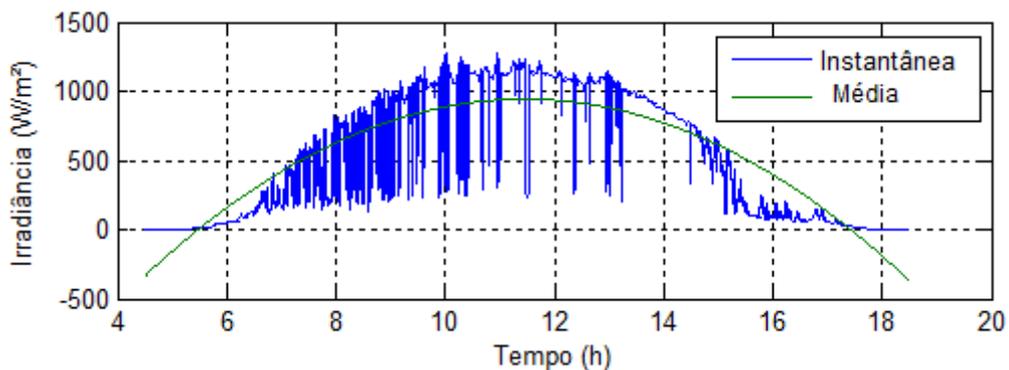


Figura 26: Perfil de Irradiância Diária para o dia 14 de Março de 2014

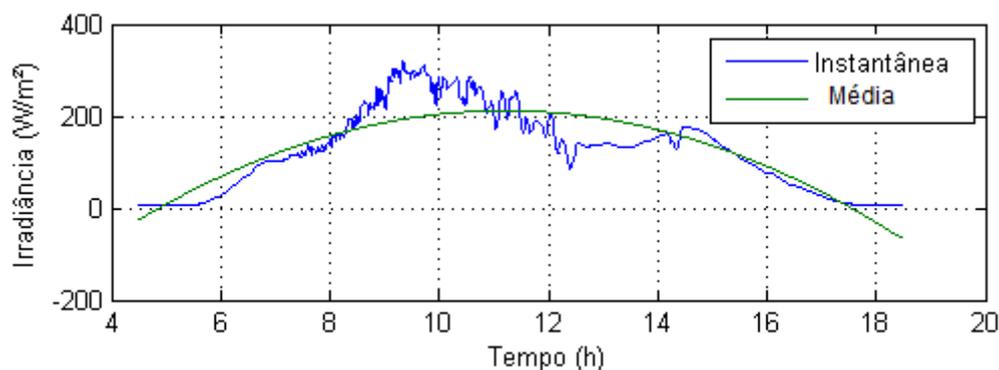
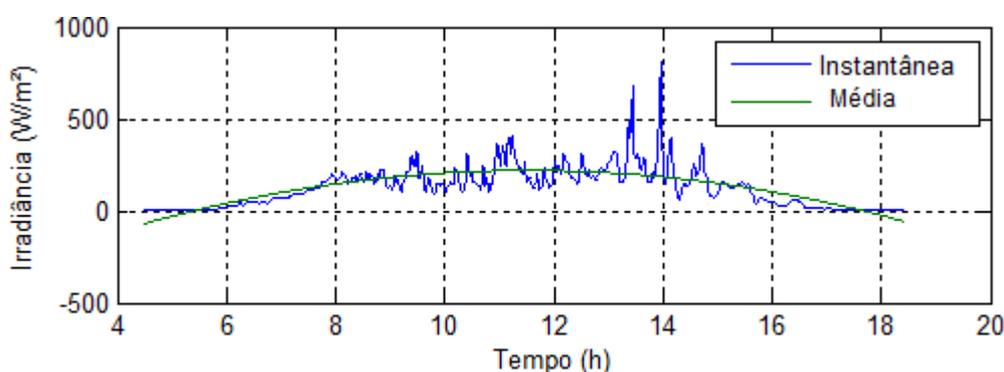


Figura 27: Perfil de Irradiância Diária para o dia 26 de Julho de 2014



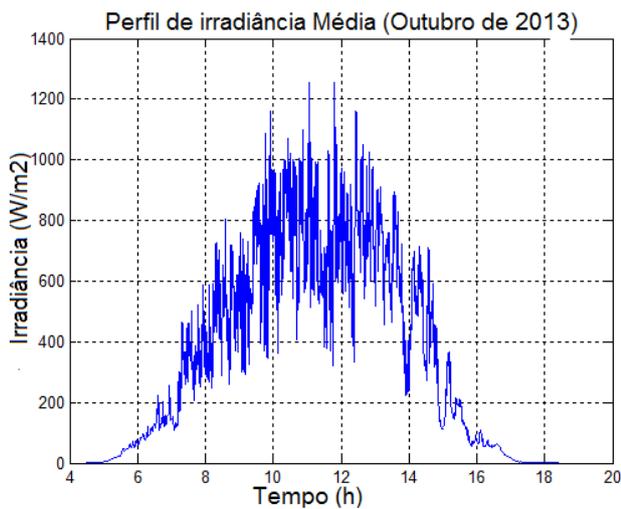
A partir dos gráficos apresentados é possível observar nas Figuras 24 e 25 uma distribuição de energia solar desejável, com altos valores de irradiância, o que corresponde a níveis de energia aceitáveis para uma operação eficiente de sistemas acionado por energia solar fotovoltaica sem baterias. De forma contrária nas Figuras 26 e 27 tem-se uma distribuição de energia solar pouco eficiente, haja vista os baixos valores de irradiância disponibilizados ao longo do dia, o que não oferece condições mínimas para a operação o sistema.

Nas Figura 28 (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i), (j), (k) e (l) são apresentados os perfis de irradiação solar média dos meses de outubro/2013 à setembro/2014.

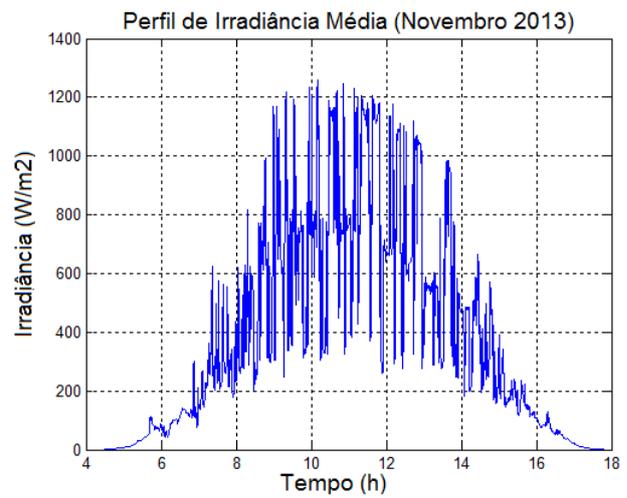
A avaliação da distribuição de energia solar em meses, é eficiente na medida em que é possível relacionar os resultados coletados em função da estação climática, das condições climatológicas ao longo do ano, ou seja, estabelecer um critério comparativo para o universo de dados obtidos.

Os perfis de irradiação solar média mensal apresentados nas Figuras 28 permitem identificar, por exemplo, os meses que apresentaram uma distribuição mais regular dos níveis de energia (Janeiro e Março), meses com oferta de energia mais reduzida (Junho e Julho), características essas que estão fortemente relacionadas as estações do ano, ou seja, com o período climático em que ocorrem.

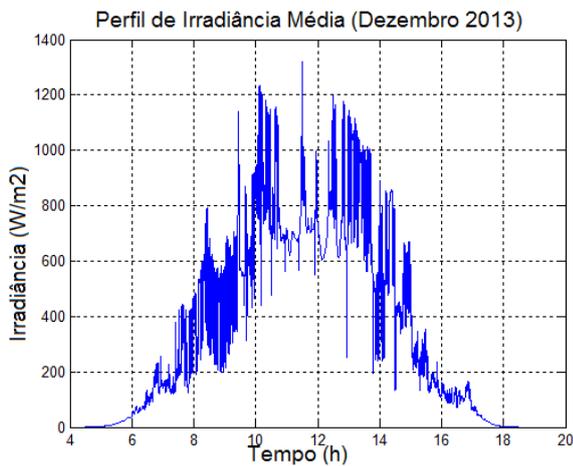
Figura 28: Perfil de Irradiância Solar Média dos meses do ano



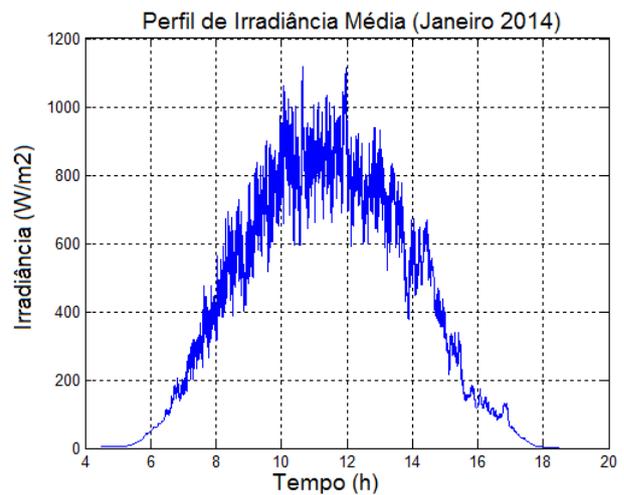
(a)



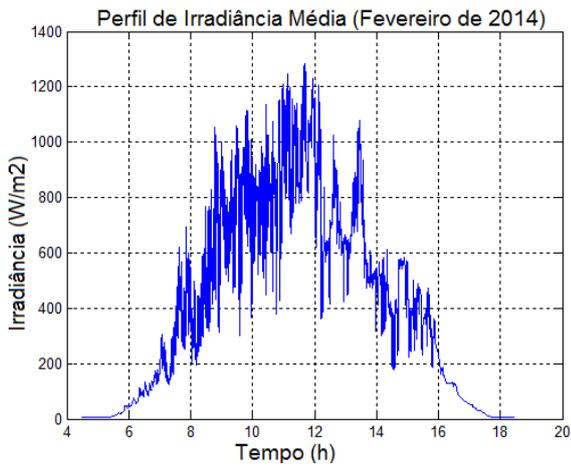
(b)



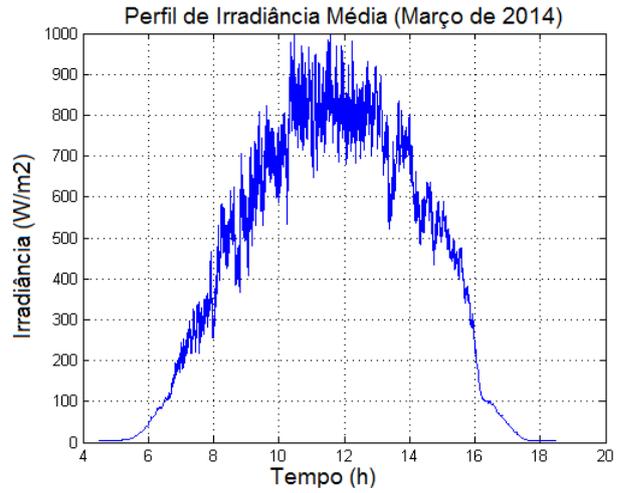
(c)



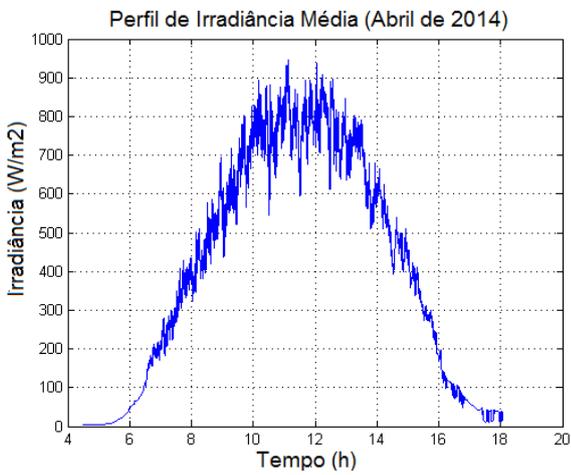
(d)



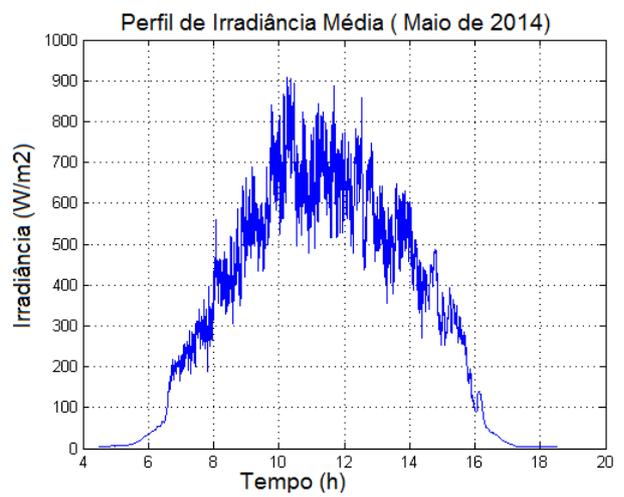
(e)



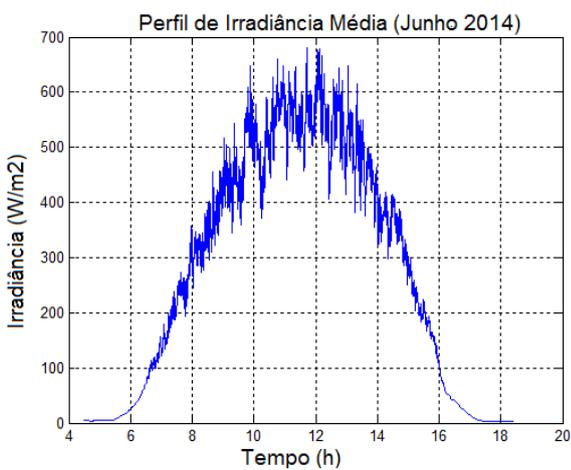
(f)



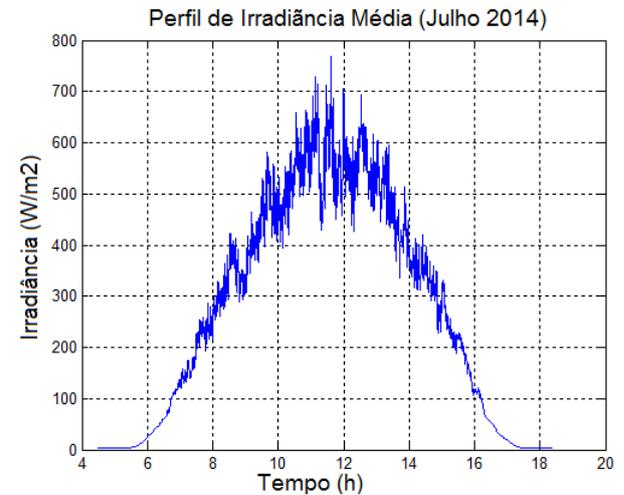
(g)



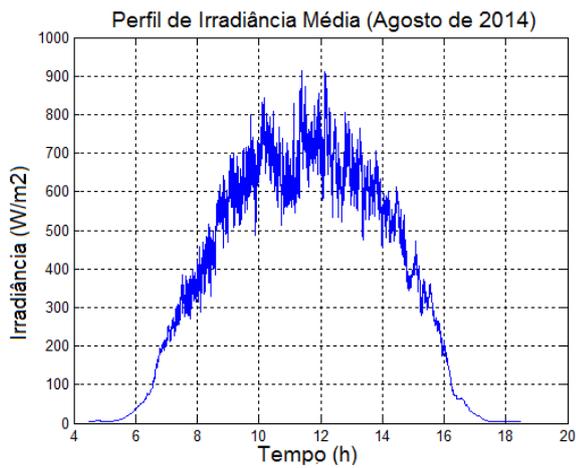
(h)



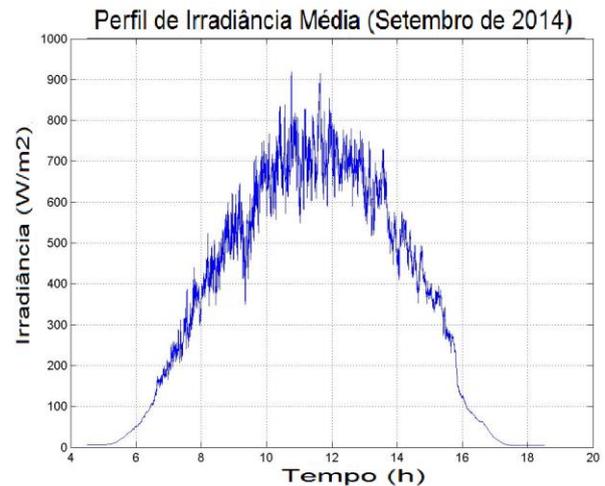
(i)



(j)



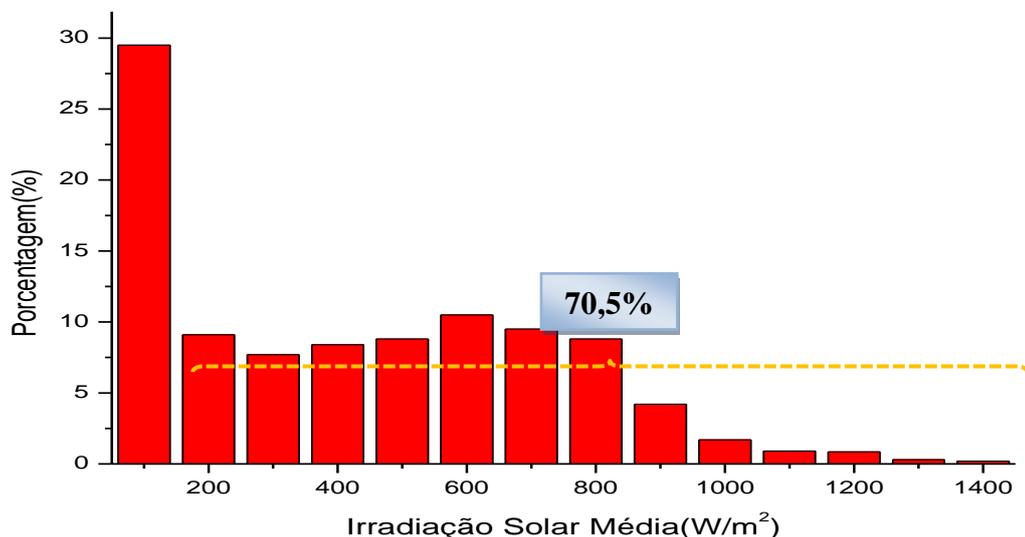
(k)



(l)

Para um estudo mais detalhado da disponibilidade de energia solar ofertada, foram utilizados a distribuição em horas de irradiância média mensal, para níveis médios de irradiância solar na faixa de 100 a 1.400 W/m<sup>2</sup> em intervalos regulares de 100 W/m<sup>2</sup>. Na Figura 29 se tem essa distribuição em percentual de horas diárias ao longo do ano.

Figura 29: Percentual de Irradiância Solar Média durante o ano



A partir dos resultados apresentados na Figura 29, é possível observar que apesar do maior percentual de oferta de energia solar disponibilizada concentrar-se na faixa de 100 W/m<sup>2</sup>, o que corresponde a praticamente 29,5% de toda a energia gerada, fazendo-se a soma cumulativa destes percentuais é possível verificar que a distribuição de energia para as faixas de irradiância solar entre 200 e 1400 W/m<sup>2</sup> representam mais de 70,5% da irradiância total ofertada. Este é um dado bastante

relevante considerando as especificações do sistema de geração de energia solar fotovoltaica proposto para o acionamento do sistema de bombeamento de água em questão, o qual utilizando apenas um painel solar fotovoltaico necessita de uma oferta mínima de irradiância solar de 200 W/m<sup>2</sup>.

- Distribuição em Horas da Irradiância Solar

A distribuição em horas da irradiância solar é apresentada na Tabela 8 e considera a média mensal dos meses de outubro /2013 a setembro/2014 para os níveis médios de irradiância solar na faixa de 100 a 1.400 W/m<sup>2</sup> em intervalos regulares de 100 W/m<sup>2</sup>.

Tabela 8: Horas de irradiação solar média mensal

G* (W/m <sup>2</sup> )	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
<b>OUT</b>	4,521	1,492	0,600	1,088	0,842	1,546	1,042	1,192	0,783	0,621	0,133	0,050	0,013	-
<b>NOV</b>	3,592	1,783	1,533	1,129	0,775	0,771	0,946	1,154	0,221	0,258	0,388	0,704	0,083	-
<b>DEZ</b>	3,850	2,205	1,076	0,467	0,714	1,123	1,752	1,256	0,608	0,343	0,329	0,263	0,010	0,015
<b>JAN</b>	3,753	1,790	0,757	0,810	0,876	1,083	1,252	1,617	1,342	0,590	0,123	0,004	-	-
<b>FEV</b>	3,903	1,372	0,864	1,103	1,024	1,244	1,105	0,756	1,124	0,678	0,472	0,277	0,054	-
<b>MAR</b>	4,048	0,874	0,819	0,671	1,036	1,554	1,129	2,044	1,444	0,343	-	-	-	-
<b>ABR</b>	3,537	1,046	0,981	1,021	1,192	1,168	1,175	2,301	1,104	0,050	-	-	-	-
<b>MAI</b>	4,439	0,685	1,346	1,199	1,605	1,897	1,658	0,949	0,211	0,003	-	-	-	0,034
<b>JUN</b>	4,600	1,258	1,267	1,763	2,050	2,500	0,504	-	-	-	-	-	-	-
<b>JUL</b>	4,438	1,342	1,521	1,917	1,783	2,158	0,721	0,029	-	-	-	-	-	-
<b>AGO</b>	4,337	0,626	1,357	0,816	1,836	2,501	1,345	0,189	0,008	-	-	-	-	-
<b>SET</b>	4,432	0,872	0,899	1,250	1,434	1,435	2,110	1,436	0,245	-	-	-	-	-

\* Faixa Média de Irradiância Solar

Essa distribuição horária em níveis médio de irradiância solar é útil para a estimativa de produção de energia solar fotovoltaica gerada (potência elétrica), já

que a potência gerada pelo painel está diretamente ligada a irradiância solar disponibilizada.

### **6.3 Desempenho do Sistema de Bombeamento de Água Acionado por Energia Solar Fotovoltaica sem baterias**

Os resultados apresentados, correspondem a operação do sistema de bombeamento de água sem baterias, utilizando como fonte de energia solar fotovoltaica. O estudo ocorreu durante 5 dias de funcionamento do sistema, os quais apresentam dados bastante representativos do sistema e serão identificados por:

- Dia 1: 12 de Agosto de 2014;
- Dia 2: 13 de Agosto de 2014;
- Dia 3: 14 de Agosto de 2014.
- Dia 4: 15 de Agosto de 2014.
- Dia 5: 18 de Agosto de 2014.

A operação do sistema de bombeamento de água, em todos os dias de coleta de dados, foi realizada entre oito horas da manhã e dezessete horas da tarde, ocasionando um período médio de coleta de 9 horas diárias. Considerando o quantitativo de dados obtidos. Dessa forma, a análise dos dados será feita mediante obtenção de curvas de operação do sistema, as quais refletem o comportamento do sistema ao longo do dia e apresenta dados significativos do seu funcionamento.

Para a análise de funcionamento do sistema submetido a geração solar fotovoltaica, utilizou-se os gráficos de potência elétrica disponibilizada pelo painel solar, pressão de operação do sistema e produção de permeado em função do tempo.

Na Figura 30 se tem o perfil de irradiação solar para o dia 1, o qual corresponde um dia com disponibilidade de irradiância solar, permitindo o funcionamento do sistema ao longo de todo o dia, com uma disponibilidade de potência elétrica bastante eficiente, conforme pode ser observado na Figura 30.

Figura 30: Perfil de Irradiação Solar em função do tempo (dia 01)

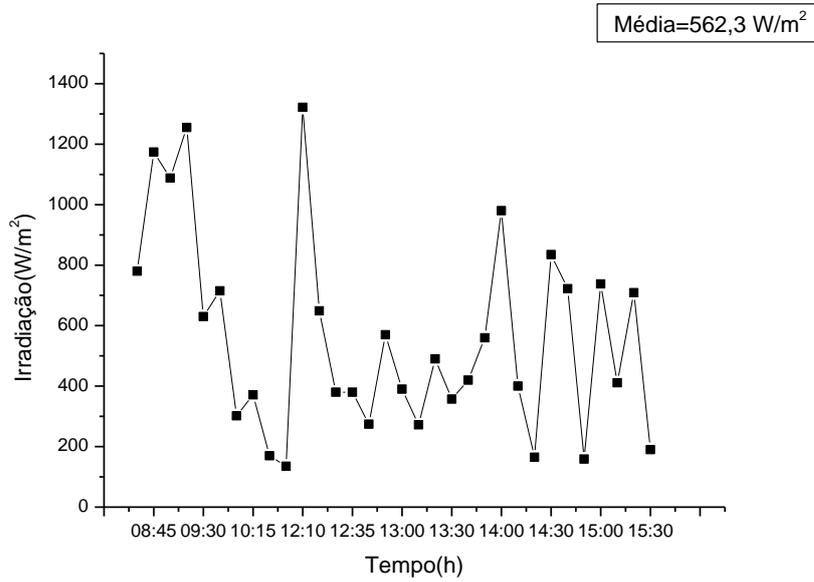
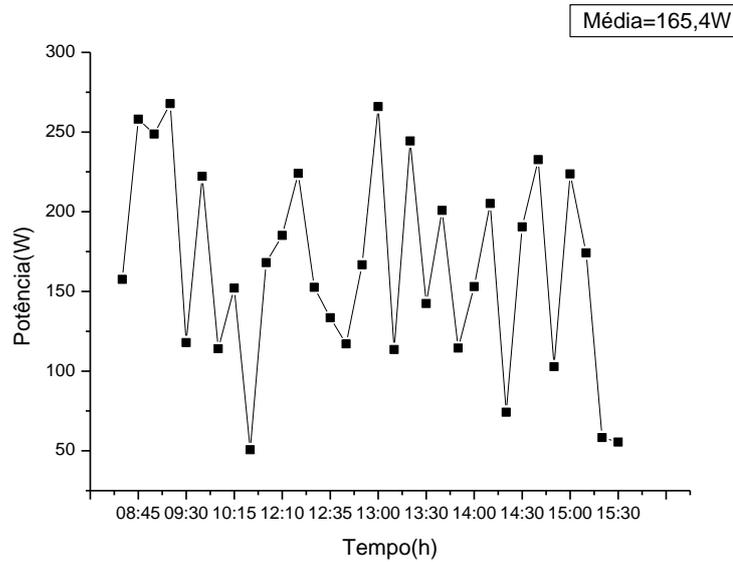


Figura 31: Potência elétrica disponibilizada pelo painel solar fotovoltaico em função do tempo (dia 01)



As Figuras 32 e 33 apresentam os resultados obtidos para a variações das pressões de operação do sistema em função do tempo e produção de permeado em função da potência para o dia 1.

Figura 32: Variação da pressão de operação do sistema em função do tempo (dia 01)

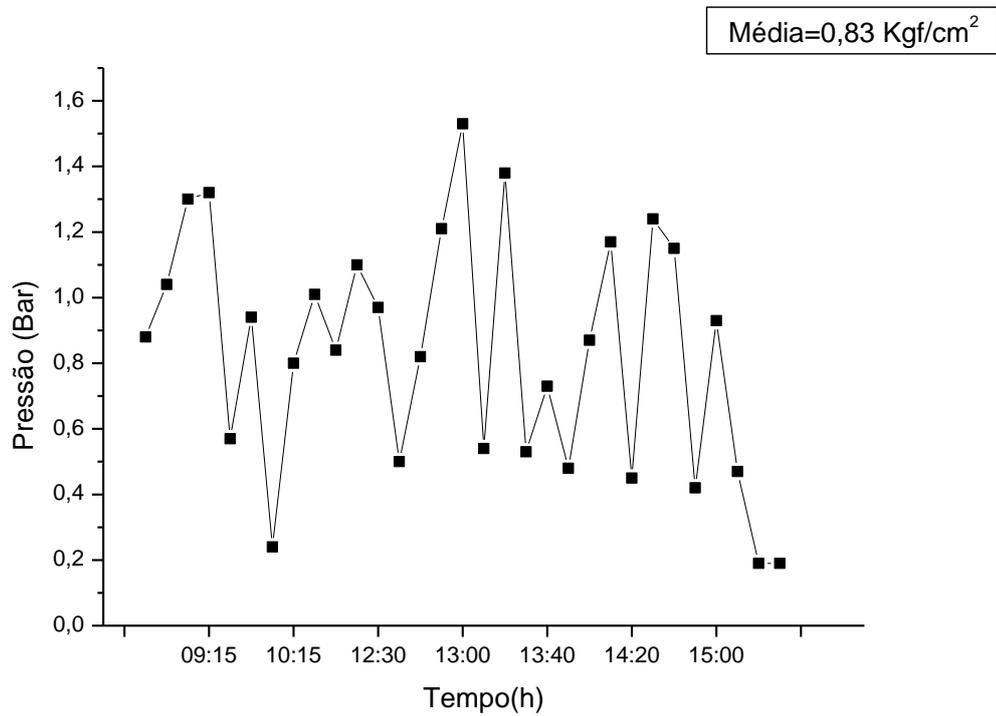
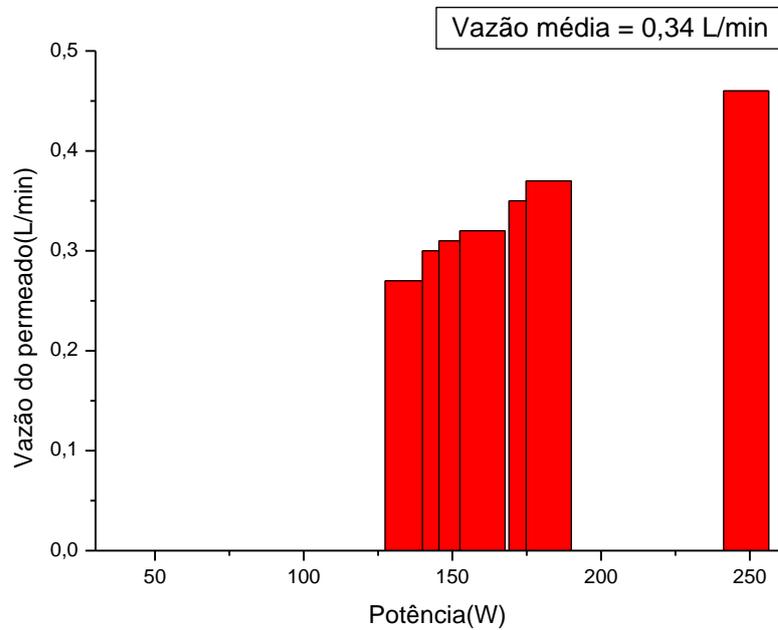


Figura 33: Variação da vazão do permeado em função da Potência do sistema (dia 01)



A análise da potência elétrica produzida pelo painel solar fotovoltaico reporta a oferta de irradiação solar disponibilizada ao longo do dia, mostrada na Figura 30, e

a capacidade do painel em converter a taxa de irradiação solar recebida, em energia elétrica necessária ao acionamento do sistema. A partir dos resultados apresentados, é possível observar que este foi um dia de produção de energia bastante eficiente, considerando que a média de potência elétrica gerada pelo painel ao longo do dia foi de 165,4 W, o que ofereceu condições suficientes para o acionamento do sistema e conseqüentemente o estabelecimento de uma pressão de operação suficiente para a geração de permeado conforme mostra a Figura 31.

É necessário observar que nesta etapa, a energia gerada pelos painéis passa pelo conversor CC-CA, o qual adequa o sinal disponibilizado a necessidade do sistema motor-bomba, dessa forma o sistema de bombeamento não recebe o sinal elétrico com todas as variações ocorridas na geração. Este fato justifica o estabelecimento da pressão de operação do sistema, que apesar de sofrer algumas variáveis, mantém-se na maior parte do tempo na faixa de 0,8 kgf/cm<sup>2</sup> a 0,9 kgf/cm<sup>2</sup> apresentando uma média de 0,83 kgf/cm<sup>2</sup>, conforme apresenta Figura 32.

A análise conjunta dos resultados apresentados nas Figuras 32 e 33, nos permite observar que todas as variações de pressão ou potência sofridas pelo sistema são refletidas na geração de permeado, de modo que, todas as quedas de pressão/potência do sistema, apesar de rápidas, ocasionam conseqüente queda na geração de permeado produzido.

Quanto ao quantitativo de permeado produzido, é possível observar que este conseguiu uma produção média de 0,34 L/min ou 20,4 L/h.

O início da coleta de dados para o dia 1, teve início exatamente às 8 horas e 30 minutos estendendo-se até às 15 horas e 32 minutos, portanto a produção de água ocorreu ao longo de 7 horas, o que correspondeu a uma produção diária de 142,8 L/dia.

Para o dia 2 o perfil de irradiação solar é apresentado na Figura 34 e assim como observado para o dia 1, apresentou uma disponibilidade de energia solar bastante eficiente para o funcionamento ao longo do dia em questão. Comparando o perfil de irradiação solar e a produção de potência elétrica gerada no painel solar fotovoltaico, podemos observar a relação entre oferta de energia solar Figura 34, e a geração de potência elétrica Figura 35, ao longo do período de funcionamento do sistema.

Figura 34: Perfil de Irradiação Solar em função do tempo (dia 02)

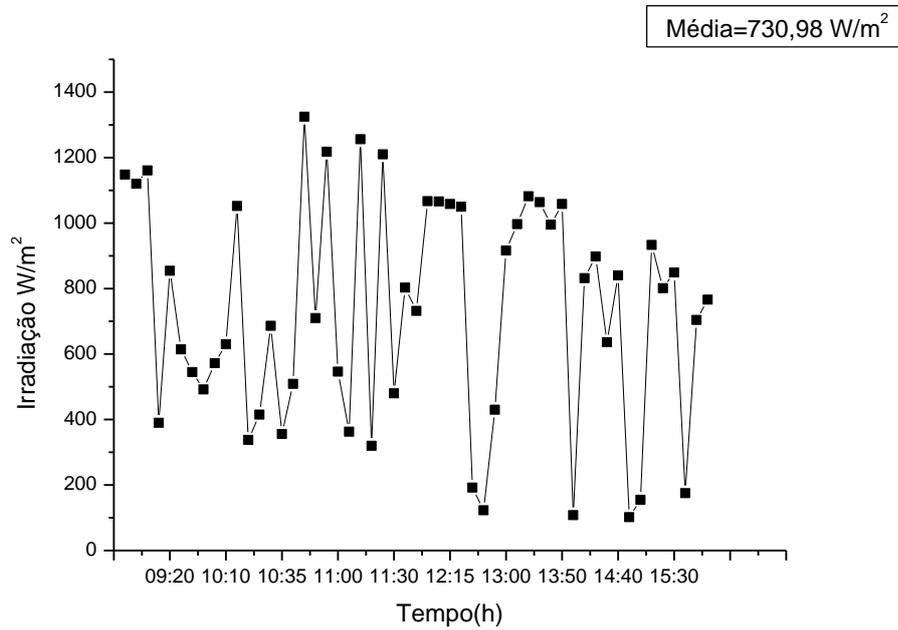
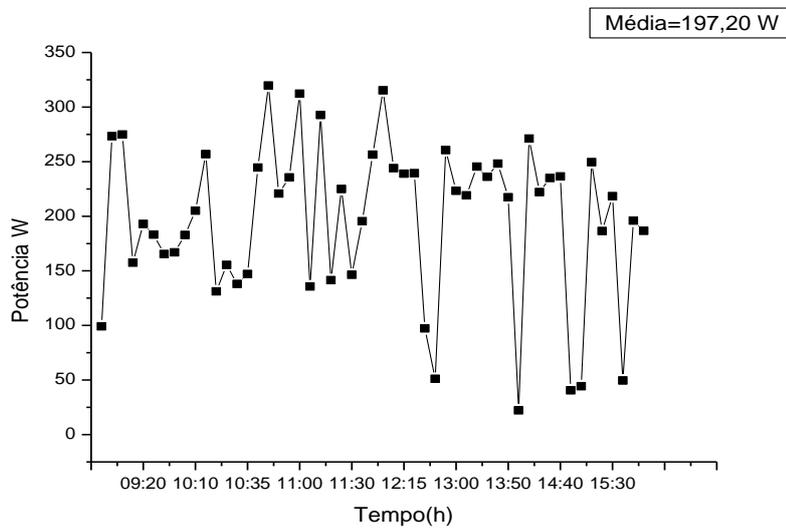


Figura 35: Potência elétrica disponibilizada pelo painel solar fotovoltaico em função do tempo(dia 02)



Nas Figuras 36 e 37 apresentam os resultados obtidos para a variação da pressão de operação do sistema em função do tempo e produção de permeado em função da potência para o dia 2.

Figura 36: Variação da pressão de operação do sistema em função do tempo (dia 02)

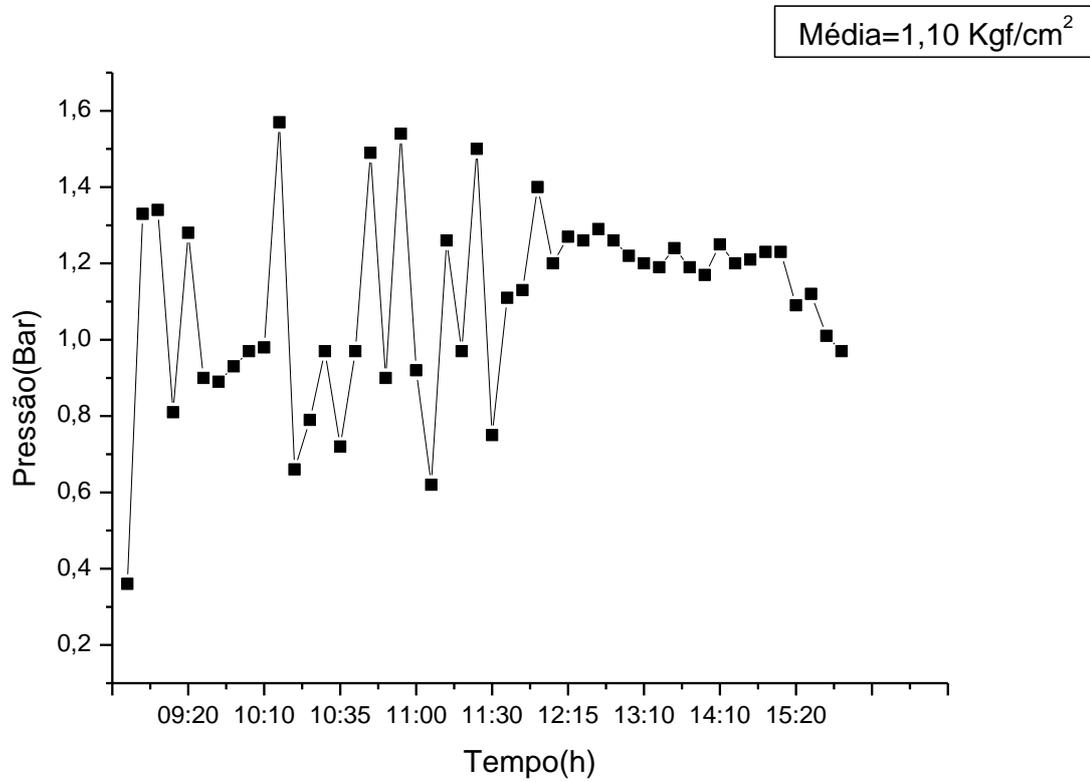
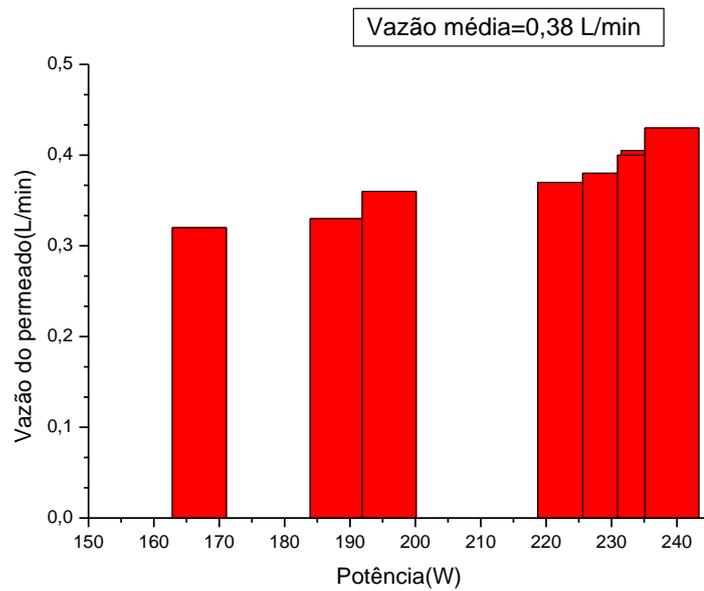


Figura 37: Variação da vazão do permeado em função da Potência do sistema (dia 02)



A partir dos resultados apresentados na Figura 35, é possível observar que o sistema de geração solar fotovoltaica realizou a conversão de energia solar – elétrica de forma bastante eficiente, gerando uma potência média ao longo do dia de 197,20 W, o qual permitiu ao sistema sua operação com um nível de pressão suficiente para a geração de permeado.

Durante a operação do sistema para o dia em questão observa-se que as variações de pressão foram mais frequentes e por períodos mais longos, o que ocasiona uma pressão média ao longo do dia de 1,10 kgf/cm<sup>2</sup>.

As variações de pressão de operação sofridas ao longo do dia pelo sistema foram, evidentemente, refletidas na produção de permeado gerado o qual apresentou uma vazão média de 0,38 L/min ou 22,8 L/h.

Comparando com o resultado de RAFAELA (2014), levando em consideração o melhor dia para os dois trabalhos, enquanto a média deste trabalho foi uma vazão de 0,38L/min (dia 2), o mesmo sistema mudando apenas a bomba que no trabalho de RAFAELA (2014) é uma bomba de alta pressão, produziu 0,69L/min (dia 1).

O início da coleta de dados para o dia 2, teve início exatamente às 8 horas e 34 minutos estendendo-se até às 16 horas e 33 minutos, portanto a produção de água ocorreu ao longo de 8 horas, o que correspondeu a uma produção diária de 182,4 L/dia.

Em função dos resultados apresentados, observou-se que as variações de pressões mais acentuadas e por períodos mais longos ocasionaram uma produção de permeado maior quanto comparado ao dia 1.

Analisou-se o funcionamento do sistema para o dia 3, o qual tem o seu perfil de irradiação solar ao longo do dia apresentado na Figura 38. Conforme ilustra o gráfico apresentado podemos observar que este foi um dia com disponibilidade de energia solar muito próxima ao dia 2, o que ocasionou a operação do sistema bastante semelhante ao dia 2.

A disponibilidade de irradiação solar, reflete diretamente na produção de energia elétrica oferecida ao sistema, pelo painel solar fotovoltaico, conforme podemos observar na Figura 39, a qual apresenta a potência elétrica gerado pelo painel.

Figura 38: Perfil de Irradiação Solar em função do tempo (dia 03)

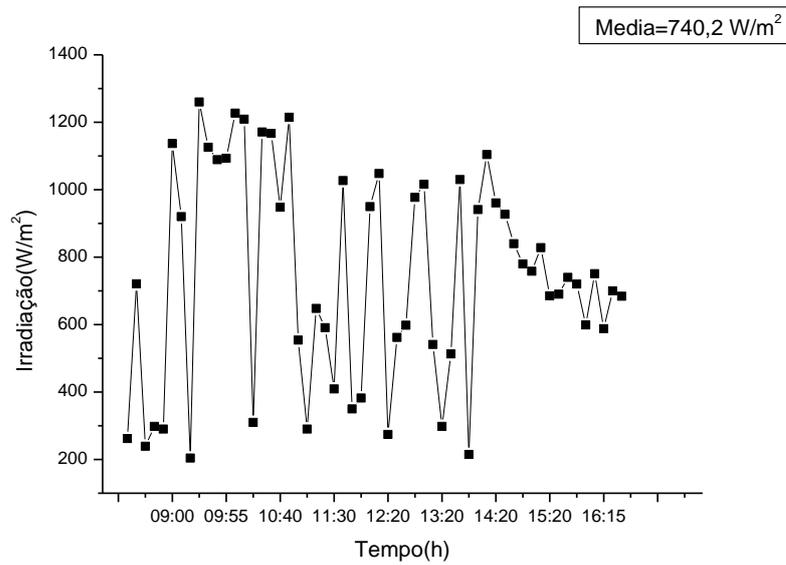
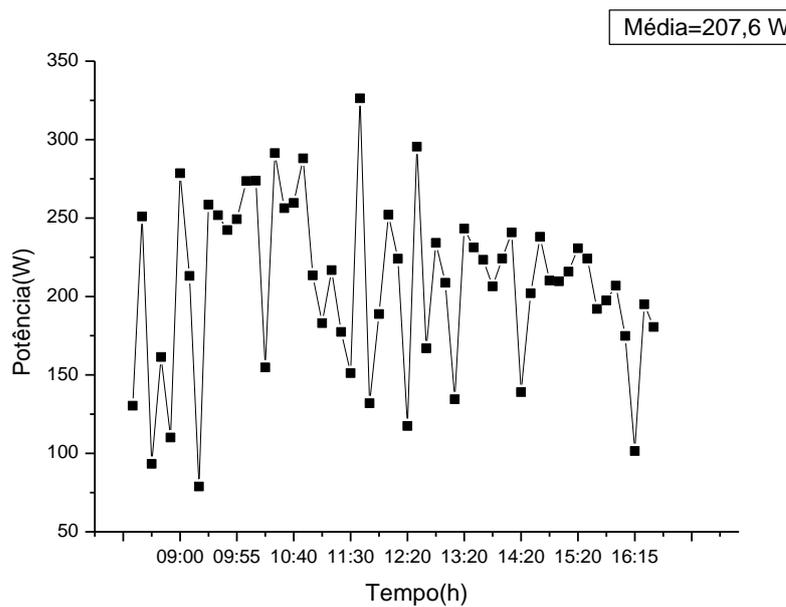


Figura 39: Potência elétrica disponibilizada pelo painel solar fotovoltaico em função do tempo(dia 03)



Este foi um dia com oferta de energia solar bastante semelhante ao dia 2, em função disso conseguiu-se estabelecer seu funcionamento de modo contínuo ao longo do dia, tendo a taxa de insolação disponibilizada..

Os seus resultados apresentados através das Figuras 40 e 41, mostrando as variações das pressão de operação e a vazão de permeado em função da potência gerada pelos painéis solares.

Figura 40: Variação da pressão de operação do sistema em função do tempo (dia 03)

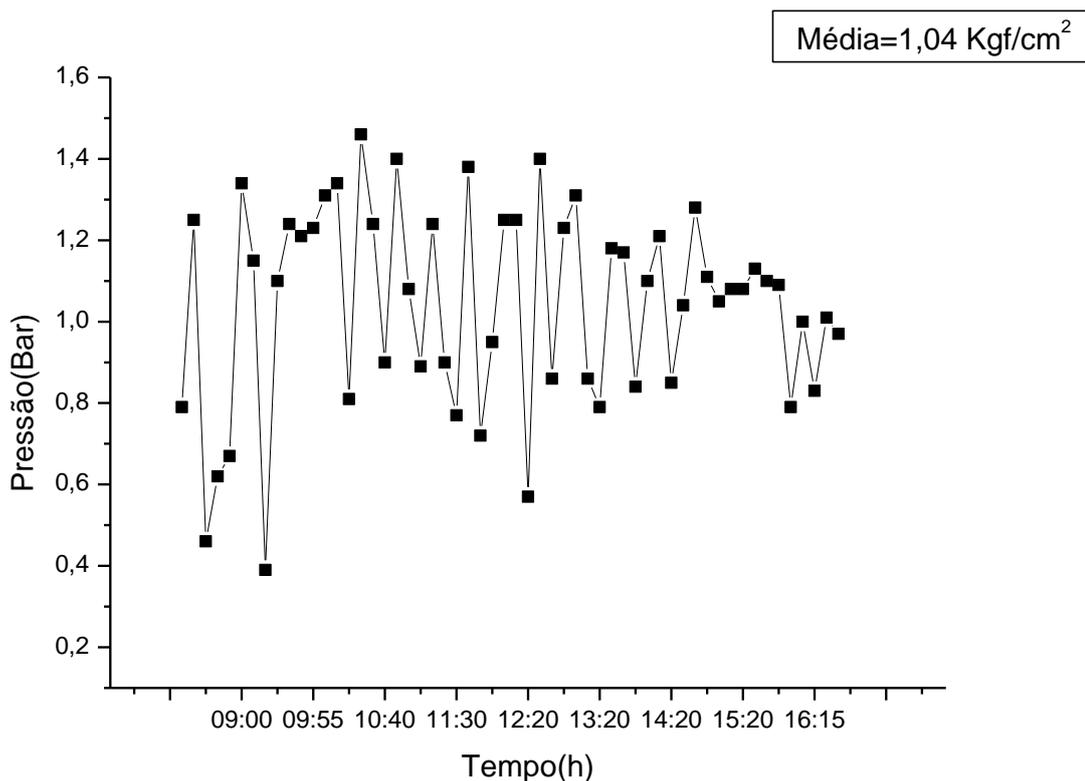
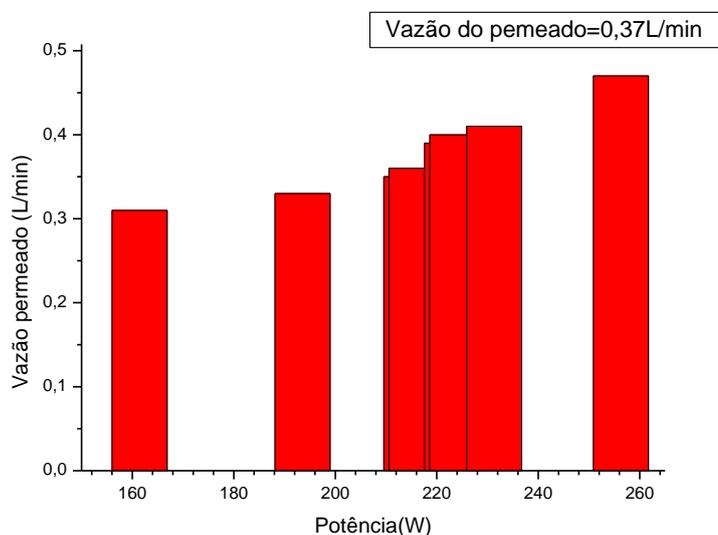


Figura 41: Variação da vazão do permeado em função da Potência do sistema (dia 03)

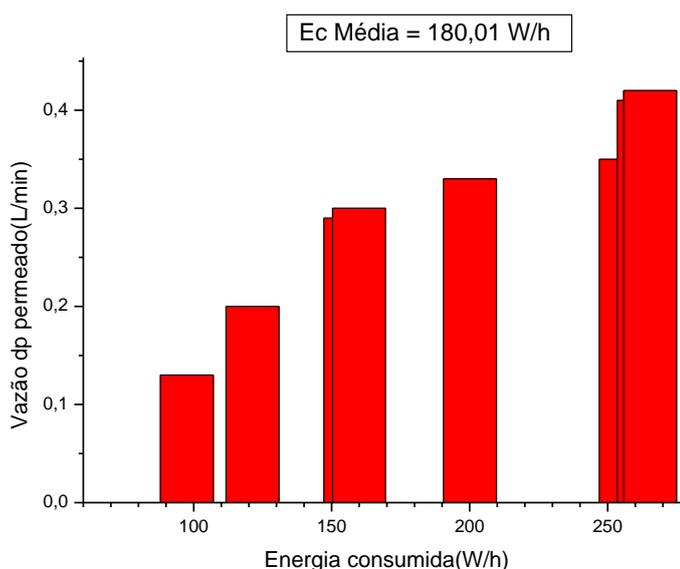


Durante as horas de funcionamento do sistema, observa-se que a pressão manteve-se na faixa de 1,04 kgf/cm<sup>2</sup> ao longo de praticamente toda operação do sistema. A produção de permeado manteve-se em torno de 0,3 a 0,4 L/min ao longo do período de funcionamento do sistema, produzindo uma vazão média de 0,37 L/min ou 22,2 L/h, o que corresponde a uma produção diária de apenas 177,6 L.

#### 6.4 Vazão do permeado em função da energia consumida

Avaliou-se o comportamento da vazão de água bombeada em função da energia consumida pelo sistema no dia 4 e é apresentada na Figura 42.

Figura 42: Vazão do Permeado em Função da Energia Consumida

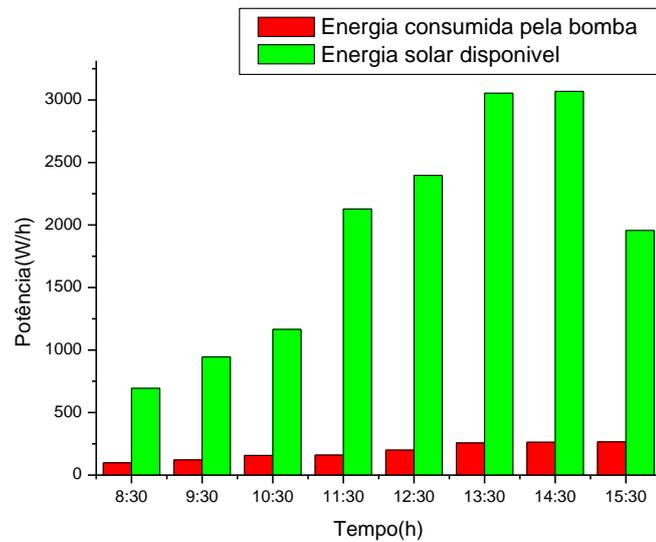


Analisando os dados apresentados verificou-se que para o consumo de 1440,08 W/h (Em relação às 8 horas de funcionamento do sistema) tem-se uma produção de aproximadamente 220,8 L de água.

##### 6.4.1 Energia Disponível e Energia consumida em função do tempo

A Figura 43 apresenta os valores de Energia disponível e Energia consumida ao longo das 8 horas do dia 4, para o sistema de bombeamento em questão.

Figura 43: Energia consumida e Energia Disponível em Função do tempo



Observou-se na Figura 43 que a energia disponível vai aumentando gradativamente a partir do início da manhã até atingir seu pico, e depois volta a decrescer no final da tarde. Considerando que a energia disponível é fornecida pela irradiação solar sobre a área útil dos 3 painéis, as variações que ocorreram foram em função apenas da irradiação solar, visto que a área dos painéis se manteve constante.

De toda a energia disponível, apenas parte dela foi consumida pelo motor-bomba. Demonstrando que a uma quantidade significativa de energia desperdiçada que poderia ser aproveitada, aumentando, por exemplo, a quantidades de painéis do sistema (área de painéis), proporcionando a adição de uma bomba de alta pressão e conseqüentemente adições de módulos com membranas no sistema, aumentando a produção de água purificada.

A energia consumida apresentou comportamento semelhante ao da energia disponível. Considerando a energia efetivamente consumida pela bomba ( $E_c$ ) e a energia solar disponível ( $E_d$ ) fornecida pela irradiação solar sobre a área útil dos painéis.

## 7 CONCLUSÕES

Os resultados da pesquisa desenvolvida permite concluir que:

- O sistema de tratamento em estudo permite a operação submetido a variações consideráveis de energia, operando na faixa de potência elétrica de 165,4 W dia 1, 197,20 W dia 2 e 207,6 W dia 3.
- A caracterização do sistema demonstrou a pressão máxima obtida pelo sistema é de aproximadamente 2,0 Kgf/cm<sup>2</sup>, problema devido ao motor-bomba centrifuga que trabalha em baixas pressões.
- É necessário observar que a energia gerada pelos painéis passa pelo conversor CC-CA, o qual adéqua o sinal disponibilizado a necessidade do sistema motor-bomba, dessa forma o sistema de bombeamento não recebe o sinal elétrico com todas as variações ocorridas na geração. Este fato justifica o estabelecimento da pressão de operação do sistema, que apesar de sofrer algumas variáveis, mantém-se na maior parte do tempo na faixa de 0,8 kgf/cm<sup>2</sup> a 0,9 kgf/c m<sup>2</sup> apresentando uma média de 0,83 kgf/cm<sup>2</sup>, conforme apresenta Figura 32.
- A análise conjunta dos resultados apresentados nas Figuras 32 e 33, nos permite observar que todas as variações de pressão ou potência sofridas pelo sistema são refletidas na geração de permeado, de modo que, todas as quedas de pressão/potência do sistema, apesar de rápidas, ocasionam conseqüente queda na geração de permeado produzido.
- A pressão de operação do sistema é um fator determinante para definição do consumo energético do sistema, bem como para o quantitativo de produção de permeado;
- O estudo realizado durante um ano da disponibilidade solar da região de Campina Grande –PB comprovou que 70,5 da Irradiação Solar Média do ano se encontra na faixa de 200 w/m<sup>2</sup>, faixa necessária para o funcionamento do sistema.

- 
- O acionamento do sistema de tratamento de água por energia solar fotovoltaica sem baterias é viável, e forneceram uma produção diária média de 142,8 L dia 1, 182,4 L dia 2 e 177,6 L dia 3, com uma pressão média de 0,99 kgf/cm<sup>2</sup>.
  - O sistema de tratamento foi capaz de operar fazendo uso da geração solar fotovoltaica sem baterias, com produção média dentro da faixa estimada a partir da disponibilidade energia solar ofertada.

## **7 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS**

- Utilizar conversor comercial no sistema, mas resistente e com assistência técnica disponível
- Verificar o comportamento energético do sistema durante 12 meses com uma membrana cerâmica
- Adicionar mais painéis fotovoltaicos, possibilitando assim a trocar da bomba centrífuga por uma bomba de alta pressão, aumentando a produção de água

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília, DF: ANEEL, 2002.

BAKER, R. W., **Membrane Technology and Applications**. 2ª ed. John Wiley & Sons Ltda, 2004.

BHAVE, R. R., **Inorganic Membranes – Synthesis, Characteristics and Applications**. Van Nostrand – Reinhold, New York, 1991.

CRESESB, 1999. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**.

CRESESB, 2005. **Energia Solar – Princípios e Aplicações**.

El-Ghonenmy, A. (2012). Water desalination systems powered by renewable energy sources: Review.

Laranjeira, C. (2010). *Estudo Numérico dos Escoamentos em Canais de Dessalinização por Osmose*. UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES EVALTO DOURO: DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

FRANÇA NETA, L. S. de, **Clarificação de Bebidas Fermentadas Utilizando o Processo de Microfiltração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 2005.

FURRIELA, R. B. **EDUCAÇÃO PARA O CONSUMO SUSTENTÁVEL**. Ciclo de Palestras sobre Meio Ambiente - Programa Conheça a Educação do Cibec/Inep-MEC/SEF/COEA, 2001.

GIACOBBO, A.; FERON, G. L.; RODRIGUES, M. A. S., **Utilização de Biorreator à Membrana para Tratamento de Efluentes**. HOLOS, Ano 27, Vol. 1, 2011.

GOETZBERGER, A.; KNOBLOCH, J.; VOSS, B.; 1998. **Crystalline Silicon Solar Cells**. 1. ed., Inglaterra: John Wiley & Sons Ltda.

HABERT, A. C., BORGES, C. P., NOBREGA, R., **Processos de Separação com Membranas**. Rio de Janeiro – RJ: E-papers, 2006.

LEAL, T. L., **Preparação e Modificação de Membranas Tubulares de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM) Sinterizadas**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), UFCG, Campina Grande – PB, 2007.

LUCAS, C. de S., **Medida de Tamanho de Poro de Membrana Polimérica de Microfiltração Utilizando Técnica Ultrassônica e Redes Neurais Artificiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores), CNEM/IEN, Rio de Janeiro – RJ, 2009.

MARTINS, F. B. PEREIRA, E. B. **Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil**, Energy Policy, Vol. 39, pp 4378-4390, July 2011.

Mathioulakis E., B. V. (2007). Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art.

MEAH, K.; FLETCHER, S.; ULA, S. **Solar photovoltaic water pumping for remote locations**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12, no.2, pp. 472-487, Feb. 2008.

Moreira, Seraphim e Gabriel Filho. **SISTEMA FOTOVOLTAICO MONOCRISTALINO PARA BOMBEAMENTO DE ÁGUA**. *Energ. Agric., Botucatu*, vol. 27, n.3, julho-setembro, 2012, p.31-47

MME – Ministério do Meio Ambiente (Brasil). **Consumo Sustentável: Manual de Educação**. Brasília: Consumers International/ MMA/ MEC/IDEC, 2005.

OLIVARES, A. G.; BALLABRERA-POY, J.; LADONA, E.G. **A global renewable mix with proven technologies and common materials**. Energy Policy, vol. 41, pp. 561-574, Feb. 2012.

OLIVEIRA, D. R. de. **Pré-tratamento do processo de osmose inversa utilizando a microfiltração e investigação de técnicas de limpeza e recuperação de membranas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, 2007.

PALMIRO, F.; PINTO, J.O.P.; PEREIRA, L.H.; GODOY, R.B., **Design and Implementation of a 480 W Three-Phase Converter For Photovoltaic Remote Regions Water Pumping System**, Power Electronics Conference, 2013. COBEP '13. Brazilian , Oct. 27 2013-Oct. 31 2013

PARIDA, B.; INIYAN, S.; GOIC, R. **A Review of Solar Photovoltaic Technologies, Renewable and Sustainable.** Energy Reviews, vol. 15, no.3, pp 1625-1636, April 2011.

Peñate, B. e.-R. (2012). Current trends and future prospects in the desing of seaater reverse PRESENÇO, F. J. **Desenvolvimento de um sistema de controle para avaliação de fontes de energias renováveis no bombeamento de água.** 2007. 152 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2007.

PEREIRA, E. B; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** São José dos Campos: 1º edição 2006.

PEREIRA, E.B., COLLE, S. **A energia que vem do sol.** Ciência Hoje. vol. 22 pp. 24-35. 1997.

QTAISHAT, M. R.; BANAT, F. **Desalination by solar powered membrane distillation systems.** Desalination, vol. 308, no. 2, pp. 186-197, Jan. 2013.

RIBEIRO, M. L., **Remoção de Compostos Orgânicos de Água por Ultra e Nanofiltração em Membranas Poliméricas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), UFRGS, Porto Alegre – RS, 2002.

RIBEIRO, R. M, BERGAMASCO, R., GIMENES, M. L., **Membranes Synthesis Study for Color Removal of a Textile Effluent.** Desalination 145, 2002.

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

RAFAELA, R, **Avaliação Energética de um Sistema de Produção de Água Potável com Membrana de Microfiltração Acionado por Energia: Análise de Viabilidade Técnica e Avaliação de Produção.** Tese (Doutorado em Engenharia em Engenharia Química), UFCG, Campina Grande – PB, 2014.

SCHNEIDER, R. P., TSUTIYA, M. T., **Membranas Filtrantes para Tratamento de Água, Esgoto e Água de Reuso.** In ABES Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

SCHULZ, C. K., **Tratamento de Efluentes Oleosos Utilizando Processos de Separação por Membranas**. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, 2005.

SHORT T.D., OLDACH R. **Solar powered water pumps: The past, the present – and the future?** Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, vol. 125 no.1, pp. 76-82, 2003.

SURERUS, V., RAMOS, G. M., CARVALHO, R. B., NÓBREGA, R., **Obtenção de água de Reuso a partir da Utilização de Microfiltração como Polimento Final de Efluentes Tratados Biologicamente**. VIII Congreso Ibero-Americano em Ciencia y Tecnología de Membrana CITEM 2012: Salta – AR: Universidad Nacional de Salta, 2012.

#### **REFERENCIAS ELETRONICAS**

KYOCERA. Disponível em <<http://www.kyocerasolar.com.br/>> Acesso em: 20 de novembro de 2014

# ANEXO

