



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

ROSA JACOB CHILUNDO

**SISTEMA FOTOVOLTAICO APLICADO À IRRIGAÇÃO DE UMA
UNIDADE AGRÍCOLA DE PRODUÇÃO FAMILIAR**

FORTALEZA

2014

ROSA JACOB CHILUNDO

**SISTEMA FOTOVOLTAICO APLICADO À IRRIGAÇÃO DE UMA
UNIDADE AGRÍCOLA DE PRODUÇÃO FAMILIAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica. Linha de pesquisa: Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques Carvalho.

FORTALEZA

2014

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

C464s Chilundo, Rosa Jacob.

Sistema fotovoltaico aplicado à irrigação de uma unidade agrícola de produção familiar / Rosa Jacob Chilundo. – 2014.

111 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2014.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientação: Prof. Dr. Paulo César Marques de Carvalho.

1. Engenharia elétrica. 2. Irrigação. 3. Produção de alimentos. I. Título.

CDD 621.3


ROSA JACOB CHILUNDO


SISTEMA FOTOVOLTAICO APLICADO À IRRIGAÇÃO DE UMA UNIDADE
AGRÍCOLA DE PRODUÇÃO FAMILIAR

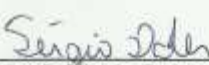
Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Ceará, como requisito à
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica. Área de
Concentração: Sistema de Energia
Elétrica.

Aprovada em: 18/12/2014

BANCA EXAMINADORA


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


Prof. Fernando Luiz Marcelo Antunes, PhD.
Universidade Federal do Ceará (PPGEE-UFC)


Prof. Sérgio Daher, Dr.-Ing.
Universidade Federal do Ceará (UFC)


Prof. Urânio Stefane Mabanjane, PhD.
Universidade Pedagógica de Moçambique (UPM)

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”

Chico Xavier

“Eu o instruirei e o ensinarei no caminho que você deve seguir; Eu o aconselharei e cuidarei de você.”

Bíblia Sagrada: Salmos 38:2

À meu esposo, Abel Chilundo e nossos filhos,
Robelson Chilundo e Malinda Chilundo;

Eu dedico, o presente trabalho.

AGRADECIMENTO

A Deus pela vida e saúde.

A minha família, em especial meus pais, esposo e filhos pelo amor, carinho e compreensão, durante o período de formação.

Ao professor Paulo Cesar Marques de Carvalho, pela orientação e supervisão.

Aos professores participantes da banca examinadora, Sérgio Daher, Fernando Luiz Marcelo Antunes, Urânio Stefane Mahanjane pelas valiosas contribuições e sugestões.

Aos professores do curso de pós-graduação em Engenharia Elétrica, pelos ensinamentos e oportunidade de troca de experiências.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões e companheirismo.

Ao setor de manutenção do Centro de Tecnologia da UFC e ao Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola, na pessoa do Dr. José Firmino pelas ferramentas de operações fundamentais.

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Ministério da Educação de Moçambique, pela oportunidade de dar continuidade aos meus estudos no Brasil.

À Petrobras pelo patrocínio parcial das instalações usadas na presente pesquisa.

A todos que participaram de forma direta e/ou indireta no presente trabalho.

Meus sinceros agradecimentos.

CHILUNDO, R. J. “*SISTEMA FOTOVOLTAICO APLICADO À IRRIGAÇÃO DE UMA UNIDADE AGRÍCOLA DE PRODUÇÃO FAMILIAR*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, 2014, 111p.

A presente dissertação tem como objetivo principal analisar a viabilidade técnica e financeira de um sistema fotovoltaico autônomo para bombeamento de água aplicado na irrigação de uma unidade de produção agrícola familiar. A unidade agrícola pesquisada está instalada no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Agricultura Urbana (NEPAU), que atua em parceria com o Laboratório de Energias Alternativas (LEA), situados no Campus do PICI da Universidade Federal do Ceará. A unidade ocupa uma área útil de 43 m², com um reservatório de água que simula um açude, lago ou poço com capacidade de 3.534 litros, um motor bomba de 12 VDC e um módulo fotovoltaico de 135 Wp. O sistema de irrigação é constituído por 12 micro-aspersores com pressão de trabalho de 7 psi, com raio de alcance de 1,2 m e vazão de 0,6 l/min. A unidade de produção consumiu 31.592 litros de água e demandou 5,2 kWh de energia elétrica ao longo de 44 dias de produção do coentro. Um sensor de umidade do solo foi utilizado para controlar a umidade do solo o que permitiu economizar 3.608 litros de água e 0,6 kWh de energia elétrica na produção de 23 kg de coentro. O custo de implantação do sistema fotovoltaico de bombeamento desenvolvido foi de R\$ 1.694,00. As eficiências do módulo fotovoltaico, conjunto motobomba e global foram de 8,4%, 42% e 3,5%, respectivamente. O tempo de retorno do capital investido é de 10 anos sem considerar nenhum subsídio e de 8,4 anos para um subsídio de 20% sobre o capital investido na aquisição dos equipamentos.

Palavras-chave: Engenharia elétrica, irrigação, produção de alimentos.

CHILUNDO, R. J. *“PHOTOVOLTAIC POWERED IRRIGATION SYSTEM APPLIED TO FAMILIARY AGRICULTURE”*, Master's Thesis in Electrical Engineering, Federal University of Ceará (UFC), Fortaleza, 2014, 111p.

This thesis aims to analyze the technical and financial feasibility of a stand-alone photovoltaic system for irrigation applied to familiar unit production. The agricultural unit was installed in the Center for Teaching and Research in Urban Agriculture (NEPAU), which operates in partnership with the Alternative Energy Laboratory (LEA), located at the PICI campus of the Federal University of Ceará. The unit occupies a floor area of 43 m², with a reservoir of water that simulates a pond, lake or well with capacity of 3534 liters, a pump motor of 12 VDC and a photovoltaic module of 135 Wp. The irrigation system is composed of 12 micro-sprinklers with 7 psi working pressure, with a range of 1.2 m radius and output of 0.6 l/min. The production plant consumed 31,592 liters of water and demanded 5.2 kWh of electrical energy throughout 44 days of production of coriander. A soil moisture sensor was used to control soil moisture allowing save 3608 liters of water and 0.6 kWh of electricity in the production of 23 kg of coriander. The costs for the photovoltaic pumping system was R\$ 1,694.00. The efficiencies of photovoltaic module, pump and global set were 8.4%, 42% and 3.5%, respectively. The return on capital invested time is 10 years without regard to any allowance and 8.4 years for a 20% allowance on capital invested in the acquisition of equipment.

Keywords: Electrical engineering, irrigation, food production.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Irradiação solar global diária – Média anual típica ($\text{Wh/m}^2 \cdot \text{dia}$).....	3
Figura 2: Complementaridade sazonal entre pluviosidade e o potencial solar no Ceará (2002).....	4
Figura 3: Matriz energética Brasileira.....	7
Figura 4: Sistema Mandalla.....	11
Figura 5: Círculos da Mandalla.....	12
Figura 6: Estrutura do sistema de irrigação.....	13
Figura 7: Curva característica $I-V$ e curva de potência $P-V$ para um módulo com potência nominal de 100Wp.....	16
Figura 8: Efeito causado pela variação da irradiância solar sobre a curva característica do módulo de Si cristalino (temperatura constante).....	17
Figura 9: Efeito causado pela variação da temperatura das células sobre a curva característica do módulo de Si cristalino a 1000W/m^2	18
Figura 10: Diagrama de um sistema fotovoltaico de bombeamento.....	19
Figura 11: Configurações utilizadas em sistemas FVs de bombeamento.....	20
Figura 12: Curso de capacitação em agricultura urbana para combate à desnutrição.....	28
Figura 13: Diagrama de blocos da unidade desenvolvida.....	31
Figura 14: Diagrama esquemático do sistema instalado com principais componentes.....	31
Figura 15: Painel FV CSUN 135-36P.....	32
Figura 16: Conjunto motobomba Shurflo 8000.....	33
Figura 17: Reservatório superficial de água.....	35
Figura 18: Diagrama do sistema de aquisição de dados.....	36
Figura 20: Sensor de pressão.....	37
Figura 19: Sensor de vazão.....	37
Figura 21: Sensor de corrente e divisor de tensão acoplados ao sistema SunUSB.....	38
Figura 22: Tela do sistema supervisorio desenvolvido para monitorar dados da placa SanUSB.....	39
Figura 24: Tela do computador para à aquisição de dados da irradiância solar.....	40
Figura 23: Piranômetro RTF/82 - 05.....	40
Figura 25: Sensor de umidade do solo.....	41
Figura 26: Diagrama da lógica de acionamento implementada.....	43
Figura 27: Sensor de umidade do solo indicando 63% na simulação computacional.....	44
Figura 28: Diagrama esquemático da simulação representando situação de umidade do solo abaixo do limite ideal ($US = 63\%$).....	44
Figura 29: Led B5 (cor branca) acesso, indicando motobomba ligada.....	45
Figura 30: Sensor de umidade do solo indicando 79% na simulação computacional.....	45
Figura 31: Diagrama esquemático da simulação representando situação de umidade do solo acima do limite ideal ($US = 79\%$).....	46
Figura 32: Led B4 (cor azul) acesso, indicando motobomba desligada.....	46
Figura 33: Chave bóia.....	47
Figura 34: Área máxima implantada para produção agrícola (134 m^2).....	48
Figura 35: Sistema de irrigação instalado.....	49
Figura 36: Área útil explorada na presente pesquisa (43 m^2).....	49
Figura 37: Microaspersores instalados em funcionamento.....	50
Figura 38: Unidade de produção instalada.....	50
Figura 39: Curvas de potência elétrica da motobomba e pressão dos microaspersores nos dias 09, 10, 11 e 12 de Agosto de 2014.....	54
Figura 40: Irradiação solar disponível no Campus do PICI – Fortaleza (2003/2004).....	56
Figura 41: Curvas da vazão e de tensão emitida pelo sensor de umidade do solo (08 de Setembro de 2014) $H = 5,06 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$	58

Figura 42: Curvas da vazão e irradiância no dia 18 de Agosto de 2014 ($H = 6,7 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$)	59
Figura 43: Curvas de vazão, pressão e irradiância ao longo do dia 15 de Setembro de 2014..	59
Figura 44: Curva de potência elétrica gerada e irradiância no dia 15 de Setembro [$H = 7,04 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$]	60
Figura 45: Curva de potência e irradiância no dia 09 de Setembro [$H = 4,3 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$]	60
Figura 46: Curvas de volume, energia solar disponível e energia elétrica consumida por dia durante o cultivo do coentro (Agosto e Setembro de 2014)	61
Figura 47: Curvas de irradiância, vazão e pressão ao longo do dia 09 de Setembro de 2014..	63
Figura 48: Curvas de irradiância, vazão e pressão ao longo do dia 15 de Setembro de 2014..	63
Figura 49: Médias de frequência de ocorrência de cada faixa de irradiação solar ao longo do ano 2003/2004 no Campus do Pici – Fortaleza	68
Figura 50: Curva de tendência do volume em função da irradiação solar	68
Figura 51: Volume de água em função da faixa de irradiação solar no campus do Pici	69
Figura 52: Variáveis de entrada no <i>RETScreen</i>	72
Figura 53: Variáveis de entrada no <i>RETScreen</i>	73
Figura 54: Fluxo de caixa sem subsídios	74
Figura 55: Fluxo de caixa com subsídio de 10 %	75
Figura 56: Fluxo de caixa com subsídio de 20 %	76
Figura 57: Análise de emissões	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: População sem acesso a energia elétrica por região do mundo – 2010.....	7
Tabela 2: Eficiência de cada técnica de irrigação e o consumo de energia por metro cúbico (m ³) de água bombeada	9
Tabela 3: Eficiência das melhores células FVs fabricadas em laboratório até 2012.....	15
Tabela 4: Estimativa de consumo médio de água por uso final, em litros	23
Tabela 5: Eficiências de motobombas em sistemas FVs de bombeamento	24
Tabela 6: Especificações técnicas do painel CSUN 135 – 36P.....	32
Tabela 7: Especificações do desempenho da motobomba shurflo 8000	34
Tabela 8: Calibração do sensor de umidade	42
Tabela 9: Valores médios de Vazão X Pressão X raio de alcance de cada microaspersor na linha de carga considerada para o dia 09, 10, 11 e 12 de Agosto de 2014.....	55
Tabela 10: Médias diárias e valores totais das grandezas envolvidas no cultivo do coentro ...	62
Tabela 11: Eficiências calculadas do sistema FV desenvolvido	65
Tabela 12: Custos de investimento inicial dos componentes de bombeamento FV.....	66
Tabela 13: Volume de água anualizado.....	69
Tabela 14: Custos específicos do sistema instalado	70

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
LISTA DE TABELAS	xii
SUMÁRIO.....	xiii
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	5
1.1.1 <i>Objetivo principal</i>	5
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	5
1.1.3 Estrutura do trabalho	5
CAPÍTULO II: REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1 ENERGIA E AGRICULTURA	6
2.1.1 Agricultura de subsistência.....	8
2.1.2 Projeto Mandalla	10
2.2 ENERGIA SOLAR E SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	13
2.2.1 Sistemas fotovoltaicos aplicados no bombeamento de água para irrigação.....	18
2.2.2 Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água.....	20
2.2.3 Estado da arte sobre sistemas fotovoltaicos de bombeamento	26
CAPÍTULO III: DESCRIÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DESENVOLVIDO.....	30
3.1 Descrição da área de estudo.....	30
3.2 Descrição da unidade de produção de alimentos desenvolvida.....	30
3.3 Descrição dos materiais e equipamentos	32
3.4 Parâmetros calculados	51
3.5 Condições de operação da unidade de produção agrícola instalada	53
CAPÍTULO IV: VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....	57
4.1 Curva do perfil de bombeamento controlado pelo sensor de umidade do solo.....	57
4.2 Comportamento diário das variáveis técnicas envolvidas.....	58
4.3 Consumo de água e energia elétrica para irrigação do Coentro	61

4.4 Capacidade de bombeamento da unidade FV desenvolvida	62
4.5 Eficiência do sistema FV de bombeamento	64
4.6 Avaliação financeira	65
CAPÍTULO V: CONCLUSÕES	78
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	80
TRABALHOS CIENTÍFICOS GERADOS	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
APÊNDICES	86
ANEXOS	91

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

A ausência de fornecimento de eletricidade em várias regiões do mundo ocorre na maior parte das vezes em função de dificuldades geográficas, econômicas e políticas. Desde a década de 1990, a eletrificação rural e urbana conta com a tecnologia fotovoltaica (FV), tecnicamente consolidada e que vem sendo amplamente explorada no bombeamento de água, (NOGUEIRA, 2009).

O uso da tecnologia FV em sistemas de bombeamento de água tem sido uma das formas populares da aplicação da energia solar nas últimas décadas em áreas remotas e desérticas, como também em algumas áreas urbanas (ZAKI & ESKANDER, 1996). Paralelamente esforços intensivos têm sido realizados para a produção de células FVs com melhor rendimento e novos métodos de conversão são explorados de modo a reduzir os custos das instalações dos sistemas FVs para o bombeamento de água e outras finalidades (ABDOLZADEH & AMERI, 2009).(ABDOLZADEH & AMERI, 2009)

A relação direta entre a disponibilidade da energia solar, demanda hídrica e custos efetivos leva pesquisadores a avaliar a disponibilidade do recurso solar e hídrico antes de realizar a instalação de qualquer sistema FV de bombeamento, de modo a buscarem métodos de otimização que garantam o melhor rendimento possível ao sistema e demonstrar os custos reais da implementação e a maturidade da tecnologia de bombeamento FV (FEDRIZZI, 2003)

Numa conjuntura em que o mundo se debate com a questão de mudanças climáticas e aquecimento global, as fontes renováveis de geração da energia elétrica são uma resposta importante para questões climáticas; adicionalmente, representam uma ferramenta chave para países em desenvolvimento, em que parte significativa das populações não tem acesso à rede convencional de energia elétrica e em alguns casos sequer tem acesso à água potável para o consumo humano. Acrescenta-se ainda a estes fatores o alto custo da energia elétrica necessária à irrigação, sendo a energia elemento fundamental para a produção contínua e estável de alimentos e matérias-primas.

Vários economistas (citados por Vann Koppen, Namara e Safilios-Rothschild, 2005), baseados na análise do comportamento histórico do desenvolvimento dos países ao redor do mundo, afirmaram que a agricultura tem sido o motor de todo o crescimento econômico, em consequência a base da redução da pobreza ao longo da história (VALER MORALES, 2011). Dentro deste contexto, a adoção de práticas de produção agrícola

autosustentáveis, utilizando fontes energéticas renováveis e uso racional do recurso hídrico torna-se essencial para o desenvolvimento das comunidades.

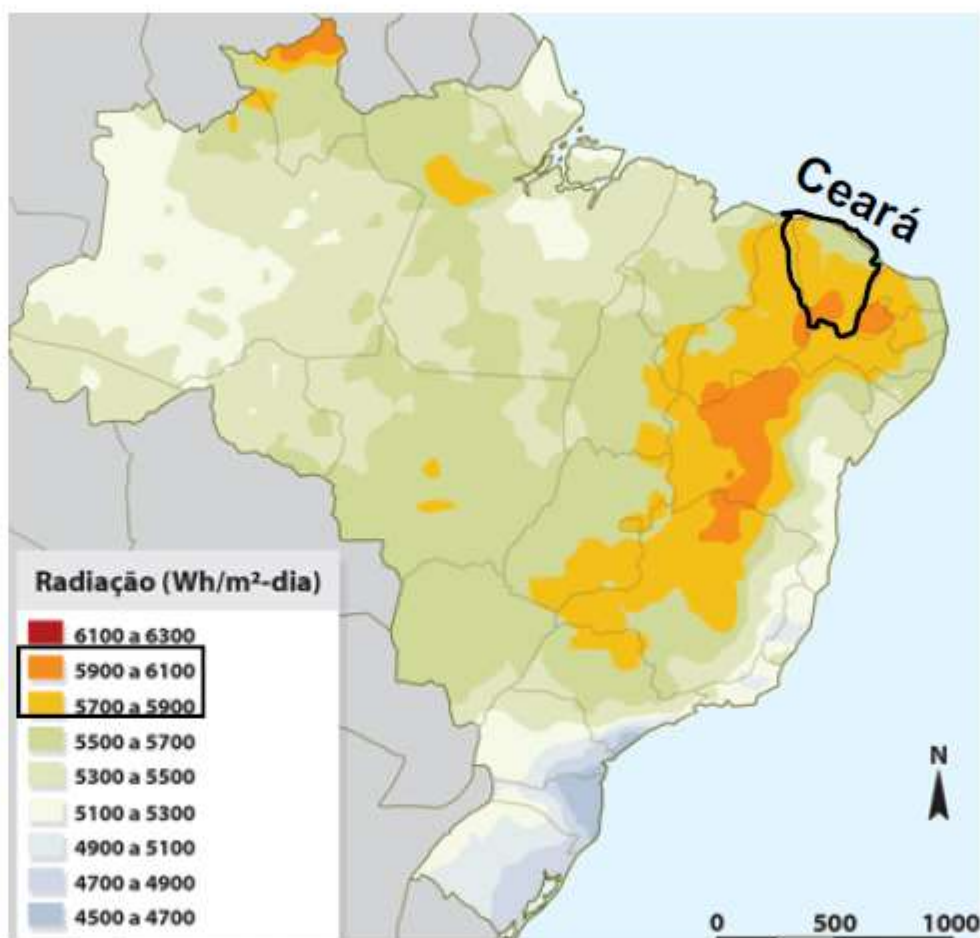
O meio rural do Nordeste brasileiro é uma região semiárida caracterizada por baixos índices pluviométricos (750 mm/ano) e elevado índice de pobreza, com restrições ao acesso à água potável, apesar de que 90% da população tem acesso a energia elétrica (LOPES *et al.*, 2012). Essa característica desencadeia diferentes ações humanas sobre a natureza de modo a garantir o acesso a água e a diversificação da matriz energética, para locais em que a base de geração é de fontes hídricas. Para locais remotos em que não há acesso a energia elétrica a tecnologia FV também contribui para o suprimento energético (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2014).

O Ministério de Minas e Energia do Brasil coordena o programa “Luz para Todos” que objetiva levar o acesso a energia elétrica, gratuitamente, para a população rural nas localidades de menor índice de desenvolvimento humano. Para as áreas mais remotas foram estabelecidos critérios técnicos e financeiros, segundo o “Manual de Projetos Especiais” do governo brasileiro, a serem aplicados com o uso de fontes renováveis de geração de energia elétrica, dentre as opções tecnológicas está a FV (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011b).

A tecnologia FV se mostra bastante promissora, devido a autonomia e a abundância do recurso solar no Nordeste do Brasil. Conforme o estudo do Plano Nacional de Energia, o Nordeste possui irradiação solar comparável às melhores regiões do mundo nessa variável. Segundo o Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL) a irradiação solar varia de 5700 á 6100 Wh/m².dia, (ver figura 1), (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2014).

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2007), 82,9 % da mão-de-obra do campo do Nordeste é representada pela agricultura familiar. A agricultura familiar é realizada em áreas inferiores a dois hectares tendo como mão-de-obra básica o núcleo familiar.

Figura 1: Irradiação solar global diária – Média anual típica (Wh/m².dia)

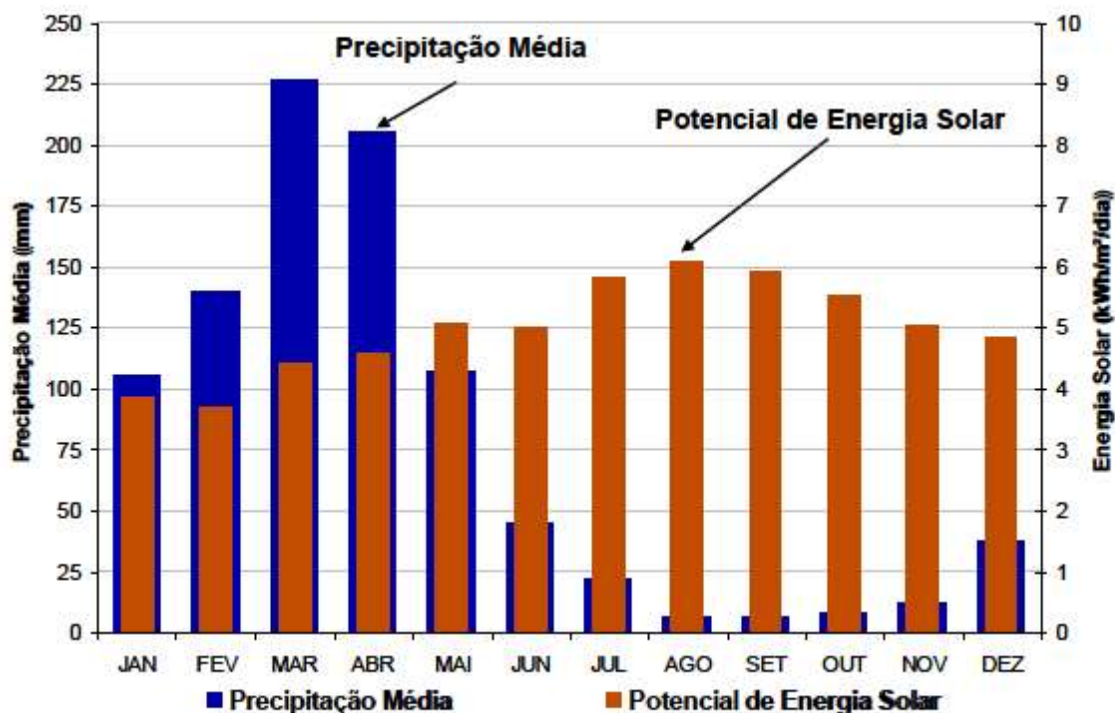


Fonte: Adaptado de ATLAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL, 1998

Desta forma, a implantação de pequenos sistemas autônomos de energia com uso da tecnologia FV se apresenta como parte da solução, tendo em conta que os meses de menor nível pluviométrico coincidem com a maior disponibilidade da irradiação solar no Nordeste brasileiro, (ver figura 2).

Aliada a solução energética está a aplicação de um sistema que otimiza a utilização da água no processo de irrigação de unidades agrícolas familiares, o Projeto Mandalla. Esse projeto visa o fortalecimento de pequenos agricultores, adotando uma estrutura que tem por base um criterioso planejamento de uso de recursos, contribuindo para uma racional distribuição das fontes energéticas. Esse recurso e a geração de energia elétrica através de um sistema FV se somam para um contexto que vai além da agricultura de subsistência da família para uma agricultura de base ecológica que inclui aspectos sociais, econômicos, políticos, institucionais e ambientais.

Figura 2: Complementaridade sazonal entre pluviosidade e o potencial solar no Ceará (2002)



Fonte: OLIVEIRA (2011)

Sendo a agricultura atividade vital para a manutenção da humanidade há necessidade de investimento nas tecnologias de bombeamento e irrigação. O bombeamento FV se adapta eficientemente ao cenário nordestino, pois em épocas mais secas há maior consumo de água e maior disponibilidade da irradiação solar.

A partir do contexto apresentado, a presente dissertação tem como objetivo analisar de forma experimental a viabilidade técnica e financeira do uso do sistema FV de bombeamento de água aplicado a sistemas de irrigação: estudo de caso de uma unidade auto-sustentável de produção de alimentos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo principal

Analisar a viabilidade técnica e financeira do uso de um sistema FV isolado para bombeamento de água aplicado na irrigação de uma unidade auto-sustentável de produção familiar de alimentos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o sistema FV autônomo de bombeamento aplicado à irrigação de hortaliças na unidade instalada no Campus do Pici da UFC;
- Determinar a demanda elétrica necessária para atender à irrigação da unidade;
- Avaliar a viabilidade financeira do uso de sistemas FVs para fins de irrigação.

1.1.3 Estrutura do trabalho

A presente dissertação é constituída por cinco capítulos. O primeiro capítulo inclui a introdução, que contextualiza e justifica o tema em questão e os objetivos principal e específicos, vindo a culminar com a estrutura do trabalho. O capítulo dois traz consigo diversos aspetos da revisão da literatura sobre energia e agricultura; aspectos ligados a sistemas de irrigação adotados na agricultura familiar, demanda hídrica das culturas e da tecnologia FV aplicada a sistemas de irrigação também são abordados neste capítulo. Para o terceiro capítulo, uma descrição é feita sobre o sistema de bombeamento desenvolvido no Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará. O capítulo quatro capítulo apresenta os resultados obtidos durante a pesquisa, seguido do quinto e último capítulo que faz as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II: REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ENERGIA E AGRICULTURA

O uso produtivo da energia consiste no aproveitamento da energia para atividades que melhorem os ingressos econômicos e o bem-estar das pessoas (KAPADIA, 2004). O sucesso da prática agrícola é estritamente dependente da disponibilidade energética.

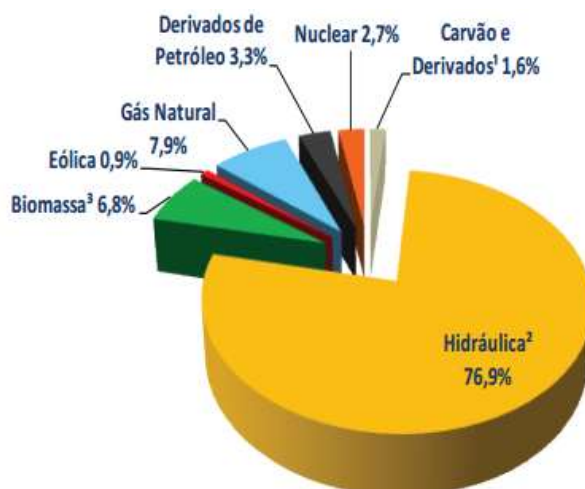
A atividade agrícola é centrada em processos de transformação de energia, sendo uma variável fundamental para providenciar integridade ao crescimento agrônômico. A energia é usada para irrigação, acionamento de máquinas, processamento e conservação dos produtos agrícolas entre outras formas de exploração do recurso energético na produção agrícola (TANJI & YARON, 1994).

O processo de irrigação na agricultura moderna ainda é baseado na exploração de combustíveis fósseis. Após a crise de combustíveis de 1973 e do crescente aumento de preços de combustíveis, o mundo percebeu sua dependência por combustíveis fósseis e tornou-se inevitável a análise energética envolvida na agricultura, uso residencial e comercial. A partir de então se desenvolveram estudos direcionados ao aproveitamento de outras fontes de energia (ACKERMANN, 2005).

As forças econômicas são importantes ao moldar a quantidade e a natureza da energia usada na agricultura. O preço dos recursos e das tecnologias envolvidas no processo produtivo deve ser considerado como variável de entrada, o que acaba influenciado diretamente o preço final dos produtos.

O acesso a uma energia de baixo custo induz ao aumento da produtividade e sustentabilidade da energia na agricultura. Incentivos diversos vêm sendo dados à promoção das fontes renováveis de geração de energia elétrica para sustentar as práticas agrícolas a nível mundial e atenção especial é dada para a diversificação da matriz energética, principalmente nos países em que a base de geração de eletricidade é hídrica; tendo que disputar a água para a geração de eletricidade, consumo humano e irrigação. A figura 3 ilustra que 76,9% da energia elétrica consumida no Brasil é de origem hídrica (EPE, 2013).

No século 19, o Japão e os Estados Unidos da América adotaram práticas políticas para subsidiar os recursos e as tecnologias envolvidas na produção agrícola. Esta estratégia impulsionou o rápido desenvolvimento das áreas cultivadas e irrigadas nestes países, levando as atividades agrícolas a altos níveis (STANHILL, 1984).

Figura 3: Matriz energética Brasileira

Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2013)

Segundo a *International Energy Agency* (ver tabela 1), cerca de 585 milhões de pessoas ainda não tem acesso à rede elétrica convencional a nível da África sub-Sahariana (IEA, 2010). Esta realidade dificulta a prática da agricultura de subsistência das famílias. Partes dos residentes rurais acabam imigrando para grandes cidades para adquirir produtos básicos de alimentação, ter acesso a serviços de saúde, ter acesso a serviços de informação e comunicação, entre vários benefícios oferecidos pela energia elétrica.

As fontes renováveis de geração descentralizada de energia elétrica são uma alternativa para o acesso e exploração da energia aplicada a produção agrícola e melhora de alguns aspetos sociais e humanização.

Tabela 1: População sem acesso a energia elétrica por região do mundo – 2010

Região	População sem acesso á energia elétrica (milhões de pessoas)	Taxa de eletrificação (%)		
		Total	Urbana	Rural
África do Norte e subsahariana	587	41,9	68,9	25
Ásia não OCEAD	799	78,1	93,9	68,8
América Latina	31	93,4	98,8	74
Meio este asiático	22	89,5	98,6	72,2
Economias em transição e membros da OCEAD	3	99,8	100	99,5
Total	1441	78,9	93,6	65,1

Fonte: Adaptado do IEA (2010b)

2.1.1 Agricultura de subsistência

Agricultura é o conjunto de ações humanas que servem para transformar o meio ambiente natural em um meio apto para o desenvolvimento de culturas (VALER MORALES, 2011). A atividade é classificada basicamente em dois grupos principais: agricultura de subsistência ou familiar e a agricultura de mercado.

A agricultura de subsistência é caracterizada pela produção de quantidades mínimas que satisfazem as necessidades da família através do uso de técnicas agrícolas básicas, onde a mão-de-obra é realizada pelos membros da família. A agricultura de mercado consiste do uso de técnicas avançadas para produzir grandes quantidades de produtos agrícolas. Segundo o Banco Mundial, dos 7,23 bilhões dos habitantes ao redor do mundo, 3,3 bilhões vivem em zonas rurais, dos quais 2,5 bilhões estão envolvidos de alguma forma com a agricultura (THE WORLD BANK, 2014).

A agricultura de subsistência (urbana e rural) é praticada em áreas menores a 2 hectares e as técnicas de irrigação mais aplicadas são: a superficial, por aspersão e a localizada, (ANDRADE, 2001). Na irrigação localizada a água é aplicada diretamente na raiz da planta por meio de três sistemas principais: a) gotejamento, que precisa de um bom sistema de filtragem; b) micro-aspersão; sistema com taxas de vazão menores a 175 L/h; e c) xique xique; técnica franco-brasileira, que consiste na perfuração dos tubos, com orifícios de 1 a 2 mm (COSTA *et al.*, 2006); sistema adotado na irrigação de Mandallas. Este sistema de irrigação normalmente funciona a baixas pressões (7 á 28 psi), tornando-a compatível a sistemas FVs para irrigação (SANTOS *et al.*, 2007).

O manejo racional da irrigação consiste na aplicação da quantidade necessária de água às plantas no momento correto. Por não adotar um método de controle da irrigação, o produtor usualmente irriga em excesso, temendo que a cultura sofra deficit hídrico (pouca água aplicada a planta). Esse excesso tem como consequência o desperdício de energia e de água, usado em um bombeamento desnecessário. A tabela 2 ilustra a eficiência de cada técnica de irrigação e o consumo de energia por metro cúbico (m³) de água bombeada (MAROUELLI & SILVA, 2011).

Tabela 2: Eficiência de cada técnica de irrigação e o consumo de energia por metro cúbico (m³) de água bombeada

Método de Irrigação	Eficiência de Irrigação (%)	Consumo de Energia (kWh/m³)
Por superfície	40 - 75	0,03 - 0,3
Por aspersão	60 - 85	0,2 - 0,6
Localizada	80 - 95	0,1 - 0,4

Fonte: MAROUELLI & SILVA, (2011)

A escolha da técnica de irrigação a usar, depende de fatores como:

a) **Características da fonte de água:** a água pode ser extraída de açudes, lagoas, rios, poços; a distância entre a fonte e a área de cultivo influi no custo da água para a irrigação, pois quanto maior for a distância entre a fonte e o cultivo maior será a energia demandada para o bombeamento. Para uniformizar a pressão necessária para acionar o sistema de irrigação é preciso ter em conta a altura da fonte em relação as áreas cultivadas.

b) **Qualidade da água:** a água aplicada na irrigação deve estar isenta de salinidade, toxidade, sedimentos e vetores transmissores de doenças. A salinidade (causa lixiviação do solo) e a toxidade (excesso de iões de cloro ou boro) consistem na elevada concentração de sais na água que dificultam a absorção de água e nutrientes por parte da planta. Os sedimentos provocam entupimento da tubulação e dos aspersores.

c) **Tipo de solo:** o tipo de solo a usar deve ser capaz de reter a água necessária para a cultura a ser implantada, visto que as culturas demandam quantidades diferentes de água. A água armazenada no solo é consumida pelas raízes, razão pela qual os solos com menor capacidade de retenção de água devem ser irrigados com maior frequência.

d) **Topografia:** o declive dos terrenos é relevante na escolha do tipo de irrigação. Terrenos planos não têm nenhuma restrição ao tipo de irrigação; mas para terrenos com declive de até 5% o tipo superficial é o mais indicado; até 30% a irrigação por aspersão adequa-se perfeitamente e os que vão até 60% recomenda-se a irrigação localizada. (ANDRADE, 2001).

e) **Clima:** de forma a otimizar o uso do recurso hídrico, a característica do clima é importante. Nos períodos chuvosos economiza-se a água para os períodos secos e com um método de irrigação adequado evita-se desperdício de água.

g) **Cultura a ser irrigada:** a característica da cultura influencia na escolha do tipo de irrigação. Cada cultura possui seus níveis de tolerância a umidade. O arroz tolera altos

níveis de umidade, mas as hortaliças não toleram níveis elevados de umidade, e acabam desenvolvendo fungos.

h) Capital de investimento e mão-de-obra: o pequeno agricultor, geralmente tem pouca capacidade de investimento quando a sua agricultura é para a subsistência familiar. A escolha do tipo de irrigação nestes casos é estritamente dependente do capital disponível para o investimento. Segundo ANDRADE (2001), a quantidade de energia necessária para os sistemas de bombeamento, determina parte dos custos operacionais, sendo estes, menores para o tipo superficial em relação ao tipo localizada. Quanto aos custos de mão-de-obra envolvida, esta parcela torna-se muito significativa em sistemas com a irrigação do tipo superficial, moderado para a aspersão e mínimos na localizada (ANDRADE, 2001).

i) Fonte de energia: a maioria dos sistemas convencionais de bombeamento de água para a irrigação precisa da energia eléctrica para seu funcionamento com excepção do bombeamento manual ou cata ventos que são de accionamento mecânico (VALER MORALES, 2011). Podem-se usar como fontes energéticas a rede eléctrica convencional ou uma geração local por meio de geradores diesel, sistemas FVs ou geradores eólicos. No Brasil, cerca de 70% dos irrigantes compram energia eléctrica de um fornecedor, 29% geram com um motor de combustão e 1% gera sua própria energia (ALVES *et al.*, 2003).

2.1.2 Projeto Mandalla

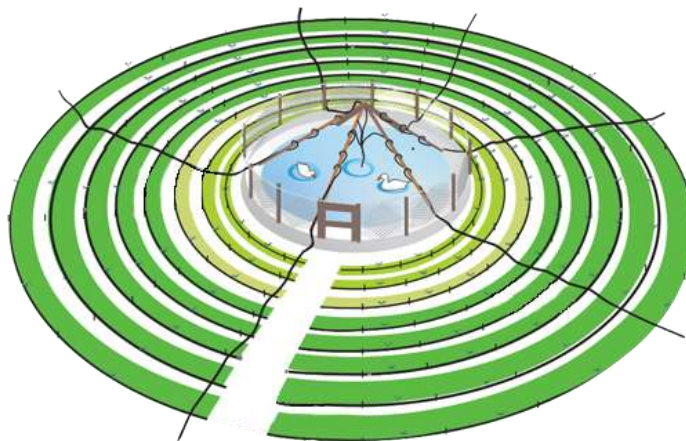
O projeto Mandalla surge como uma iniciativa da Agência Mandalla DHSA, que é uma organização da sociedade civil de interesse público (OSCIP), criada por Willy Pessoa, administrador de empresas com formação holística¹ e por um grupo de jovens universitários, em 2002, no estado da Paraíba, região Nordeste do Brasil. O objetivo do projeto é de assegurar o desenvolvimento harmonioso das comunidades rurais, através de uma agricultura familiar sustentável (AGÊNCIA MANDALLA, 2012).

Cada unidade é composta por estruturas circulares, que têm no máximo 2.500 m² de área e são formadas por círculos concêntricos de culturas irrigadas, por onde circulam animais executores de várias funções, o que fortalece o crescimento racional do sistema. O produtor pode explorar, na área de uma Mandalla, até 54 culturas vegetais e dez tipos de criações de animais (KÜSTER *et al.*, 2006).

¹ Holística é uma palavra de origem grega (Holos) que significa total (inteiro).

A Mandalla é um sistema integrado de produção agrícola que na irrigação, comparado a um sistema normal, economiza em 20% a água utilizada (AGÊNCIA MANDALLA, 2012). Sua topologia vem com o intuito de aproveitar melhor o espaço e assim concentrar a irrigação (ver figura 4).

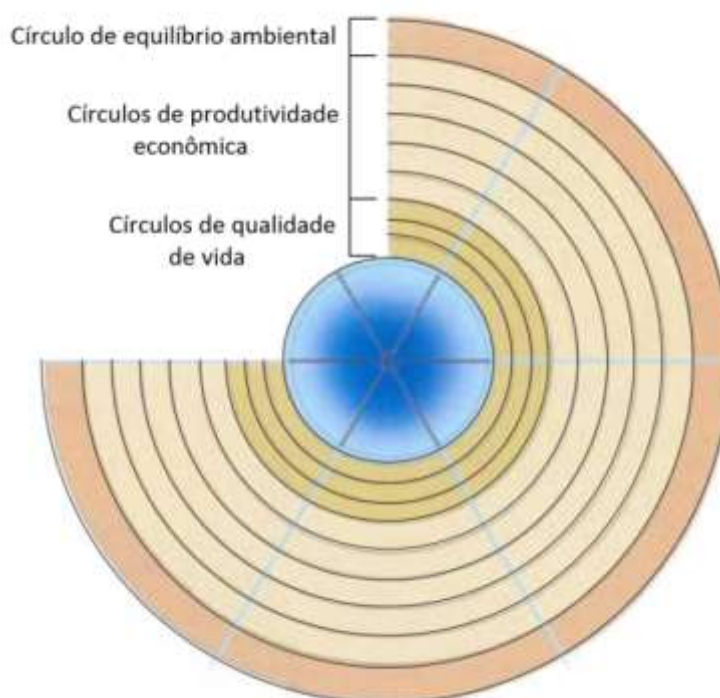
Figura 4: Sistema Mandalla



Fonte: AGÊNCIA MANDALLA (2012)

A figura 5 ilustra que os três círculos mais internos, são denominados de Círculos de Melhoria da Qualidade de Vida, porque atendem à subsistência da família. Os cinco círculos que se seguem, são Círculos da Produtividade Económica, destinados ao cultivo de culturas complementares diversas em que seu cultivo se destina à produção em escala para o sistema associativo de agro-industrialização e mercado justo. O último círculo da Mandalla é denominado de Círculo do Equilíbrio Ambiental e define a proteção do sistema. Ali são implantadas cercas vivas e quebra-ventos. Além da proteção têm por objetivo prover parte da alimentação animal.

Figura 5: Círculos da Mandalla



Fonte: KÜSTER *et al.*(2006)

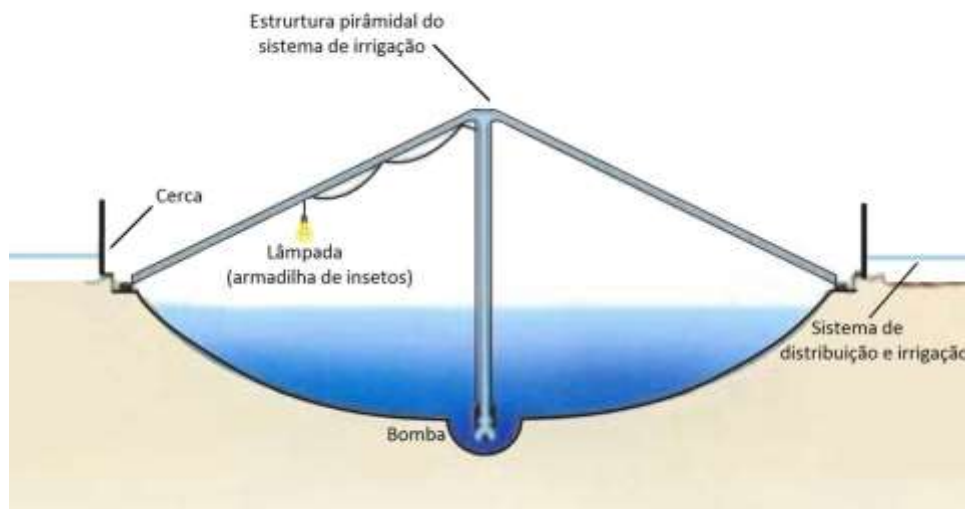
No centro da Mandalla está o reservatório de água, com formato circular de 6 a 12 metros de diâmetro, um perfil côncavo e profundidade central de até 1,85 metros. Sua capacidade de armazenamento é de até 30 mil litros de água, organicamente enriquecida pela criação de patos marrecos e peixes.

A figura 6 ilustra uma estrutura piramidal formada por seis caibros suspensos para suportar uma pequena bomba de água submersa, ou centrífuga, com capacidade de bombeamento de 2000 litros por hora. De cada caibro parte uma linha mestra de distribuição de água que alimenta mangueiras. Registros de gaveta controlam a distribuição alternada de água.

Pendurada em uma das seis pernas da pirâmide, uma lâmpada atrai insetos à noite para afastá-los das plantas, fazendo-os cair na água alimentando os peixes e patos. Ao longo das linhas mestras, estão distribuídos gotejadores de garrafas pet². O restante da área é irrigada por seis círculos de mangueiras com microaspersores feitos de cotonetes de ouvido. O gasto de água é de oito mil litros por semana, 20% a menos do que o de um sistema convencional de irrigação (KÜSTER *et al.*, 2006)

² Garrafas PET: são garrafas feitas de polímero termoplástico (Garrafas plásticas de água, Coca-Cola...)

Figura 6: Estrutura do sistema de irrigação



Fonte: KÜSTER *et al.*(2006)

2.2 ENERGIA SOLAR E SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A energia solar é a fonte primária de todas as fontes de energia. A irradiação solar que atinge a atmosfera terrestre pode ser decomposta de diferentes formas para fins de análise. Para o aproveitamento FV, a de maior interesse é a irradiância global horizontal, que quantifica a irradiância recebida por uma superfície plana horizontal [W/m^2]. Ela é composta pela irradiância difusa horizontal e pela irradiância normal direta. Em dias nublados, a principal parcela é a da difusa, enquanto que em dias claros prevalece a direta (PINHO & GALDINO, 2014).

Estudos mostram que, dois a três anos de medição local permitem estimar a média de longo termo para a irradiância global com margem de erro de 5% (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2012).

A medição da irradiância solar, tanto global como das componentes direta e difusa, é efetuada pelo piranômetro e o pireliômetro respectivamente. Os dados resultantes das medições são reduzidos a valores médios para diversas escalas de tempo (minuto, hora, dia mês) e variabilidades sazonais. Na avaliação comparativa dos dados leva-se em conta o seguinte:

- 1) Para um dado mês ou ano, o que tiver maior média em princípio é melhor;
- 2) Para um dado mês ou ano, o local com maior variância precisará de maior sistema de armazenamento (PINHO & GALDINO, 2014).

As aplicações práticas da energia solar são: energia solar FV, que consiste no aproveitamento da energia solar para a conversão direta em energia elétrica de corrente contínua através de células FVs; a outra aplicação prática consiste na energia solar térmica, explorada através de coletores planos e concentradores (ANONYM, 2003).

Os sistemas FVs (SFVs) consistem numa tecnologia baseada na conversão da irradiância solar em energia aproveitável (PINHO & GALDINO, 2014). Normalmente, eles são divididos em duas categorias: a) SFVs isolados (SFVI) e b) SFVs conectados a rede (SFVR); ambos podem operar com uma combinação de outras fontes de energia criando a chamada fonte híbrida (SFVH).

Os SFVI dividem-se em: individuais, os que alimentam uma única unidade consumidora; e/ou em mini redes, os que alimentam um pequeno grupo de unidades consumidoras. Na maior parte das vezes, os SFVs necessitam de um sistema de armazenamento de energia; geralmente usam-se bancos de baterias, quando existir necessidade de uso de aparelhos elétricos no momento em que não há disponibilidade de irradiância solar.

No caso de sistemas FVs de bombeamento de água, o sistema de armazenamento de energia é realizado na forma da energia potencial, por meio de tanques. Mas numa aplicação direta da água como em casos de pequenas irrigações, várias vezes dispensa-se o uso de armazenadores de energia.

Módulo fotovoltaico

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

As células FVs são elementos responsáveis pela conversão direta da energia solar em energia elétrica e são feitas de material semi-condutor. O semicondutor mais usado para a produção das células FVs é o silício (Si). Três formas de silício são largamente usadas no mercado: o monocristalino, que tem maior rendimento e elevado custo, o policristalino, que tem rendimento e custo intermédios e o silício amorfo que tem baixo rendimento e baixo custo. Componentes como o Gálio Arsénico, Disseleneto de cobre e índio, Gálio assim como o Telureto de Cádmio, vêm conquistando seu espaço no mercado mundial de fabricação de células solares (PINHO & GALDINO, 2014).

O Si monocristalino e o policristalino lideram o mercado desde o ano 2000 com 81% da produção mundial e em 2011 atingiram 87,9% deste mercado. A máxima eficiência das células de Si em laboratório foi de 25%, para as células de uma única junção, 37% de eficiência; a tabela 3 mostra a eficiência de diferentes células FVs (GREEN *et al.*, 2014).

Tabela 3: Eficiência das melhores células FVs fabricadas em laboratório até 2012

	Tecnologia	Eficiência (%)
Silício	Monocristalino	25,0±0,5
	Policristalino	20,4±0,5
	Filmes finos transferidos	20,1±0,4
Compostos III A –VA	GaAs (filme fino)	28,8±0,9
	GaAs (policristalino)	18,4±0,5
	InP (monocristalino)	22,1±0,7
Calcongênios Compostos II B –VI	CIGS (CuIn _x , Ga(1-x)Se ₂ (filme fino)	19,6±0,6
	CdTe (filme fino)	18,3±0,5
Silício amorfo/nanocristalino	Amorfo (a-Si) (filme fino)	10,1±0,3
	Nanocristalino (nc-Si)	10,1±0,2
Células sensibilizadoras por corantes		11,9±0,4
Células orgânicas (filme fino)		10,7±0,3
Multijunção	InGaP/GaAs/InGaAs	37,7±1,2
	a-Si/nc-Si/ne-Si (filme fino)	13,4±0,4

Fonte: GREEN *et al.* (2013)

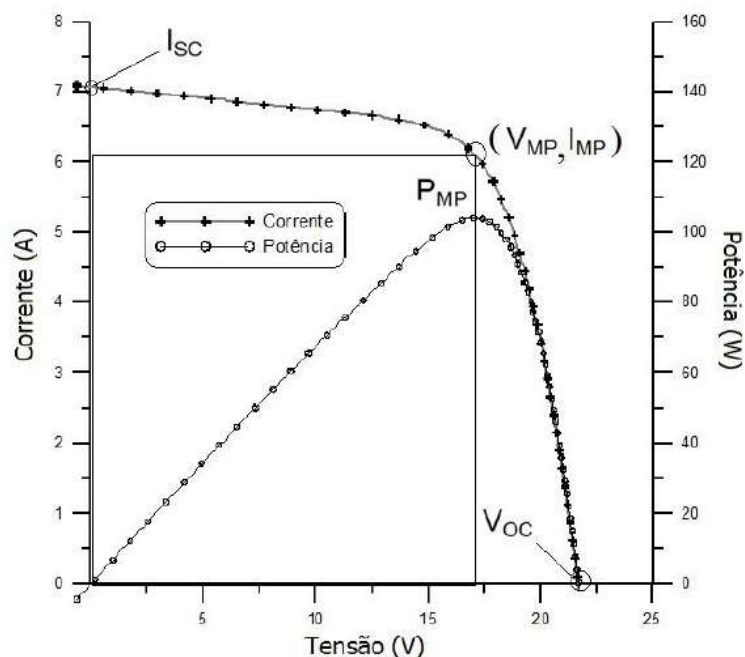
- **Características elétricas dos módulos fotovoltaicos**

Os módulos FVs são definidos pela potência elétrica de pico (Wp) dada pelo fabricante em condições padrão de teste (1000 W/m² de irradiância, coeficiente de massa de ar de 1,5 AM e temperatura de 25° C na superfície da célula).

Os módulos FVs caracterizam-se por uma curva característica (*I-V*), que apresenta os seguintes parâmetros: tensão do circuito aberto (V_{OC}), corrente de curto-circuito (I_{SC}), ponto de máxima potência (P_{MP}), factor de forma (FF) e rendimento. A figura 7 indica as principais características do módulo FV (BORGES NETO & CARVALHO, 2012).

A característica completa do módulo é determinada através do traçado da curva característica *I-V*.

Figura 7: Curva característica $I-V$ e curva de potência $P-V$ para um módulo com potência nominal de 100Wp



Fonte: GREEN *et al.*,(2013)

Para cada ponto na curva $I-V$, o produto corrente-tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação. A figura 7, também mostra a curva de potência em função da tensão, que identifica o ponto com o máximo valor de potência, gerados a partir da tensão e da corrente de máxima potência (V_{MP} e I_{MP}), conhecido como ponto de máxima potência (P_{MP}).

Factor de Forma (FF) - esta é uma grandeza que expressa, o quanto a curva característica se aproxima de um retângulo. Quanto melhor a qualidade das células dos módulos, mais próximo da forma retangular será a curva característica. A equação 1 permite o cálculo do FF (BORGES NETO & CARVALHO, 2012).

$$FF = \frac{I_{MP} \cdot V_{MP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (1)$$

O rendimento (η) do módulo FV indica quanto da energia solar incidente no módulo FV é transformada em energia elétrica. Quando este número é determinado nas condições-padrão de ensaio, a potência luminosa incidente no módulo pode ser calculada multiplicando a irradiância (G) pela área do módulo (A_M). A equação 2 apresenta o cálculo do rendimento do módulo.

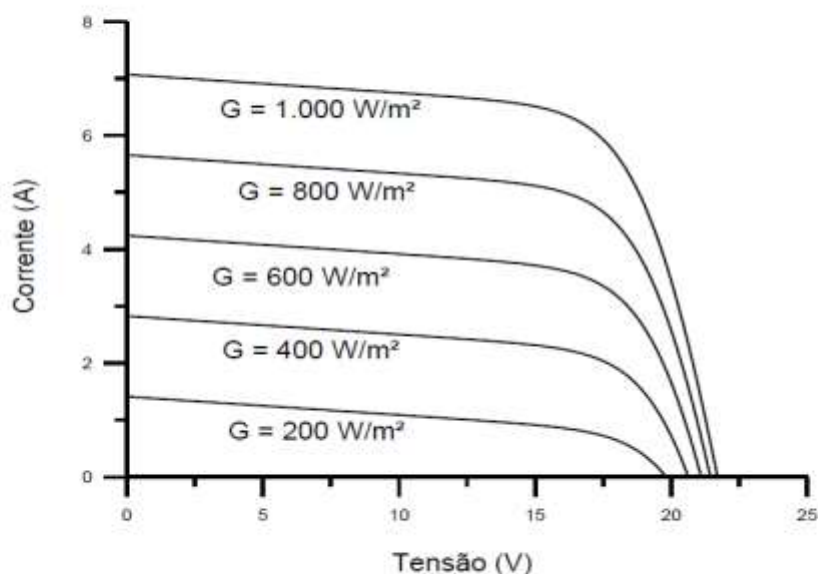
$$\eta = \frac{P_{MP}}{G \cdot A_M} * 100\% \quad (2)$$

- *Fatores que influenciam o rendimento dos módulos fotovoltaicos*

O desempenho dos módulos é fundamentalmente afetado pela irradiância solar e a temperatura das células. A corrente gerada no módulo é directamente proporcional a irradiância solar, mantendo a temperatura constante (ver figura 8). Por outro lado, o aumento da temperatura nas células faz com que o rendimento do módulo caía, baixando os pontos de máxima potência gerada, para uma irradiância constante (ver figura 9).

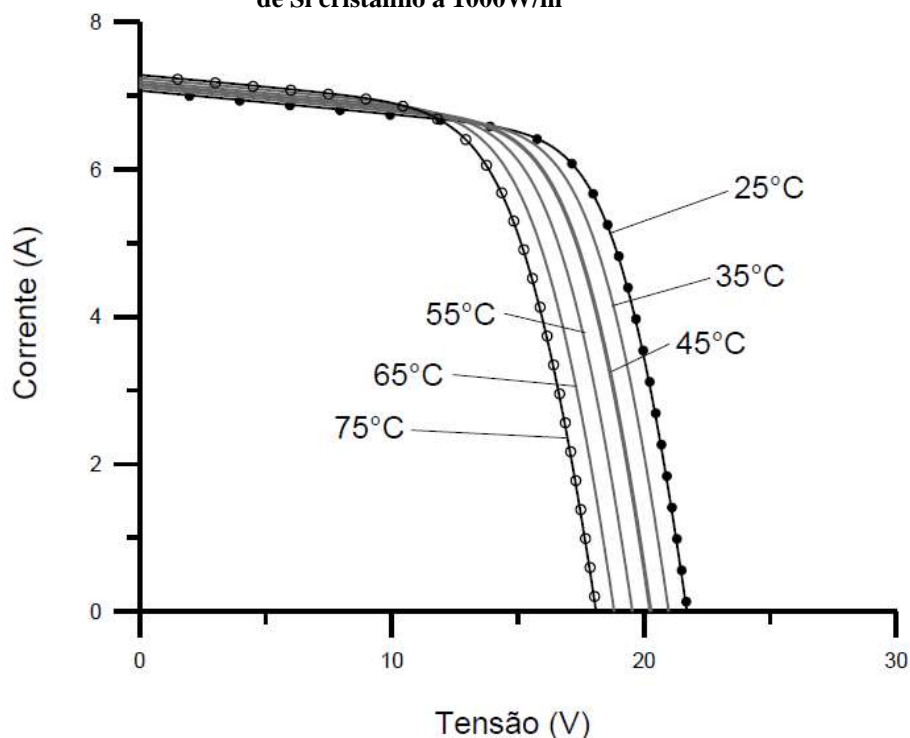
Outros fatores como a área do módulo, o ângulo de incidência solar, perdas nas ligações eléctricas das células, incompatibilidade das características eléctricas, tipo de célula, contribuem para reduzir o rendimento global das células e/ou módulo.

Figura 8: Efeito causado pela variação da irradiância solar sobre a curva característica do módulo de Si cristalino (temperatura constante)



Fonte: PINHO & GALDINO (2014)

Figura 9: Efeito causado pela variação da temperatura das células sobre a curva característica do módulo de Si cristalino a 1000W/m^2



Fonte: PINHO & GALDINO (2014)

2.2.1 Sistemas fotovoltaicos aplicados no bombeamento de água para irrigação

Os sistemas de bombeamento de água são classificados de acordo com a fonte energética que aciona o sistema e as características técnicas do sistema; existem basicamente cinco tipos de sistemas de bombeamento usados na irrigação de culturas (VALER MORALES, 2011).

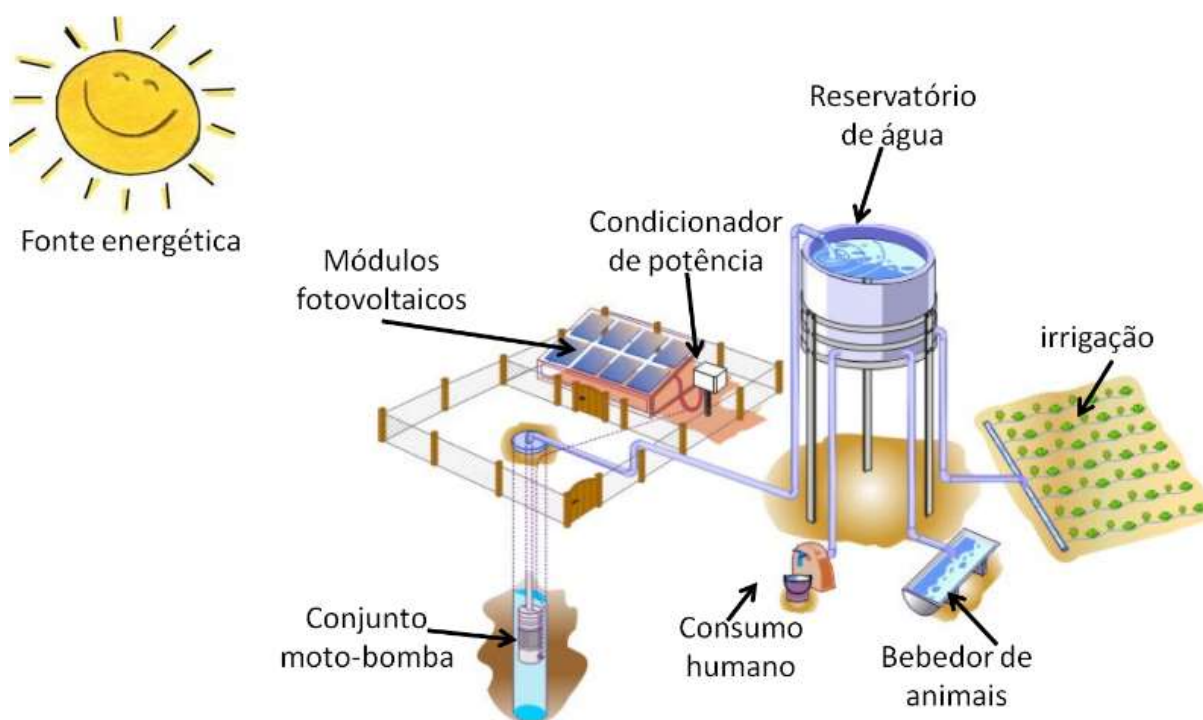
- a) Sistemas fotovoltaicos de bombeamento;
- b) Sistemas eólicos de bombeamento;
- c) Sistemas de bombeamento ligados a rede elétrica convencional;
- d) Sistemas de bombeamento acionados por motores de combustão interna;
- e) Sistemas de bombeamento manual.

Em alguns casos por razões do caráter intermitente de algumas fontes ou da complexidade de cada sistema, fontes híbridas (combinação de duas ou mais fontes) são adotadas para o acionamento de alguns sistemas de bombeamento.

Os sistemas FVs de bombeamento, geralmente consistem de uma área de módulos FVs, sistema de bombeamento (motobomba), sistema de condicionamento de potência (inversor, controlador da bomba) e sistema de armazenamento (opcional), ver figura 10. Estes

sistemas são projetados especialmente para o bombeamento de água de poços, lagoas, rios e açudes e são semelhantes aos sistemas convencionais, com a diferença básica de que o acionamento do motor da bomba é feito por módulos FVs.

Figura 10: Diagrama de um sistema fotovoltaico de bombeamento



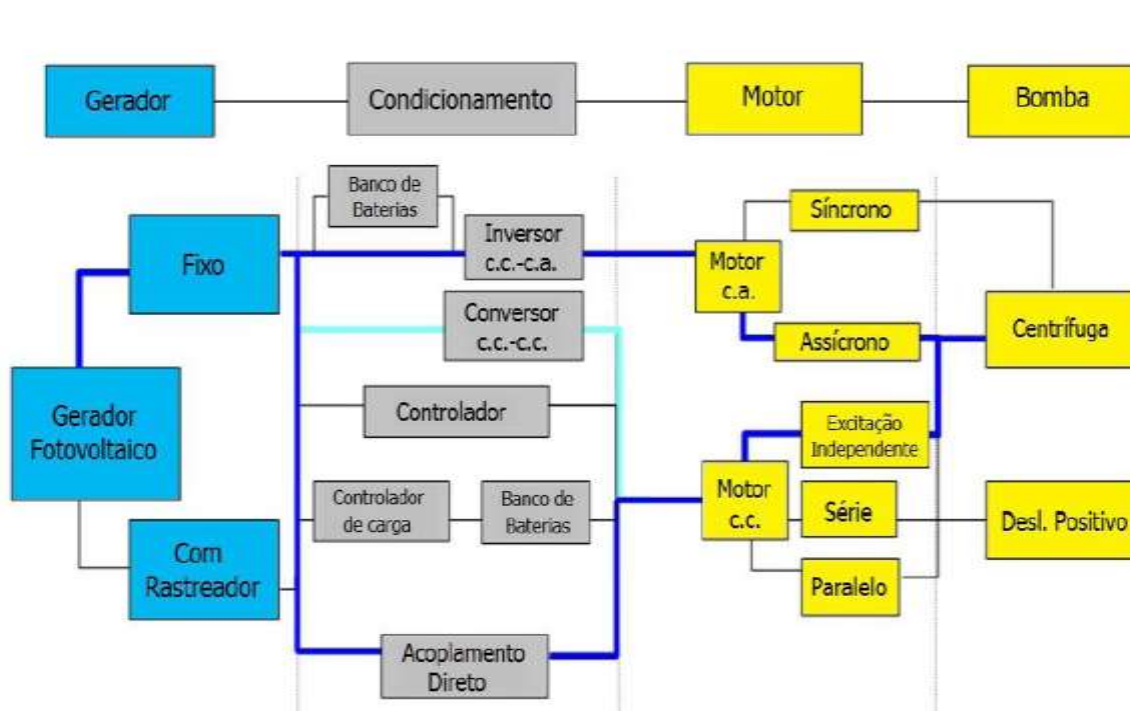
Fonte: Modificado do arquivo gráfico do Laboratório de Sistemas FVs – IEE/USP (2011)

A água bombeada por estes sistemas na maior parte das vezes destina-se ao uso em sistemas de irrigação, bebedouro de animais, uso doméstico, sistemas de reuso de água da chuva e áreas de proteção animal.

Os sistemas FVs de bombeamento levam vantagens sobre outras tecnologias, devido a independência da fonte de combustível, baixa necessidade de manutenção de seus equipamentos, relativa facilidade de instalação e deslocamento, longa vida do gerador, operação autônoma, perfeita adequação das épocas de maior recurso energético e maior demanda de água, são de fácil limpeza e amigas do meio ambiente (CHILUNDO *et al.*, 2014).

Algumas configurações mais usadas em sistemas FVs de bombeamento são apresentadas na figura 11. Para baixas potências (até 250 kWp) são usadas com frequência bombas de deslocamento positivo de diafragma ou ainda bombas centrífugas de um ou poucos estágios. Em casos de maiores potências, são usadas bombas centrífugas multi-estágios e de deslocamento positivo helicoidal (PINHO & GALDINO, 2014).

Figura 11: Configurações utilizadas em sistemas FVs de bombeamento



Fonte: (PINHO & GALDINO, 2014) modificado de KONER (1993) & MALBRANCHE *et al.*(1994)

2.2.2 Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água

O dimensionamento de um sistema FV de abastecimento de água, consiste na determinação da dimensão de um sistema que satisfará as necessidades do usuário com mínimos custos totais de investimento atendendo às questões técnicas específicas de cada projeto (PINHO & GALDINO, 2014).

Inúmeros parâmetros devem ser tomados em conta, a começar da demanda hídrica, características geológicas do local até o nível da irradiância solar incidente, que por sua vez depende de variáveis meteorológicas. Esta tarefa envolve antropólogos, sociólogos, engenheiros agrônomos, ambientais e eletricitistas qualificados. Tal conduta visa reduzir os custos de investimento inicial e encontrar um ponto ótimo de funcionamento do sistema como um todo.

O uso de programas de simulação como o PV* Sol e o PVS permite resolver problemas de dimensionamento e otimização de sistemas FVs. Para o caso específico de sistemas FVs de bombeamento de água foi desenvolvido na Universidade de Bundeswehr, Munique-Alemanha um instrumento de desenho e simulação, o DASTPVPS. Estes programas são muito usados por projetistas em casos complexos, principalmente nos sistemas conetados

à rede, avaliando configurações mais eficientes, visando atender questões técnicas e econômicas. Para tais casos o método empírico e a experiência na área não são suficientes. No caso de sistemas autônomos, HAHN (1998) aconselha o uso do método aritmético simples sempre que as hipóteses sejam razoáveis, baseados na relação entre o gerador FV, acumulador de energia e as cargas (PINHO & GALDINO, 2014).

Segundo FEDRIZZI (2003) em casos de simulações as ferramentas informáticas precisam ser alimentadas por vários parâmetros diferentes, podendo conduzir a resultados diferentes em função das distantes aproximações dos parâmetros usados, uma vez que muitos deles dependem de leis estatísticas, o que implica um certo grau de incertezas.

- ***Parâmetros de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água***

Para FEDRIZZI (2003), independentemente da ferramenta usada para dimensionar o sistema FV de bombeamento, é preciso definir pelo menos os seguintes parâmetros, ainda que seja por estimativas:

- Demanda de consumo de água e energia;
- Natureza estocástica da irradiação solar;
- Características do recurso hídrico;
- Sazonalidade do ciclo hidrológico;
- Regime do bombeamento e
- Reposição do manancial

FRAIDENRAICH & COSTA (1998) recomendam que a partir de determinada quantidade de irradiação diária [G (W/m^2)] e das características da fonte de água, se dimensiona um sistema tal, que permita o abastecimento da demanda [Q (l/h)] considerando a altura manométrica total [H (m)].

- ***Determinação da demanda hídrica e energia hidráulica***

Segundo Narvarte (2001), a experiência acumulada de anos de eletrificação rural deixa claro que a adequação do empreendimento a demanda dos usuários é uma questão a ser equacionada, visto que o consumo produtivo varia em função das especificidades do local e

das culturas. A demanda hídrica da cultura depende do clima e o do estágio de desenvolvimento.

A evapotranspiração³ da cultura (Etc) é obtida através da equação 3, geralmente é expressa em unidades de mm/unidade de tempo.

$$Etc = Et_0 \cdot k_c \quad (3)$$

- Et_0 - Valor de evapotranspiração de referência em condições ótimas, sem limitação de água (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011a). (ver anexo 1, tabela B₁).
- k_c ⁴ - Coeficiente de cultura (ver anexo 1, tabela B₂).

O valor da necessidade líquida de irrigação (NLI) consiste na diferença da precipitação efetiva (Pe) e o valor de evapotranspiração de referência (Etc), equação 4.

$$NLI = E_{TC} - P_E \quad (4)$$

O consumo médio mensal (Vc) em m³/mês é obtido através da equação 5:

$$Vc = \frac{10 \cdot NLI \cdot A}{Ei} \cdot 100 \quad (5)$$

- A - área irrigada em hectares [ha].
- NLI- necessidade líquida de irrigação [mm/mês].
- Ei - eficiência de irrigação [%].

Segundo VALER MORALES (2011) a eficiência da irrigação por microaspersão varia de 75 á 90%, gotejamento de 85 á 90% e tubos perfurados 65 á 80%.

Para casos em que não se dispõe de um valor exato de consumo de água, a tabela 4 fornece resultados ilustrando informações de consumo de água por atividade.

³ Evapotranspiração: consiste na perda de água do solo por evaporação e a perda de água na planta por transpiração.

⁴ Coeficiente de cultura (K_C): É a razão entre a evapotranspiração máxima e a evapotranspiração de referência.

Tabela 4: Estimativa de consumo médio de água por uso final, em litros

Consumo humano	litro/pessoa. dia	Consumo animal	litro/cabeça. dia	Cultivo	litro/ha.dia
Sobrevivência	5	Gado (leite)	70	Horta para subsistência	25.000
Grandes centros urbanos	10 -100	Gado (corte)	40	Banana	46.500
Pequenas propriedades rurais	40 -70	Ovino/caprino	5	Milho	50.000
-	-	Suíno	15	Feijão	48.000
-	-	Esquino	40	Amendoim	47.000

Fonte: Modificado de VALER MORALES (2011)

Energia hidráulica:

A energia hidráulica é calculada a partir da equação 6. Esta depende do volume de água diário e da altura manométrica total.

$$E_h = Q_d \cdot H \cdot \frac{\rho \cdot g}{3600} = 2,725 \cdot Q_d \cdot H [Wh / dia] \quad (6)$$

- Q_d - volume diário projetado (m^3/dia);
- H - altura manométrica total (m);
- ρ - densidade da água ($1000 \text{ kg}/m^3$ á 0° c e 1 bar);
- g - aceleração de gravidade ($9,8m/s^2$).

Para calcular a altura manométrica total, devem ser consideradas a altura manométrica de recalque e a altura manométrica de sucção. Quando significativas, as perdas de carga na tubulação e nas conexões devem ser tomadas em conta. Normalmente estas perdas são dadas pelos fabricantes dos tubos e conexões, (ver anexo 2).

Altura manométrica de recalque: é a distância vertical da linha central da bomba ao ponto mais alto de descarga, consideradas as perdas na tubulação de recalque.

Altura manométrica de sucção: é a distância do desnível do líquido no poço de sucção com a linha central de sucção da bomba.

Potência do gerador fotovoltaico:

A energia elétrica (E_{EL}) exigida diariamente pelo processo de bombeamento é calculada através de.

$$E_{EL} = \frac{E_h}{\eta_{MB}} \quad (7)$$

- E_h é a energia hidráulica
- η_{MB} o rendimento do motobomba.

A eficiência típica dos conjuntos motobomba em sistemas FVs de bombeamento é de 25%. A tabela 5 ilustra valores de algumas configurações de motobombas.

Tabela 5: Eficiências de motobombas em sistemas FVs de bombeamento

Tipo de motobomba	Eficiência (%)
Centrífuga de superfície	25
Centrífuga de superfície	15
Submersível	25
Submersível ou de deslocamento positivo	35
Deslocamento positivo	45

Fonte: SANDIA, (1991)

Segundo VALER MORALES (2011), a potência do gerador FV (P_{FV}) é dada em W_p pela equação 8:

$$P_{FV} = 1,25x \frac{E_{EL}}{(HSP)_\beta} \quad (8)$$

Onde o HSP é o número de horas de sol pleno ou seja horas em que a média diária da radiação tem intensidade de 1000 W/m^2 . No caso do Nordeste brasileiro a HSP é de cerca 5,7 horas. O valor encontrado pela equação 8 deve ser ajustado de maneira que o gerador possa fornecer a tensão e corrente de trabalho da motobomba escolhida.

- ***Recurso Solar no Nordeste Brasileiro***

A existência de dados confiáveis sobre o recurso solar, permite estimar com maior precisão a produção elétrica dos sistemas FVs para bombeamento. O ideal é utilizar valores médios de séries históricas onde o projeto será implantado. Para o caso do Brasil, essas fontes são o Atlas de irradiação solar no Brasil, o Atlas solarimétrico do Brasil (TIBA, 2000) e o Atlas Brasileiro de energia solar (PEREIRA *et al.*, 2006). Tais fontes indicam que a região Nordeste, tem um valor de irradiação global diária, média anual de $5,9 \text{ kWh/m}^2$.

Nos sistemas FVs para bombeamento de acoplamento direto (motor DC), existe uma relação direta entre a irradiância solar (G) e o volume de água bombeada (V), indicando que um sistema FV de bombeamento requer um limiar de nível de irradiância (WICKLE & ALACHE, 2008) para iniciar o bombeamento, valor este que varia de um sistema para o outro.

A incidência da irradiância solar influencia diretamente na energia entregue à carga e conseqüentemente no volume de água bombeada. Desta forma uma quantidade mínima de horas de operação deve ser garantida de modo a garantir o suprimento hídrico da unidade. O número de horas que o sistema pode operar depende das características do sistema (potência mínima para o acionamento da bomba e a área dos módulos FVs).

Segundo, CARVALHO *et al.*,(2004) a irradiância mínima para o acionamento de motobombas de 12 VCC é de 300 W/m^2 . Foi apresentado o perfil da irradiação mensal, na forma de energia [$\text{kWh/m}^2/\text{dia}$] média disponível em cada mês, no Nordeste brasileiro, calculada a partir de dados de irradiância [kW/m^2] e do período de medição [h]. O menor nível de irradiação ocorreu no mês de Fevereiro ($2,97 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$) e o maior no mês de Setembro ($6,56 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$).

Dados de períodos contínuos máximos diários com irradiância solar acima de 300 W/m^2 referentes ao mês de Setembro de 2003 indicaram no mínimo um período contínuo acima de 300 minutos (5h). Em Fevereiro de 2004 apenas por 7 dias houve período contínuo de 300 minutos (5h), porém em pouco menos da metade dos dias do mês (13 dias) houve ao menos um período contínuo maior que 200 minutos (3h20 minutos).

- ***Sistema de armazenamento de água***

Nos sistemas FVs de bombeamento a capacidade do reservatório de água (autonomia do sistema) é determinada pelo tipo de abastecimento (humano, animal, irrigação) e pelas restrições financeiras do empreendimento.

Um sistema FV de bombeamento padrão só funciona no período diurno. Para que o serviço de abastecimento de água não fique prejudicado nos períodos de baixa irradiância solar, é preciso atentar para a autonomia do sistema. A presença de um reservatório e a natureza estocástica da fonte de energia, requerem considerar o acoplamento horário disponível entre a vazão e períodos que exista necessidade de complementar a água bombeada para o atendimento de uma demanda plena.

- ***Escolha do conjunto motobomba***

Para baixas potências (até 250 Wp) são usadas com frequência bombas de deslocamento positivo (volumétricas) de diafragma ou ainda bombas centrífugas de um ou poucos estágios. Em casos de maiores potências, são usadas bombas centrífugas multi-estágios e de deslocamento positivo helicoidal (PINHO & GALDINO, 2014).

As bombas centrífugas quanto as volumétricas, podem ser accionadas por motores de corrente contínua (CC) ou de corrente alternada (CA). A sua escolha é determinada pelo volume de água necessária, potência requerida para atingir a altura manométrica desejada, custo e tipo de instalação (NARVARTE & LORENZO, 2010).

Os motores CC, de alguma forma adequam-se facilmente em sistemas FVs de bombeamento de acoplamento direto, por sua compatibilidade com a energia gerada pelo módulo FV (energia elétrica em CC). Os motores CC para bombeamento de água geralmente são de menor potência, comumente disponíveis em valores inferiores a 10 CV.

2.2.3 Estado da arte sobre sistemas fotovoltaicos de bombeamento

Segundo a *European Photovoltaic Industry Association* (2014), a capacidade instalada acumulada mundial em geração FV até 2013, era de 102 MWp. Para o caso específico do Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica, pretende instalar 23,6 MWp de

potência, até o ano de 2015 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2012), o que eleva a 40 MWp a potência FV instalada no País (ABINEE, 2012).

Informações sobre projetos desenvolvidos com base em sistemas FVs de bombeamento de água para consumo humano no mundo e no Brasil são diversas; no entanto, para sistemas de produção agrícola não há muita informação disponível (VALER MORALES, 2011).

Cerca de 150 000 sistemas FVs de bombeamento foram instalados até o ano de 2010; cada sistema com potência média de 800 Wp, uma altura manométrica média em torno de 60 mca e uma vazão de 40 m³/dia (NOGUEIRA, 2009).

Para o caso específico do Brasil, até o ano 2002, haviam sido instalados 3.291 sistemas fotovoltaicos de bombeamento (FEDRIZZI, 2003), destes, 32 foram aplicados diretamente a produção agrícola (VALER *et al.*, 2010).

A título de exemplo algumas experiências a nível mundial e do Brasil de sistemas FVs de bombeamento aplicados na área de irrigação são descritos a seguir:

Entre 1979 e 1981, uma parceria entre o *Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento* (PNUD), o *Banco Mundial* e a *ONG Intermediate Technology Development Group* (ITDG), realizaram um projeto para avaliação de pequenos sistemas FVs de irrigação (100 a 300 Wp), usados em pequenas unidades agrícolas no Mali, Filipinas e Sudão (HALCROW, 1984).

Entre 1998 e 2002, a *Agência de Cooperação Alemã* (GTZ, atualmente GIZ), iniciou o programa *Photovoltaic Pumping Irrigation Pilot Project*, onde foram instalados 90 sistemas FVs no Brasil, Jordânia, Indonésia, Argentina, Filipinas e Zimbábue, totalizando 180 kWp (GTZ, 2003, 2008). O Programa Regional Solar (PRS) para o abastecimento de água com energia solar para oito países da região Saariana, instalou 1040 sistemas FVs de bombeamento, com potência total de 1,3 MWp (FEDRIZZI & SAUER, 2002).

Segundo o *Photovoltaic Water Pumping Program*, foram implantados em Marrocos com o apoio da União Européia, cerca de 50 sistemas FVs para bombeamento, totalizando 173 kWp, com a finalidade de abastecer água potável para as comunidades e parte da água excedente é usada para a prática da agricultura de subsistência (NARVARTE & LORENZO, 2010).

No Brasil os primeiros usos de sistemas de energia solar FV em modo autônomo remontam à década de 1980. Desde então, o programa mais relevante de eletrificação rural no país, usando fontes renováveis, foi o chamado Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM), que entrou em operação em 1994. O objetivo deste

programa era fornecer energia elétrica às pessoas, que vivessem em comunidades rurais e remotas não conectadas à rede elétrica convencional.

O programa foi realizado durante quatro anos; os sistemas FVs foram utilizados prioritariamente em três tipos de aplicações comunitárias: sistemas escolares, bombeamento de água e iluminação pública. No período mencionado cerca de 9.000 sistemas foram instalados, com uma potência total de 5 MWp (500 Wp de potência padrão para cada sistema). Desde 2004 o PRODEEM foi integrado a outro programa de eletrificação governamental, o Luz Para Todos, descrito no capítulo um. (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011a).

No estado do Ceará, Fortaleza, a ONG Instituto Joazeiro de Desenvolvimento Sustentável, instalou um sistema FV no Centro de Referência em Alimentação Sustentável para o Combate à Desnutrição Infantil e outro no Centro de Referência em Agricultura Sustentável, incentivando a prática da agricultura urbana, ver figura 12 (Instituto Joazeiro de Desenvolvimento Sustentável, 2014).

Figura 12: Curso de capacitação em agricultura urbana para combate à desnutrição



Fonte: <http://www.institutojoazeiro.org.br/projeto>

Considerando os parâmetros de dimensionamento para sistemas FVs de bombeamento de água, ODEH *et al.*, (2006) realizaram na Jordânia, estudo de um sistema FV para o bombeamento de água com potência de 4,5 kWp, acionando uma bomba centrífuga. Os autores avaliaram alguns parâmetros que afetam o desempenho do sistema FV de bombeamento como: a variação da altura manométrica, a quantidade de fluido extraído, a frequência de distribuição da irradiância e a dimensão dos módulos FVs. Para valores de

irradiância que vão de 100 a 500 W/m² obtiveram volumes horários de 1000 a 3000 litros de água bombeada a uma altura manométrica fixa de 24 m.

KOLLING *et al.*,(2004) avaliaram o comportamento de um sistema FV de bombeamento de água com acoplamento direto, sob diferentes condições de irradiância solar e submetido a diferentes alturas manométricas. O sistema foi composto de uma motobomba SHURFLO, modelo 2088, acionada por um módulo FV. Os autores concluíram que a potência útil gerada pelo módulo e a vazão fornecida pela motobomba estão diretamente relacionadas à irradiância solar e à altura manométrica. A vazão média diária encontrada variou de 6,52 a 10,91 l/min.

DE ANDRADE *et al.*,(2008) analisaram um sistema FV de bombeamento de água, com potência instalada de 15 módulos de 75 Wp cada, acionando uma bomba centrífuga. O sistema em causa bombeou 7.900 l/dia de água a uma altura manométrica de 35 m e 12.000 l/dia, a uma altura manométrica de 18 m.

ABDOLZADEH & AMERI,(2009), usaram uma bomba de superfície de deslocamento positivo com motor de ímã permanente, acoplado a dois módulos FVs (90 Wp) de Si policristalino para avaliar o perfil de bombeamento em função da irradiância solar. Os autores conseguiram obter uma vazão média de 479 l/h entre as 8 h e 16 h do dia de teste, para valores de irradiância solar que foram de 400 W/m² (8h) a 1000 W/m² (as 11:30 h).

Estudo realizado por FIASCHI *et al.*, (2005) mostrou que para uma área FV de 30 m² e um poço profundo de 100 m, usando uma bomba submersível comercial para a extração da água do poço, o preço de água encontrado foi de 1,8 R\$/m³.

CAPÍTULO III: DESCRIÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DESENVOLVIDO

3.1 Descrição da área de estudo

A Unidade agrícola acionada por energia solar FV foi instalada no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Agricultura Urbana (NEPAU) e desenvolvida através do Laboratório de Energias Alternativas (LEA), situado no Campus do PICI da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Fortaleza - CE / Brasil, com coordenadas UTM de latitude: 3° 44' 15" S e longitude: 38° 34' 23" W.

A unidade foi instalada com o apoio do Instituto Joazeiro, com objetivo de avaliar a viabilidade do uso de sistemas FVs para bombeamento de água para produção de alimentos e incentivar o aproveitamento de espaços subutilizados em ambientes urbanos (escolas, quintais) através da prática da agricultura familiar de forma a prover alimentos orgânicos e espaços verdes dentro das cidades; em simultâneo dispor ao agricultor rural ferramenta para uma produção contínua e estável de alimentos mesmo em períodos sem chuva com melhor aproveitamento do recurso hídrico dos açudes e poços aplicado à irrigação e dispor de uma fonte alternativa descentralizada de geração de energia elétrica.

Para a aquisição e análise dos dados, foi usado o método de cálculo analítico e o método experimental, apoiados por diversas técnicas e meios de processamento de dados.

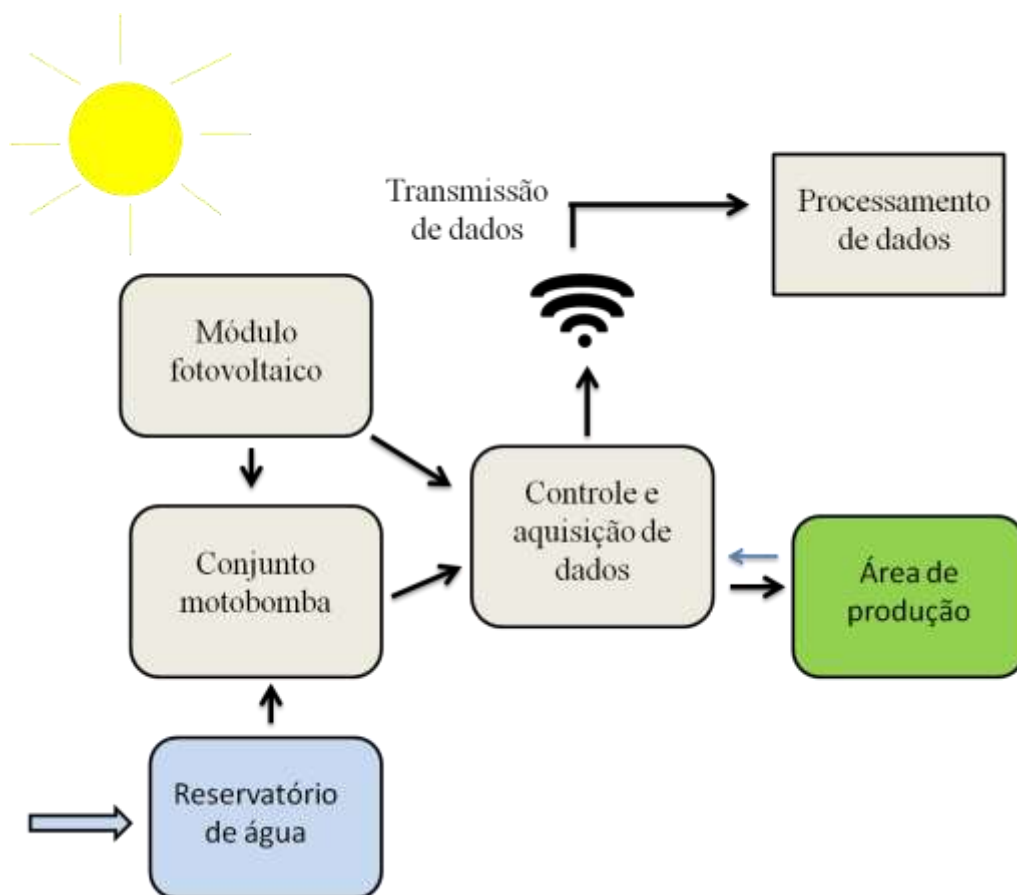
3.2 Descrição da unidade de produção de alimentos desenvolvida

A unidade é composta por quatro sub-unidades:

- 1) Suprimento de energia elétrica;
- 2) Bombeamento;
- 3) Aquisição, controle e monitoramento de dados;
- 4) Produção agrícola.

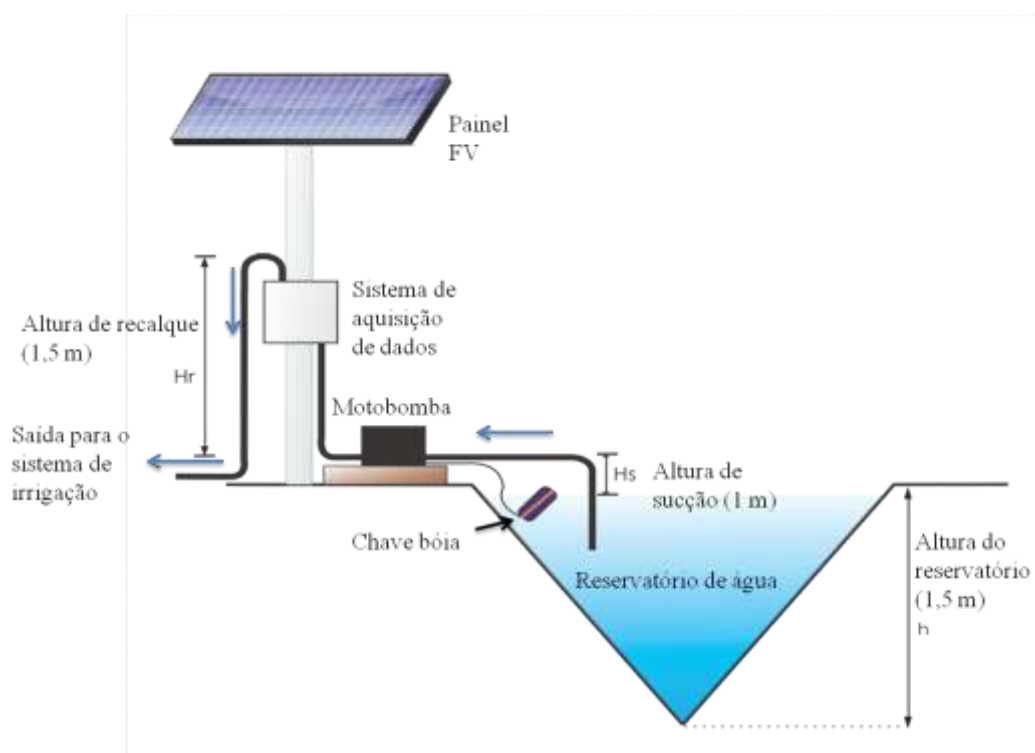
As figuras 13 e 14 representam a unidade instalada através do diagrama de blocos e modelo esquemático desenvolvido, respetivamente.

Figura 13: Diagrama de blocos da unidade desenvolvida



Fonte: Própria autora (2014)

Figura 14: Diagrama esquemático do sistema instalado com principais componentes



Fonte: Própria autora (2014)

3.3 Descrição dos materiais e equipamentos

Subunidade 1: Gerador fotovoltaico

Para suprir a demanda de eletricidade da unidade, foi usado um módulo FV de células policristalinas da marca EXXA SOLAR modelo CSUN 135-36P com área de 0,992 m². A produção média mensal deste painel é de 16,88 kWh/mês e eficiência energética de 13,6%, ver figura 15 e tabela 6, ver anexo 3 (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, 2011).

Figura 15: Painel FV CSUN 135-36P



Fonte: Própria autora (2014)

Tabela 6: Especificações técnicas do painel CSUN 135 – 36P

PARÂMETRO	VALOR
Potência máxima	135 Watts
Tensão de máxima potência	18,7 Volts
Corrente de máxima potência	7,72 Amperes
Garantia	20 Anos
Cor	Alumínio

Especificações técnicas para condição padrão (1000 W/m² a 25°)

Fonte: EXXA GLOBAL (2014).

Subunidade 2: Conjunto motobomba e reservatório de água

Conjunto motobomba

A escolha do conjunto motobomba depende da finalidade do sistema, potência requerida para atingir a altura manométrica desejada, volume de água e capacidade financeira. Foi escolhida a bomba de deslocamento positivo do tipo diafragma, acionada por um motor de ímã permanente de 12 volts CC. As bombas de deslocamento positivo são indicadas para operar de forma lenta e eficiente durante todo o dia para vazões na faixa de 0,3 a 40 m³/dia e alturas manométricas de 10 a 500 metros.

As bombas de deslocamento positivo ou de diafragma são robustas, de baixo custo e consumo energético. As principais vantagens do uso dela residem no acoplamento direto com o módulo FV (para potências de 50 a 400 Wp) reduzindo os custos efetivos, a capacidade de operar em sobretensão; em ambientes urbanos especificamente é silenciosa; para o caso de aplicação em Mandallas, não perturba o ambiente natural dos peixes e patos marrecos dentro do reservatório. Foi utilizado na presente pesquisa, o conjunto motobomba SHURFLO 8000, ver figura 16. A tabela 7 mostra o desempenho típico do grupo motobomba utilizado, instalado junto ao reservatório de água.

Figura 16: Conjunto motobomba Shurflo 8000



Fonte: Própria autora (2014)

Tabela 7: Especificações do desempenho da motobomba shurflo 8000

Pressão (psi)	Vazão (l/min)	Rotação (RPM min/max)	Corrente (Ampere)	Tensão (Volts)
Aberto	6,6	2290/2315	3,1	12 VCC
10	6,3	2225/2255	3,4	
20	5,9	2170/2205	4,2	
30	5,6	2130/2155	4,9	
40	5,2	2045/2085	5,6	
50	4,9	2020/2024	6,9	
60	4,6	1893/1970	7,2	

Fonte: SHURFLO (2014)

Reservatório de água

Seguindo o modelo de canteiros circulares, construiu-se um reservatório superficial com diâmetro de 4 metros e profundidade de 1,5 metros no centro da unidade de produção (canteiros), uma vez que os canteiros possuem formato circular (ver figura 17). A capacidade do reservatório é de 3.534 litros de água. Este formato foi adotado pensando em ambientes urbanos e rurais, visto que é comparado a um açude, lago, poço ou represa artificial, cuja água é bombeada do reservatório e é aplicada diretamente à área de produção, reduzido os custos de aquisição e elevação de um tanque.

No presente trabalho a construção do reservatório exigiu força humana para escavar a terra e cimento para impermeabilizar o reservatório. A desvantagem deste tipo de reservatório reside no fato de que quando não há sol, não é possível bombear água para irrigar ou usar a força de gravidade, mas para sistemas de irrigação esta desvantagem é compensada, pois nos dias em que não há sol (por chuva ou céu nublado) a necessidade de irrigar também é reduzida, variando o nível da umidade do solo de uma cultura para a cultura.

Figura 17: Reservatório superficial de água

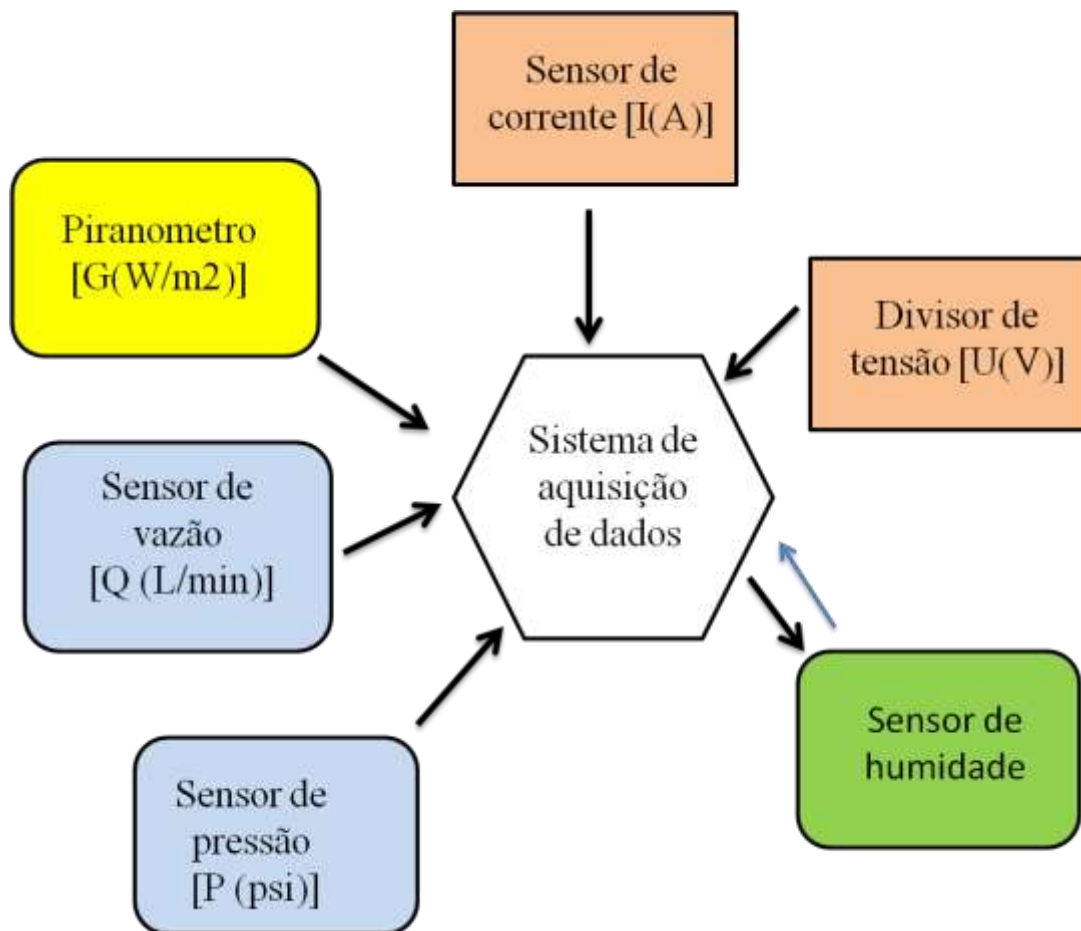


Fonte: Própria autora (2014)

Subunidade 3: Aquisição, controle e monitoramento de dados

Um quadro metálico foi afixado ao poste metálico de 3 metros de altura que sustenta o módulo FV. O quadro contém elementos de aquisição e transmissão de dados. Os dados são medidos por meio de diversos sensores e posteriormente coletados pelo sistema *SanUSB* e um controlador lógico programável (CLP). Os dados coletados pelo sistema *SanUSB* são transmitidos e monitorados via *wi-fi* enquanto que os coletados pelo CLP, no caso a irradiância o sistema supervisorio através do *elipse SCADA* permite o interface com o computador, que é a ferramenta responsável pelo armazenamento dos dados para posterior análise e validação. As variáveis lidas no sistema são: vazão, pressão, tensão, corrente, irradiância e umidade do solo (ver figura 18).

Figura 18: Diagrama do sistema de aquisição de dados



Fonte: Própria autora (2014)

Sensor de vazão

Os valores de vazão são coletados por um sensor de fluxo volumétrico SU7000, (ver figura 19), interligado à saída do grupo motobomba, emitindo um sinal de saída entre 0 a 10 V. O sensor tem uma tensão de alimentação que varia de 19 a 30 VCC, com faixa de medição de 0 a 50 litros por minuto e resolução mínima de 0,1 litros. Ver detalhe em IFM ELECTRONIC (2010a).

Figura 19: Sensor de vazão

Fonte: Própria autora (2014)

Sensor de Pressão

O valor da pressão na saída da bomba é coletado através do sensor de pressão PN2024, ver figura 20a. Semelhantemente ao sensor de vazão, o sinal de saída vai de 0 a 10 V, sua tensão de alimentação varia de 20 a 30 VCC, e faixa de medição de -14,5 – 145 psi. Ver detalhe em IFM ELECTRONIC (2010b). Foi usado um manômetro adicional para medir a pressão no último microaspersor da linha, para verificar o número de microaspersores a serem ligados em simultâneo (ver figura 20b).

Figura 20: Sensor de pressão

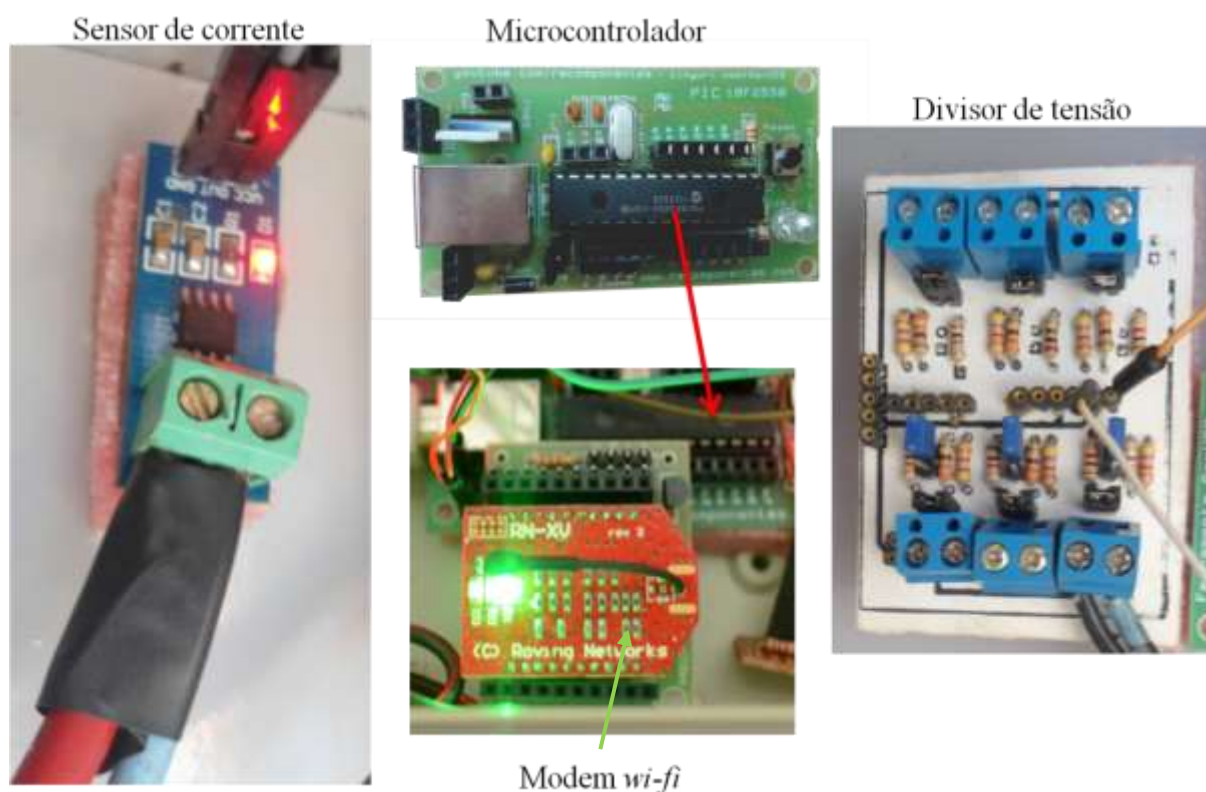
Fonte: Própria autora (2014)

Figura 20b: Manômetro

Sensor de corrente, divisor de tensão e microcontrolador

A placa FV tem uma V_{MP} de 18,7 V, mas o sistema supervisor lê valores de 0 até 5 V e 0 a 5 Amperes, para tal foi instalado um divisor de tensão com a função de atenuar o valor de tensão para se ajustar ao sistema de aquisição. O valor da corrente foi lido através de um sensor de corrente específico (ver figura 21).

Figura 21: Sensor de corrente e divisor de tensão acoplados ao sistema SunUSB



Fonte: Própria autora (2014)

Supervisor SanUSB

A ferramenta SanUSB com o microcontrolador, PIC 18F2550, adquire dados de tensão, corrente, pressão e vazão e os envia via *wi-fi* através do modem RN171-XV ligado às saídas do microcontrolador (ver figura 21). Optou-se pela transmissão via *wifi* pela facilidade no acesso e monitoramento dos dados. O sistema usado para monitoramento e transmissão de dados é composto por componentes de baixo custo (cerca de 100R\$) obtidos no mercado

brasileiro e pode substituir sistemas tradicionais de coleta de dados como o CLP e datalogger, que tem custos relativamente elevados.

Fora a vantagem da redução de custos, o sistema adotado permite o acesso remoto de dados, a partir de qualquer computador e local, bastando estar conectado a internet e entrar na página do Google desenvolvida, por meio de um programa de acesso livre. O sistema surge como uma experiência inovadora, desenvolvida por JUCÁ (2014). A figura 22 ilustra a tela do sistema supervisorio de monitoramento de dados.

Figura 22: Tela do sistema supervisorio desenvolvido para monitorar dados da placa SanUSB

	A	B	C	D	E
1	Indicação de data e hora	VAZÃO	PRESSÃO	TENSÃO	CORRENTE
6596	18/08/2014 15:49:05	6.59	10.44	15.29	3.08
6597	18/08/2014 15:49:18	6.49	10.63	15.35	3.06
6598	18/08/2014 15:49:35	6.24	11.05	13.43	3.08
6599	18/08/2014 15:49:42	6.55	10.63	15.37	3.08
6600	18/08/2014 15:49:50	6.43	11.24	14.77	3.08
6601	18/08/2014 15:49:57	6.38	10.82	13.24	3.06
6602	18/08/2014 15:50:06	6.37	10.92	14.77	3.07
6603	18/08/2014 15:50:21	6.36	10.31	15.23	3.05
6604	18/08/2014 15:50:30	6.68	10.73	14.77	3.07
6605	18/08/2014 15:50:42	6.04	10.31	14.54	3.06
6606	18/08/2014 15:50:57	6.40	10.63	15.02	3.07
6607	18/08/2014 15:51:08	6.31	10.38	12.89	3.07
6608	18/08/2014 15:51:11	6.38	9.51	13.88	3.06
6609	18/08/2014 15:51:22	6.22	10.03	12.99	3.06
6610	18/08/2014 15:51:33	6.05	10.15	14.69	3.05
6611	18/08/2014 15:51:44	6.33	10.63	15.04	3.06
6612	18/08/2014 15:52:09	6.01	10.25	15.27	3.04
6613	18/08/2014 15:52:09	5.83	9.87	15.04	3.06
6614	18/08/2014 15:52:18	6.57	10.22	12.79	3.04
6615	18/08/2014 15:52:28	5.80	9.77	13.34	3.05
6616	18/08/2014 15:52:39	6.22	10.19	15.77	3.05
6617	18/08/2014 15:53:10	6.11	10.06	12.91	3.03

Fonte: Própria autora (2014)

Piranômetro

Um piranômetro modelo RTF/82 – 05, instalado no LEA, lê valores de irradiância solar global em W/m^2 , ver figura 23. Os valores são coletados por meio de um supervisorio instalado no LEA, que utiliza um CLP como protocolo de comunicação através do *software*

*Eclipse Scada*⁵, responsável por captar e armazenar os dados a cada minuto em um computador, ver figura 24, que ilustra a tela de aquisição de dados de irradiância.

Figura 23: Piranômetro RTF/82 - 05



Fonte: Própria autora (2014)

Figura 24: Tela do computador para à aquisição de dados da irradiância solar



Fonte: Própria autora, (2014)

⁵ SCADA – supervisory control and data acquisition

Sensor de umidade do solo

Para o sucesso de qualquer atividade agrícola, seja de pequeno ou grande porte, é importante controlar a umidade do solo a fim de garantir o aproveitamento eficiente da água para as culturas. Em atividades agrícolas de pequeno porte, como é o caso da produção de hortaliças e agricultura de subsistência este cuidado é de extrema importância para garantir boa produção e a manutenção da renda para os produtores; pois a falta de água pode causar a perda da cultura (por estresse hídrico) e o excesso pode significar em perdas por percolação, e também perdas de ingredientes por lixiviação do solo.

O sistema automatizado para irrigação é algo que já vem sendo explorado, mas a tecnologia aplicada para tal é de alto custo, tornando-se inviável para pequenos e médios agricultores. Assim, o sistema de acionamento foi desenvolvido com o objetivo de automatizar o processo de irrigação e otimizar a utilização da água para a irrigação, a um custo acessível.

O sensor de umidade utilizado da presente pesquisa é do tipo resistivo, possuindo três terminais, sendo um VCC (ligado a 5 V), um outro GND, corresponde ao terminal de terra e o último SIG que é o terminal que envia o sinal analógico em forma de tensão para indicar o nível de umidade do solo (ver figura 25).

Figura 25: Sensor de umidade do solo



Fonte: Própria autora (2014)

- **Acionamento da motobomba através do sensor de umidade do solo**

Devido ao caráter intermitente da irradiância solar, constatou-se que as variações do volume de água aplicado diariamente à unidade seriam frequentes. Pois, em dias nublados o nível de irradiância solar é menor conseqüentemente o volume de água bombeado é menor mas em compensação o nível de evaporação da água é lento comparativamente aos dias ensolarados, permanecendo o solo úmido por mais tempo e demandado menor quantidade de água e energia. O sensor de umidade permitiu o controle do nível de umidade do solo e a quantidade de água injetada no solo.

- ***Lógica Implementada e simulação computacional***

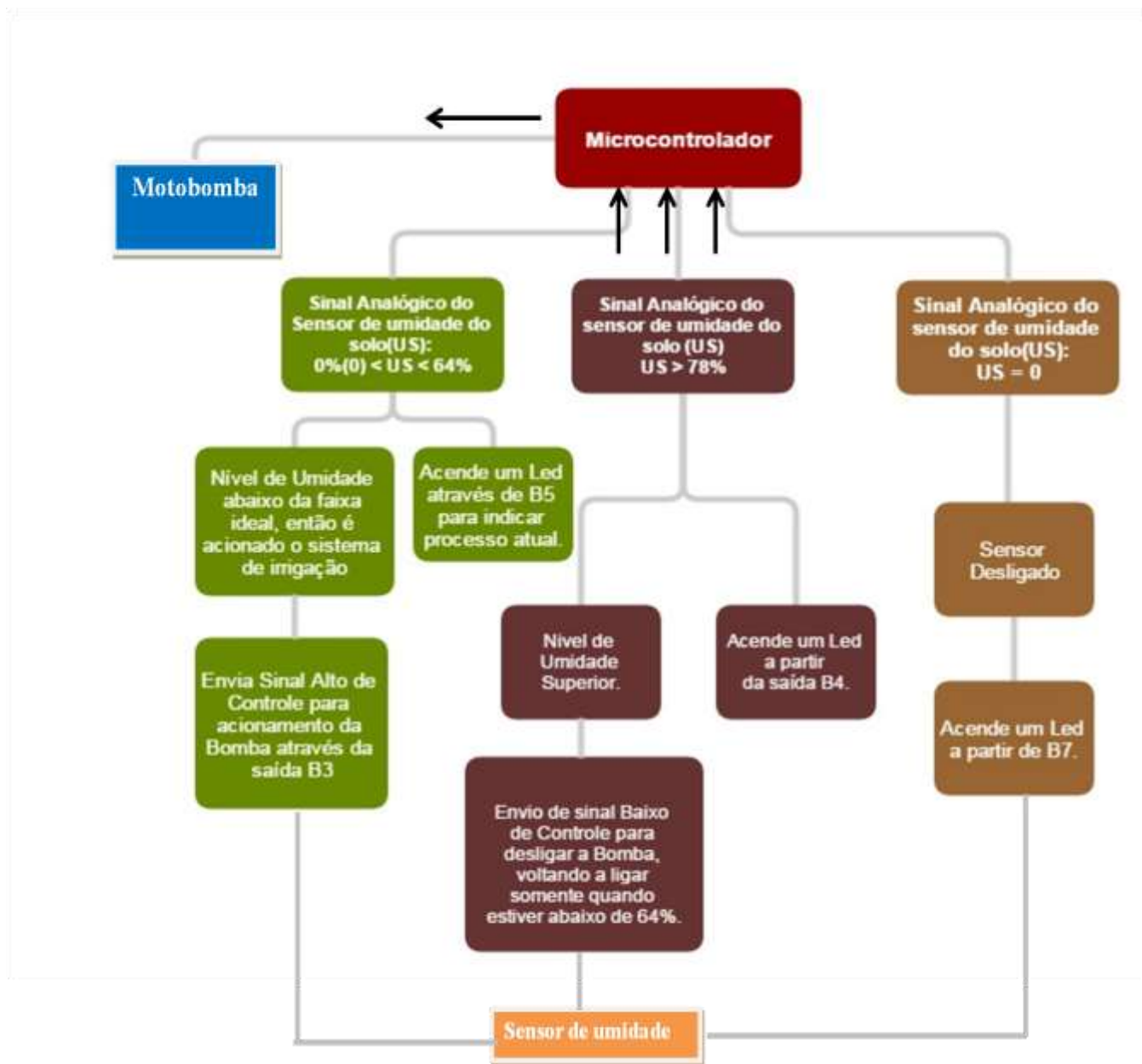
Com a finalidade de controlar o acionamento do sistema de irrigação foi elaborada uma lógica para a programação do microcontrolador a partir do sensor de umidade do solo. A lógica desenvolvida baseia-se na leitura do sinal de tensão do sensor ao microcontrolador e o envio do sinal do microcontrolador à motobomba. A figura 26 ilustra o diagrama da lógica implementada e a tabela 8, os valores calibrados do sensor.

Tabela 8: Calibração do sensor de umidade

	Mínimo	Máximo
Tensão de alimentação [VCC]	5	
Tensão de saída [V]	0	5
Nível de umidade do solo [%]	0	100
Calibração da umidade do solo [%]	64	78
Tensão de saída calibrados [V]	3,2	3,75

Fonte: Própria autora (2014)

Figura 26: Diagrama da lógica de acionamento implementada



Fonte: Própria autora (2014)

Os valores de umidade foram implementados a partir do estudo do comportamento da curva característica do sensor, em que o sinal de alimentação é de 5 VCC, e tensão de saída varia de 0 a 5 V. Quando o sinal de tensão emitido pelo sensor de umidade estiver abaixo de 3,2 V (63%) a bomba é acionada e opera até que se atinja o nível de umidade de 78 %, correspondente a 3,75 V emitidos pelo sensor de umidade em que a bomba é desligada automaticamente.

Foi realizada a simulação computacional para o teste da lógica implementada antes da instalação do circuito. Na simulação, foi utilizado um potenciômetro para simular o sensor de umidade. A figura 27 ilustra o sensor de umidade enviando sinal de umidade do solo com valor abaixo do desejado e a figura 28 ilustra o diagrama esquemático que representa o estado ligado da motobomba.

Figura 27: Sensor de umidade do solo indicando 63% na simulação computacional

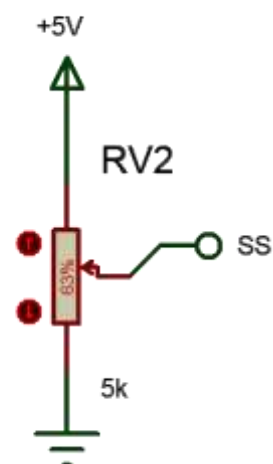
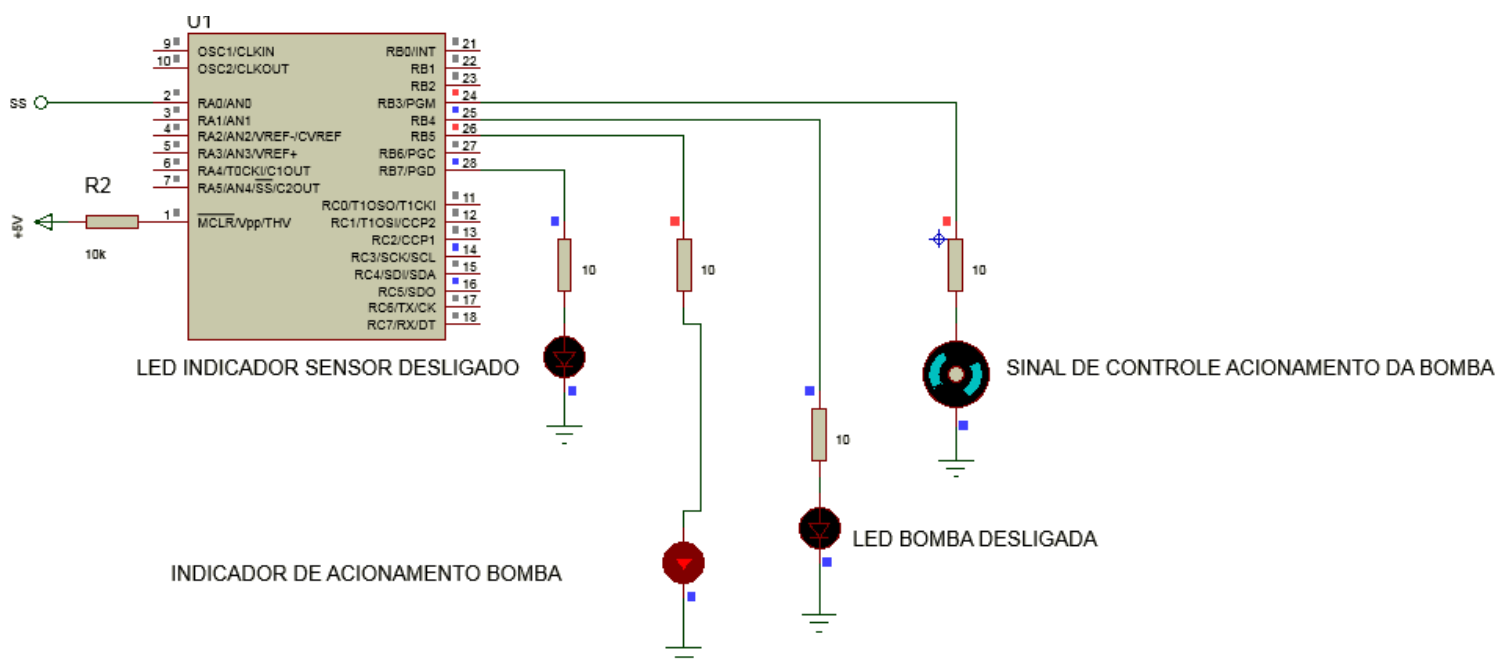


Figura 28: Diagrama esquemático da simulação representando situação de umidade do solo abaixo do limite ideal (US = 63%)



Fonte: Própria autora (2014)

A figura 28 ilustra o resultado da simulação em que o sinal de controle (B3) está no nível lógico alto, indicando que a bomba está ligada, ou seja, o sistema de irrigação está acionado. Pois com o sinal de controle alto, o relé permite que a tensão vinda do módulo chegue até à motobomba, através do chaveamento dos contatos. Observa-se também, que o led (B5) reforça a informação de que a bomba está ligada, para evitar possíveis incidentes. A figura 29 faz parte do circuito instalado para o acionamento da motobomba que ilustra o LED B5 aceso, indicando o estado de operação da motobomba acionado através do sensor de umidade instalado.

Figura 29: Led B5 (cor branca) aceso, indicando motobomba ligada



Fonte: Própria autora (2014)

A figura 30 ilustra o sensor de umidade enviando sinal de umidade do solo com valor acima do desejado e a figura 31 ilustra o diagrama esquemático que representa o estado desligado da motobomba.

Figura 30: Sensor de umidade do solo indicando 79% na simulação computacional

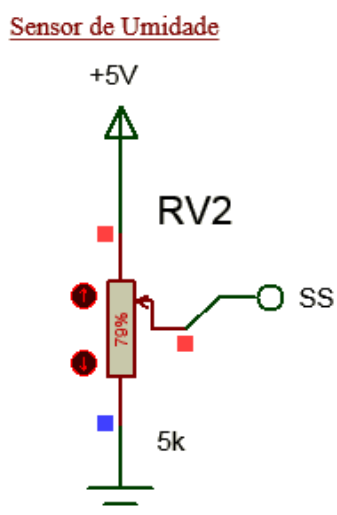
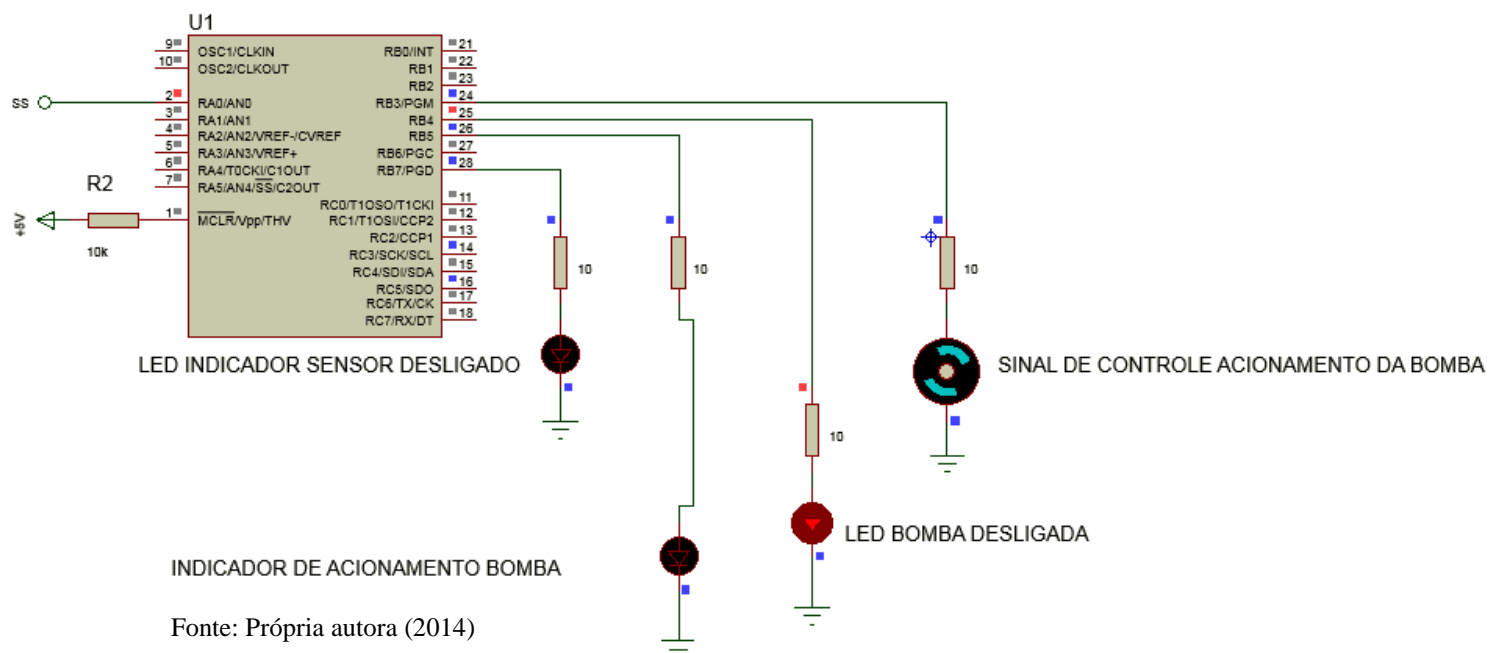
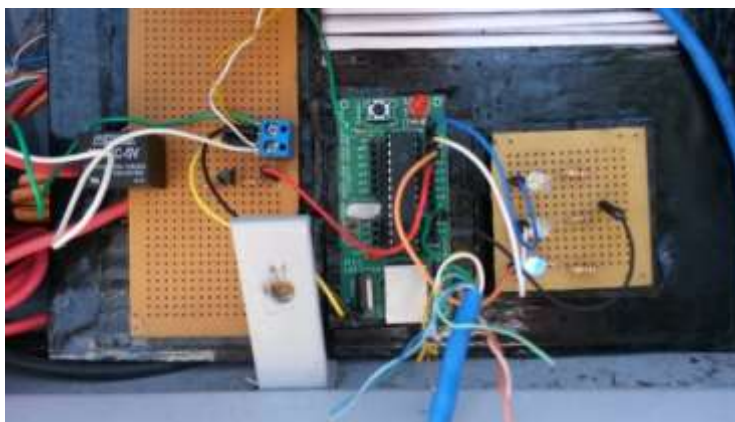


Figura 31: Diagrama esquemático da simulação representando situação de umidade do solo acima do limite ideal ($US = 79\%$)



Na figura 31 pode-se observar que o sinal de controle emitido por B3 está em nível lógico baixo (cor azul), ou seja, a bomba está desligada. Portanto o relé interrompe a alimentação vinda do módulo para a bomba, através do chaveamento dos contatos. Pode-se observar também que o led (B4) que indica que a bomba está desligada está aceso. Esta situação ocorre após o nível de umidade do solo alcançar a situação limite máximo. O circuito instalado indicando a situação de bomba desligada é ilustrado na figura 32, em que o led azul (B4) está aceso.

Figura 32: Led B4 (cor azul) aceso, indicando motobomba desligada



Fonte: Própria autora (2014)

Dispositivos adicionais

Foi instalada uma chave bóia do tipo CB -2000, como dispositivo de auto controle de nível e proteção para casos de falha ou baixo nível de água no reservatório. A chave bóia é ligada em série com a bomba e com um disjuntor geral da unidade (ver figura 33a). As especificações técnicas da chave bóia podem ser vistas em OLIVEIRA (2011).

A bomba instalada é do tipo flutuante (sucção zero), mas na ficha técnica o fabricante (ver anexo 4) indica altura máxima de sucção de 3 metros. Por razões de segurança, a bomba foi instalada junto ao reservatório com elevação de 1 metro de altura protegida contra chuva e sol intenso. Também foi instalada uma válvula de pé ou de retenção, no terminal do cano de sucção, que pode ser vista na figura 33b. A válvula permite que a água tenha sentido unidireccional a fim de reter a coluna de água (escovada) quando houver paralisação da bomba, facilitando sua reactivação.

Devido ao acúmulo de lodo, desenvolvimento de algas, entrada de resíduos sólidos no reservatório, foi instalado um filtro da marca DOCOL junto a válvula de pé, para evitar o entupimento do sistema de irrigação (microaspersores) e da bomba.

Figura 33: Chave bóia



Fonte: Própria autora (2014)

Figura 33b: Válvula de pé e filtro

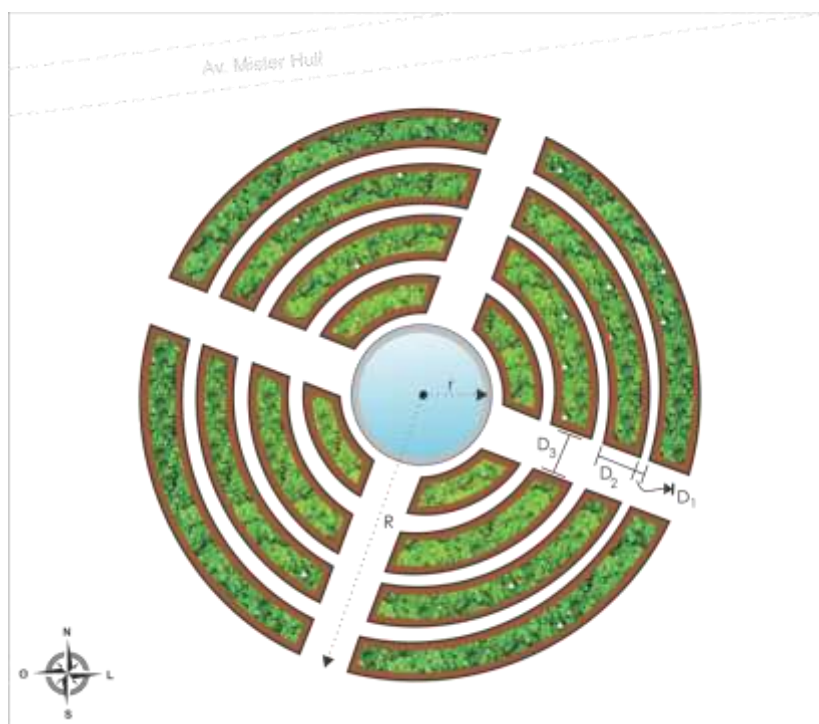


Apesar de não serem descritos de forma abrangente, alguns dispositivos indispensáveis para a operacionalização do sistema são mencionados a seguir: disjuntor, cabos de dados, sistema de internet, barras de sinais, eletrocalhas, canos e curvas PVC, conectores, entre outros equipamentos.

Subunidade 4: Área de cultivo e sistema de irrigação

A área de cultivo adotou o modelo de canteiros circulares, pelas vantagens mencionadas no capítulo dois. A área de cultivo máxima é de 134 m^2 , equivalente a 16 canteiros (ver figura 34); no presente projeto foram usados os dois círculos interiores.

Figura 34: Área máxima implantada para produção agrícola (134 m^2)

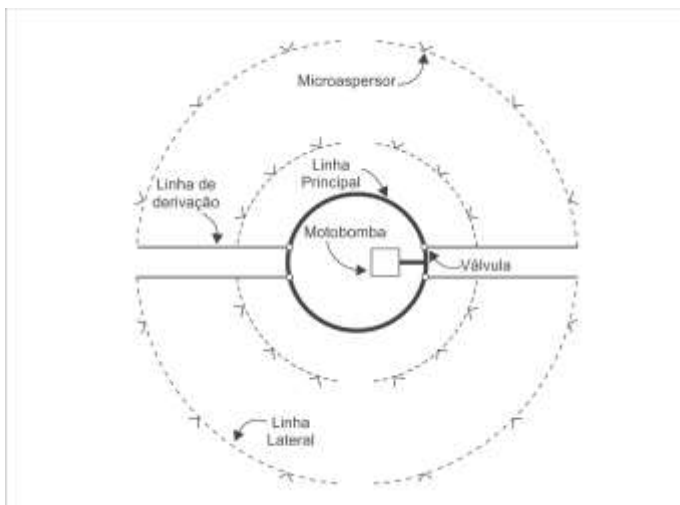


$$D_1 = 0,6 \text{ m}; D_2 = 1 \text{ m}; D_3 = 1 \text{ m}; R = 9,5 \text{ m}; r = 2 \text{ m}.$$

Fonte: Própria autora (2014)

Conforme exposto no capítulo dois, a escolha do sistema de irrigação leva em conta a viabilidade técnica, econômica e as condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas. Portanto, foi adotado na presente pesquisa o sistema de irrigação do tipo localizada, por microaspersão composta de uma linha principal circundando a borda do tanque de água, quatro linhas de derivação sendo uma para cada delta e oito linhas laterais, duas para cada delta acionadas através de válvulas (registros de gaveta). A figura 35 representa o sistema de irrigação.

Figura 35: Sistema de irrigação instalado

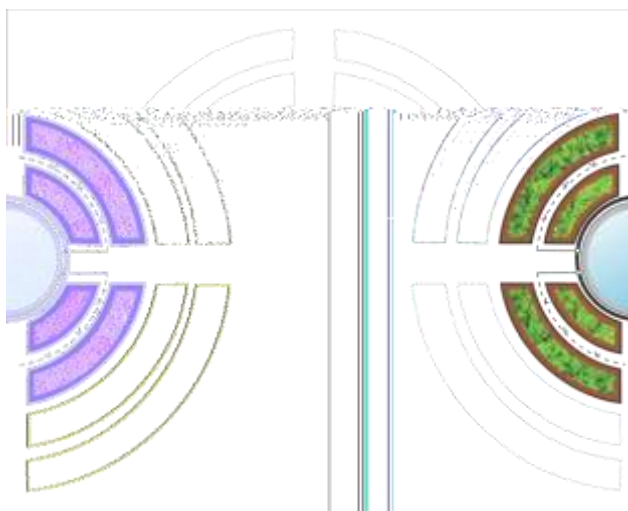


Fonte: Própria autora (2014)

Cada linha lateral contém três emissores do tipo microaspersor do tipo bailarina de cor bege, com vazão entre 37 l/h e 211,3 l/h, determinada pela pressão de trabalho. Os microaspersores foram distribuídos uniformemente pelas linhas laterais, sendo 3 microaspersores por linha de carga de 20 m totalizando 24 microaspersores instalados.

Na presente pesquisa, foram utilizadas as duas primeiras áreas circulares para o cultivo das hortaliças; os canteiros foram ocupados conforme figura 36. A área útil para este plantio é de 43 m² desta forma não foi necessária a ativação de todo o sistema de irrigação, o número de microaspersores ativos diminuiu pela metade e a linha lateral passou a ser a própria linha de derivação. A figura 37 mostra os microaspersores instalados em funcionamento e a figura 38 a unidade instalada.

Figura 36: Área útil explorada na presente pesquisa (43 m²)



Fonte: Própria autora (2014)

Figura 37: Microaspersores instalados em funcionamento



Fonte: Própria autora (2014)

Figura 38: Unidade de produção instalada



Fonte: Própria autora (2014)

3.4 Parâmetros calculados

Volume

$$V = \frac{Q[l/\text{min}]}{t[\text{min}]} \quad (9)$$

Em que:

- V – Volume em litros [l]
- t – tempo em minutos [min]
- Q – Vazão em litros por minuto [l/min]

Potência hidráulica

$$P_h = 2,725 \cdot Q_d \cdot H_{MT} \quad (10)$$

Em que:

- Q_d – volume diário projetado (m^3)
- H_{MT} - altura manométrica total (m)
- P_h – Potência hidráulica [W]

Altura manométrica

A altura manométrica (H_{MT}) é a soma da altura geométrica, com as perdas que ocorrem na tubulação de recalque e sucção transformadas em comprimento equivalentes (H_p), conforme NOGUEIRA (2009).

$$H_{MT} = H_g + H_p \quad (11)$$

Em que:

H_g – Altura de sucção + altura de recalque [m]

H_p – comprimento da linha de carga dividido por 10 { $H_p/10$ [m]}

Potência elétrica do motor

$$P = \frac{P_h}{\eta_{MB}} \quad (12)$$

- P – Potência elétrica do motor [W]
- η_{MB} – Eficiência do motobomba [%]

Potência solar sobre a área do módulo FV

$$H = G * A_M [W] \quad (13)$$

Onde:

- H – Potência solar [W]
- G – Irradiância solar global [W/m²]
- A_M – área útil do módulo FV [m²]

Energia solar disponível e energia elétrica consumida pelo motor

As transformações da energia disponível e energia consumida foram realizadas por meio das equações 14 e 15.

Energia solar disponível

$$E_d = H * t [Wh] \quad (14)$$

Energia elétrica consumida pelo motor

$$E_c = P * t \quad (15)$$

Em que:

- E_d – energia solar disponível [Wh]
- E_c – energia elétrica consumida [Wh]
- t – tempo [h]

Eficiências

O cálculo da eficiência global do sistema FV de bombeamento foi realizado em 3 etapas. As equações 16, 17 e 28 permitiram o cálculo da eficiência global do sistema FV de bombeamento instalado.

1) Eficiência do módulo FV

$$\eta_{FV} = \frac{P}{G * A_M} = \frac{V * I}{G * A_M} * 100 \quad (16)$$

- V – Tensão [V]
- I – Intensidade da corrente [A]
- η_{FV} – Eficiência do módulo FV [%]

2) *Eficiência da motobomba*

$$\eta_{MB} = \frac{P_h}{P} * 100 \quad (17)$$

3) *Eficiência global*

$$\eta_G = \frac{P_h}{G * A_M} * 100 \quad (18)$$

η_G – Eficiência global [%]

3.5 Condições de operação da unidade de produção agrícola instalada

Para efeito de estudo, foi cultivado o coentro cuja duração varia entre 40 e 50 dias. O coentro é uma erva condimentar e com propriedades medicinais, usada em todo o mundo. O coentro é altamente cultivado nos Estados Nordestinos, principalmente no Ceará (BEZERRA *et al.*, 2012).

A irrigação desta cultura em solos arenosos é realizada diariamente, podendo em alguns casos necessitar mais de uma irrigação por dia. A quantidade de água a ser aplicada depende do tipo e da umidade do solo para além da cultura.

Para a presente pesquisa, o Engenheiro agrônomo Edilson de Souza realizou o levantamento da demanda hídrica diária para o coentro, qualidade e certificação do solo e da água, adubação, método de irrigação adequado e o tempo de cultivo no caso o coentro, com ciclo de 44 dias (06 de Agosto a 19 de Setembro de 2014).

Foi usado o solo do tipo franco arenoso e pelas temperaturas médias de Fortaleza foram determinados 2 períodos de irrigação ao longo do dia sendo um no período da manhã e o outro no período da tarde. A demanda hídrica diária é de 800 litros, sendo 400 litros na primeira irrigação e os outros 400 litros na segunda.

Para o acionamento dos microaspersores uma pressão mínima de operação deve ser garantida para que o jato de água emitido pelo microaspersor atinja um raio de alcance de 1 m devido a disposição circular dos canteiros. Para tal, foi realizado o teste dos microaspersores em função da variação do comprimento da linha de carga. Foi considerado como carga o número de microaspersores ligados em simultâneo no caso 3, 6, 9 e 12 microaspersores sendo 3 a cada 20 metros.

Com a altura de recalque de 2,5 m, foi variado o comprimento da linha de carga em 20 m, 40 m, 60 m e 80 m respectivamente, para verificar a pressão de trabalho, a vazão, raio do jato de água emitido e o número de microaspersores a serem ligados em simultâneo.

A pressão nos microaspersores foi medida pelo manômetro no terceiro, sexto, nono e décimo segundo microaspersor, que são os últimos microaspersores da linha de carga, a irradiação solar para cada dia de medição (de 09 á 12 de Agosto de 2014) foi de 4,2, 6,1, 6,7 e 6,9 kWh/m²/dia respetivamente.

A figura 39 ilustra as curvas de potência da motobomba e as curvas da pressão nos microaspersores. A variação da carga é feita por meio de válvulas (registros de gaveta). Observa-se que a potência da motobomba aumenta (em 14 %) e a pressão nos microaspersores diminui (em 27 %) com o aumento da carga.

No dia 9 de Agosto foi realizado o ensaio para linha de carga de 20 metros. A variação da potência e pressão nesse dia se deu devido à variação da irradiação solar no instante em que os dados foram coletados; os valores médios podem ser observados na tabela 9.

Figura 39: Curvas de potência elétrica da motobomba e pressão dos microaspersores nos dias 09, 10, 11 e 12 de Agosto de 2014

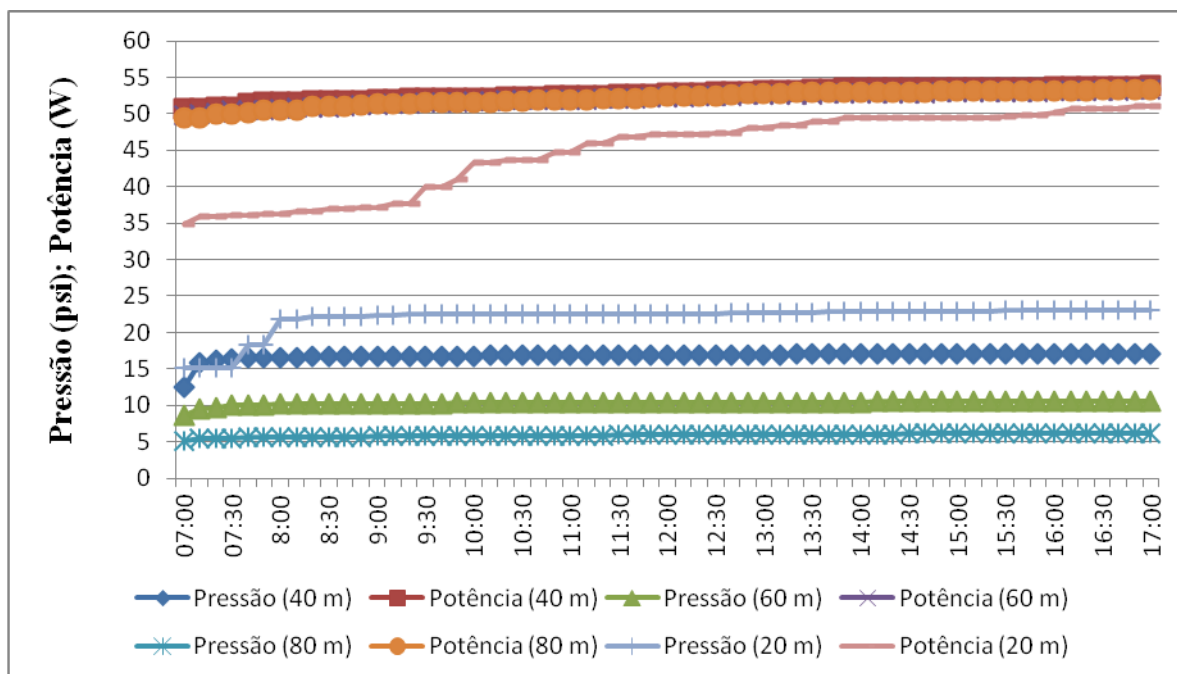


Tabela 9: Valores médios de Vazão X Pressão X raio de alcance de cada microaspersor na linha de carga considerada para o dia 09, 10, 11 e 12 de Agosto de 2014

Linha de carga [m]	Microaspersores ligados em simultâneo	Pressão por microaspersor [psi]	Vazão por microaspersor [l/min]	Potência da motobomba (W)	Raio de alcance por microaspersor [m]
20	3	21,9	1,4	47	2,5
40	6	17,1	1,3	53	2,1
60	9	10,6	0,9	54	1,7
80	12	6,1	0,6	55	1,2

A vazão de cada microaspersor foi medida no laboratório de hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da UFC em condições similares às da unidade de produção instalada. Foram instalados 12 microaspersores uniformemente distribuídos e em seguida foi ajustada a pressão na saída da motobomba 14 psi de modo a se obter pressão de 7 psi na saída de cada microaspersor e foi coletado o volume de água emitido por cada microaspersor.

A medição do raio de alcance foi realizada nos dias em que se efetuou a medição da variação da linha de carga. Os canteiros foram divididos em 5 linhas de modo a se observar o ponto máximo em que o jato de água emitido pelo microaspersor atingiu (ver apêndice 2, figura 4).

Pelo raio de alcance e pressão média foi escolhida a linha de carga com 80 m de comprimento acionando-se 12 microaspersores em simultâneo a uma pressão que varia de 6 a 12 psi e vazão média de 0,6 l/min por microaspersor. Para atender a esta pressão de trabalho é exigida potência elétrica de 55 W conforme ilustrado na tabela 9.

Para atender a demanda hídrica da unidade em condições de pressão e potência desejada, uma irradiância mínima é exigida para aplicar um módulo FV de 135 Wp. Para tal, a equação 19 indica que a irradiância mínima (G_{\min}) necessária foi calculada por:

$$G_{\min} = \frac{P_{\min} * G_{padrao}}{P_M} \quad (19)$$

Sendo P_{\min} a potência mínima para o sistema operar nas condições desejadas, G_{padrao} a irradiância solar global padrão (1000 W/m^2) e P_M a potência máxima do painel FV

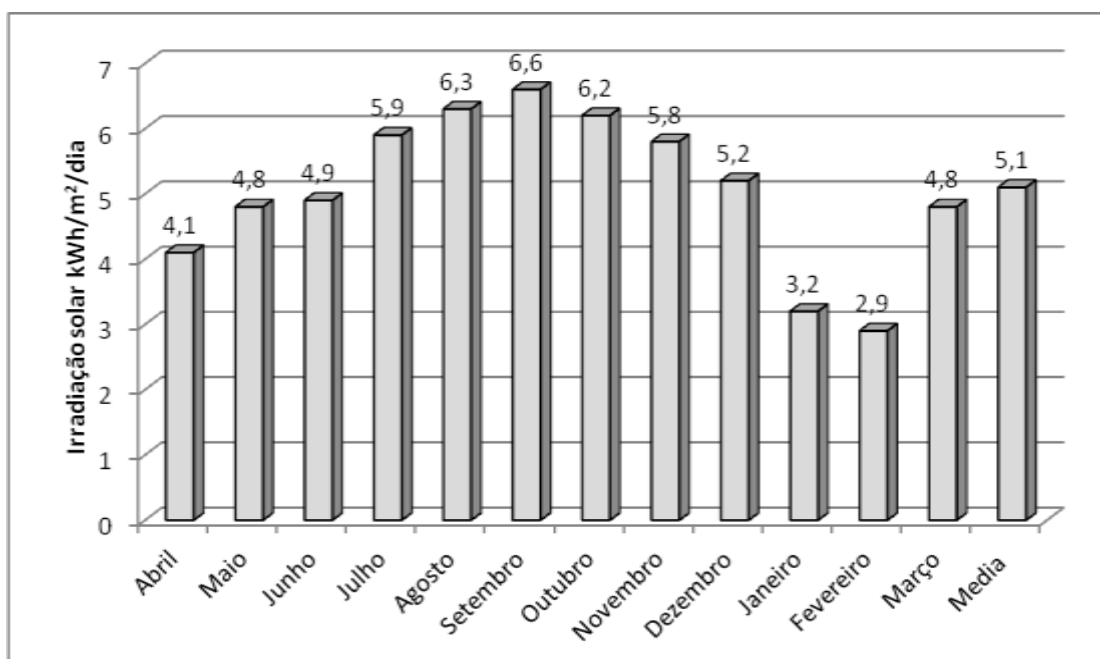
usado. A potência elétrica mínima em que o sistema FV de bombeamento opera não é igual a potência de operação desejada e que forneça pressão suficiente para a operação dos microaspersores. Para tal a potência de operação desejada é garantida por meio de irradiância média de 407 W/m^2 .

Com a vazão média de $0,6 \text{ l/min}$ por microaspersor, o tempo de irrigação diária foi fixada em 2 horas o que equivale a 120 minutos (8 as 9 h e 14 as 15 h) para satisfazer a demanda hídrica da unidade conforme ilustra a equação 20 considerando vazão média da bomba de $6,5 \text{ l/min}$. Para valores de vazão abaixo de $6,5 \text{ l/min}$ irá demandar maior tempo de bombeamento para atender o volume diário.

$$\text{Tempo de operação} = \text{Volume diário [l]} : \text{Vazão da bomba [l/min]} \quad (20)$$

Foi avaliado o potencial da irradiação solar existente no local em que seria instalado o sistema FV de bombeamento. A figura 40 ilustra o perfil da irradiação solar disponível no Campus do Pici. Observa-se que ao longo do ano apenas os meses de Janeiro e Fevereiro tem irradiação solar abaixo de $4 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$, meses estes que coincidem com a época chuvosa.

Figura 40: Irradiação solar disponível no Campus do PICI – Fortaleza (2003/2004)



CAPÍTULO IV: VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos experimentalmente com uso da infra-estrutura implementada. Os parâmetros de referência usados na presente dissertação são:

- Irradiação solar diária média de referência no plano horizontalo FV (Agosto e Setembro de 2014): 6,6 kWh/m²/dia.
- Altura de recalque: 2,5 m.
- Linha de carga: 80 m.
- Altura manométrica total: 10,5 m.
- Volume diário projetado: 800 litros.
- Potência do módulo fotovoltaico: 135 Wp.
- Potência elétrica da motobomba: 55 W
- Pressão de trabalho da motobomba: 14 psi.
- Tempo diário de operação: 120 min.
- Umidade do solo: 64 % (3,2 V) mínimo e 78 % (3,75 V) máximo.

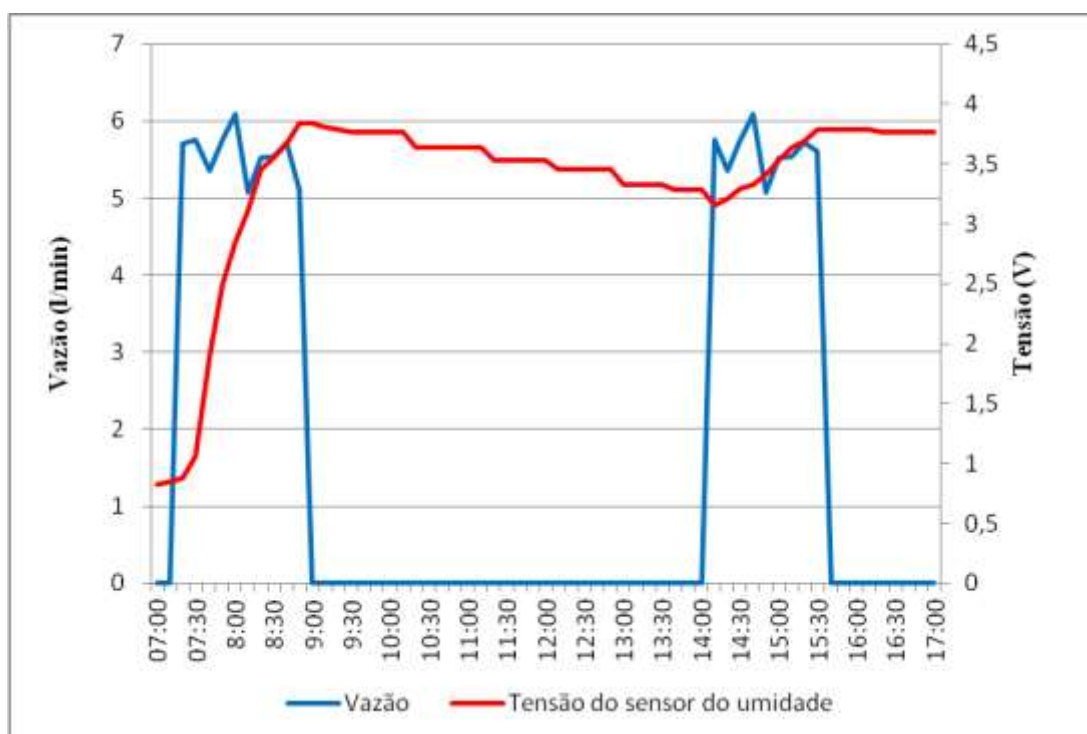
4.1 Curva do perfil de bombeamento controlado pelo sensor de umidade do solo

Figura 41 ilustra o perfil de bombeamento, com o sensor de umidade ativado. Observa-se que a irrigação foi iniciada as 7:20 h com a umidade do solo abaixo de 64 % (1,06 V) e é desligado automaticamente as 8:50 h quando a umidade do solo atingiu valor acima de 78 % (3,84 V) no período da manhã e a irrigação voltou a ser acionada às 14:10 h quando o nível de umidade do solo indica estar abaixo dos 64 % tendo se desligado as 15:30 h.

O período total para irrigação ao longo do dia foi de 160 minutos, 40 minutos a mais que o tempo pré-determinado de 120 minutos

Figura 41: Curvas da vazão e de tensão emitida pelo sensor de umidade do solo (08 de Setembro de 2014)

$H = 5,06 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$

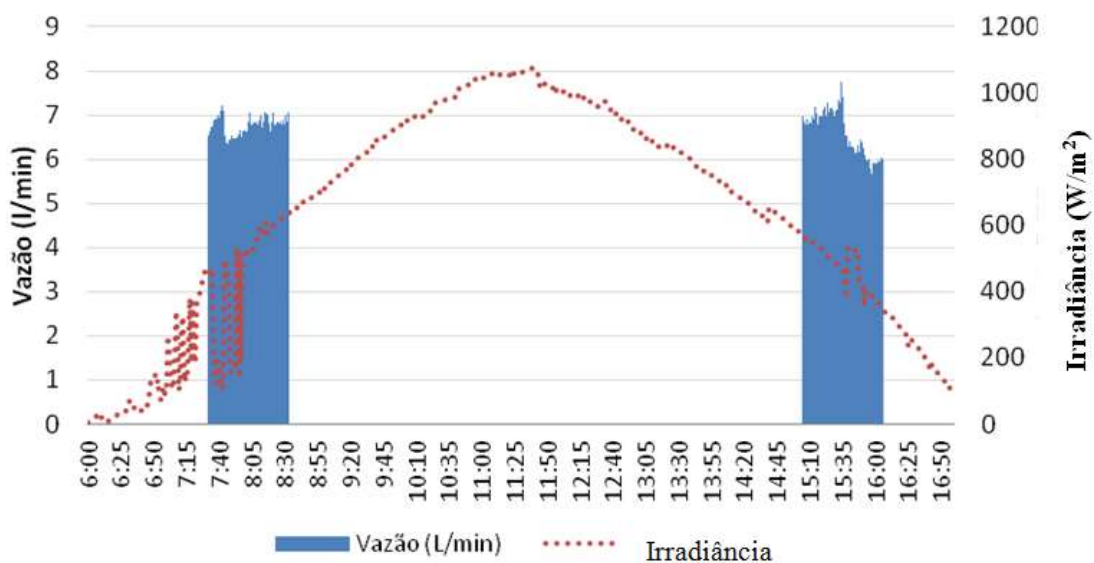


4.2 Comportamento diário das variáveis técnicas envolvidas

A figura 42 ilustra as curvas do comportamento da vazão e da irradiância no dia 18 de Agosto de 2014. Observa-se que o bombeamento foi realizado das 7:40 h às 8:35 h no período da manhã e das 15:05 às 16:00 h no período da tarde; o volume de água bombeado ao longo deste dia foi de 709 litros de água, cuja vazão média foi de 6,4 l/min para irradiação solar disponível de 6,7 kWh/m²/dia.

Observa-se que dos 120 minutos determinados para irrigação, apenas 110 minutos foram utilizados, isto deveu-se a menor variação da irradiação o que proporcionou menor variação na vazão. O sensor de umidade adotado permitiu economizar 91 litros de água.

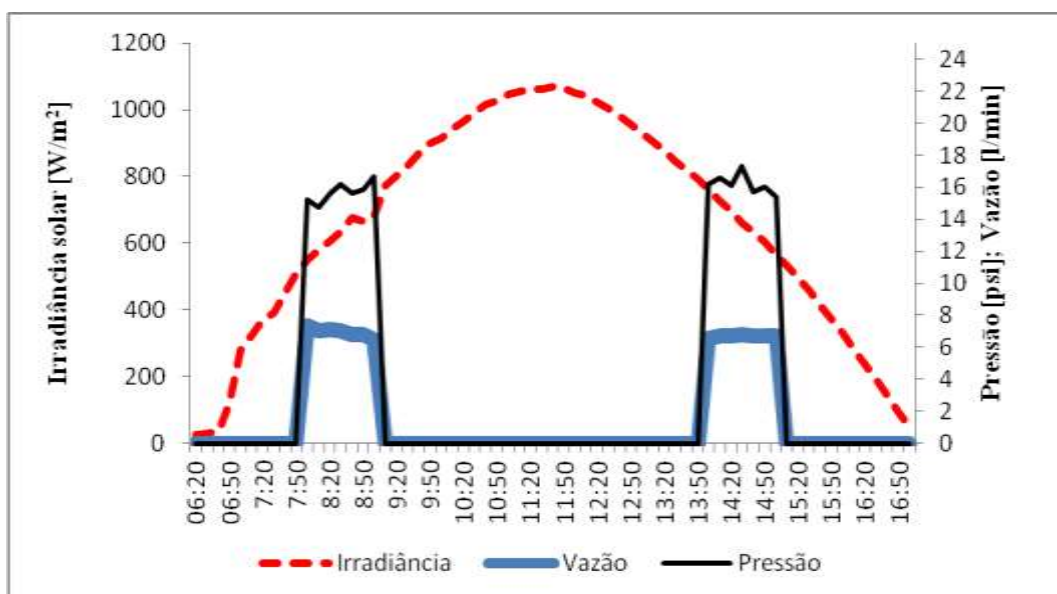
Figura 42: Curvas da vazão e irradiância no dia 18 de Agosto de 2014 ($H = 6,7 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$)



Curva da vazão, pressão e irradiância

A figura 43 ilustra as curvas do comportamento da vazão, pressão e da irradiância no dia 15 de Setembro de 2014. Observa-se que o bombeamento foi realizado entre 8:00 h às 9:00 h no período da manhã e entre 14:00 às 15:00 h no período da tarde. A vazão média ao longo do dia foi de 6,3 l/min cujo volume de água bombeado foi de 756 litros com pressão média de 15,4 psi na saída da motobomba. A irradiação solar disponível foi de 7,04 kWh/m²/dia.

Figura 43: Curvas de vazão, pressão e irradiância ao longo do dia 15 de Setembro de 2014



Curvas da potência elétrica e irradiância

A potência elétrica gerada é proporcional à irradiância incidente sobre a área do módulo FV. Observa-se na figura 44, um dia com pouca nebulosidade ($H = 7,04$ kWh/m²/dia). A potência elétrica média gerada ao longo do período de irrigação foi de 57 W. Na figura 45, observa-se um dia nublado ($H = 4,3$ kWh/m²/dia), a potência elétrica gerada acompanha as variações frequentes da irradiância, com valor médio de potência elétrica de 43 W. No período da manhã o céu esteve muito nublado em relação ao período da tarde no dia 09 de Setembro.

Figura 44: Curva de potência elétrica gerada e irradiância no dia 15 de Setembro [$H = 7,04$ kWh/m²/dia]

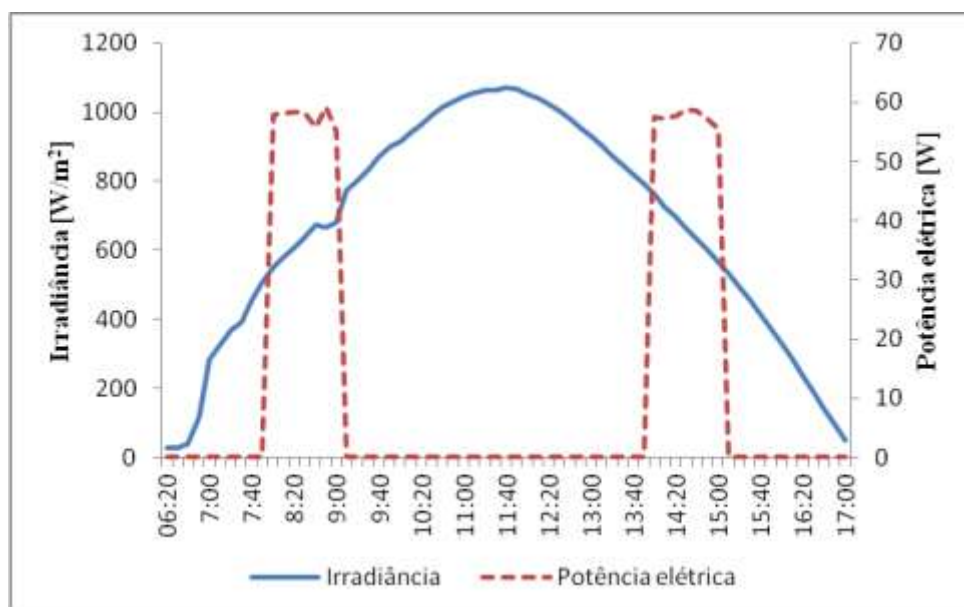
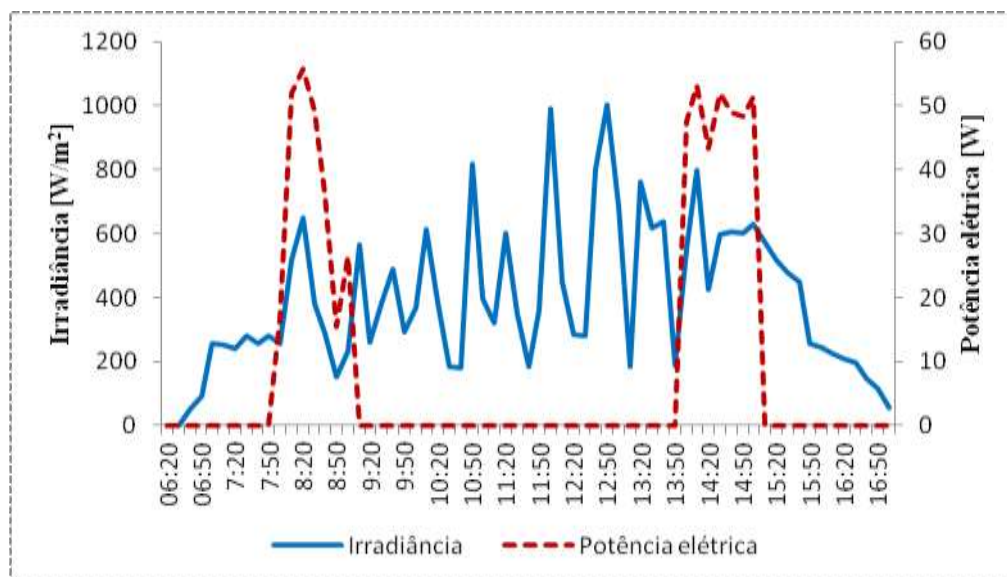


Figura 45: Curva de potência e irradiância no dia 09 de Setembro [$H = 4,3$ kWh/m²/dia]

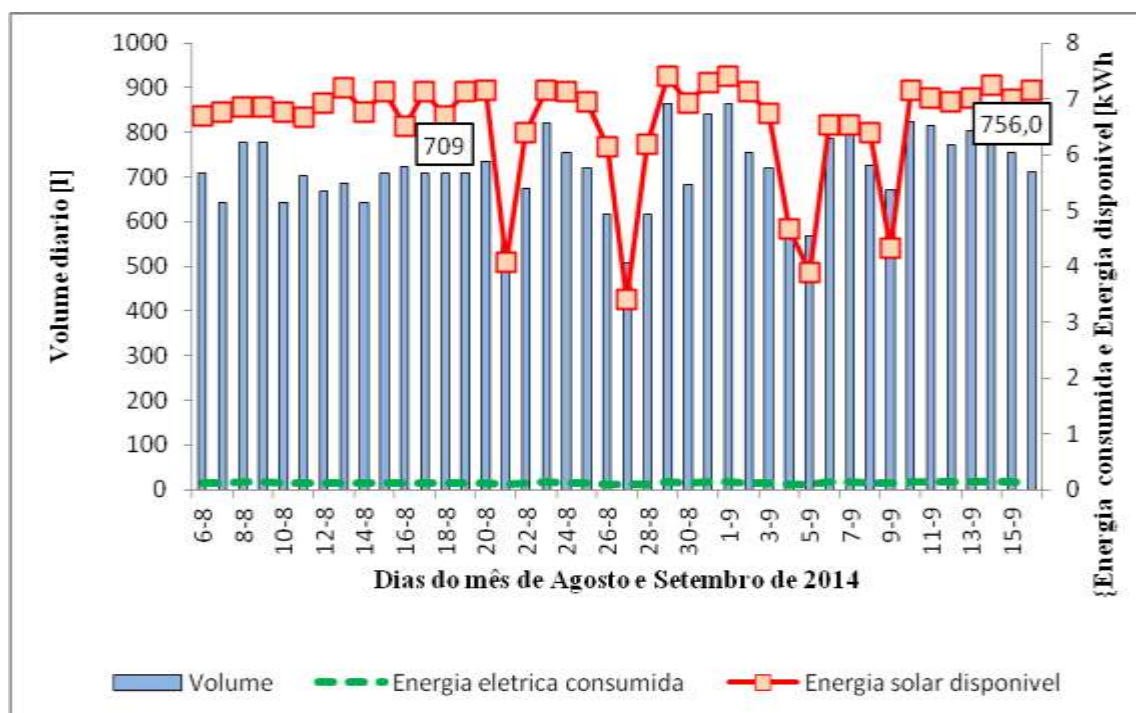


A energia elétrica consumida pela motobomba nos dois dias (09 e 15 de Setembro) foi de 0,11 kWh. Da irradiação solar disponível no dia 15 de Setembro apenas 1,6% foi consumida pela motobomba para irrigar.

4.3 Consumo de água e energia elétrica para irrigação do Coentro

O coentro teve um ciclo de 44 dias (06 de Agosto a 19 de Setembro). Na figura 46 observa-se que houve variação do volume de água aplicado à irrigação no período de cultivo. Este fato ocorreu devido a constante variação da irradiância solar e o controle do nível de umidade do solo. Uma vez que o nível de evapotranspiração é maior em dias ensolarados, a necessidade de irrigação nesses dias também é maior, pois o solo seca com maior facilidade; este é o caso do dia 15/09 (756 litros e 7,04 kWh.m²/dia). Para dias nublados, a evapotranspiração é reduzida e a necessidade de irrigar também reduz ou seja o solo se mantém úmido por mais tempo; este é o caso do dia 18/08 (709 litros e 6,7 kWh/m²/dia).

Figura 46: Curvas de volume, energia solar disponível e energia elétrica consumida por dia durante o cultivo do coentro (Agosto e Setembro de 2014)



Durante o cultivo do coentro, foram consumidos em média 718 litros de água por dia, assim ao longo das seis semanas foram utilizados na irrigação em torno de 31.592 litros de água. A figura 46 também ilustra a curva da energia elétrica demandada diariamente pela motobomba que ficou em torno de 0,12 kWh. Para o volume de água bombeado para irrigar o coentro, foram consumidos em média 5,3 kWh. A irradiação média diária no intervalo das 7:00 às 17:00 horas durante os 44 dias de cultivo foi de 6,6 kWh/m²/dia. A tabela 10 ilustra as médias diárias e valores totais obtidas no cultivo do coentro.

Tabela 10: Médias diárias e valores totais das grandezas envolvidas no cultivo do coentro

	Médias diárias	Valores totais
Volume de água consumida [litros]	718	31.592
Potência FV disponível [W]	654	-
Energia solar disponível [kWh]	6,6	-
Energia elétrica consumida [kWh]	0,12	5,3
Tempo médio de operação [minutos]	110	4.484
Quantidade de coentro produzido [kg]	23	

Se a irrigação fosse efetuada sem o controle da umidade seriam consumidos 800 litros de água por dia o que totalizava 35.200 litros para o cultivo do coentro. Pelos valores obtidos 1 kWh é consumido no bombeamento de 5.961 litros de água o que resultaria num consumo energético de 5,9 kWh. Com o controle da umidade do solo foram economizados 3.608 litros, o que equivaleu à economia de 0,6 kWh de energia elétrica.

4.4 Capacidade de bombeamento da unidade FV desenvolvida

O sistema FV implantado tem capacidade de bombear água durante as horas de sol (7 as 17 horas) ao longo do dia, como pode ser observado nas figuras 47 e 48; como citado, no presente projeto foram explorados apenas 32 % da área planejada, o regime de bombeamento adotado operou em aproximadamente 2 horas em média diária, ficando no restante do tempo sem irrigar (8 horas).

Para estudar o comportamento do sistema FV implantado é necessário deixar a motobomba ligada durante o dia todo (6 as 17:30 horas); para este objetivo foram abertas as linhas de carga instaladas na área cultivada e não cultivada por meio de registros de gaveta para direcionar o curso da água bombeada. Nas horas de irrigar o coentro eram abertos os

registros para a área cultivada e no final da irrigação era desligado o sensor de umidade de modo a não interferir no funcionamento da motobomba e o bombeamento era realizado em um circuito fechado, retornando a água bombeada ao reservatório de água.

Figura 47: Curvas de irradiância, vazão e pressão ao longo do dia 09 de Setembro de 2014

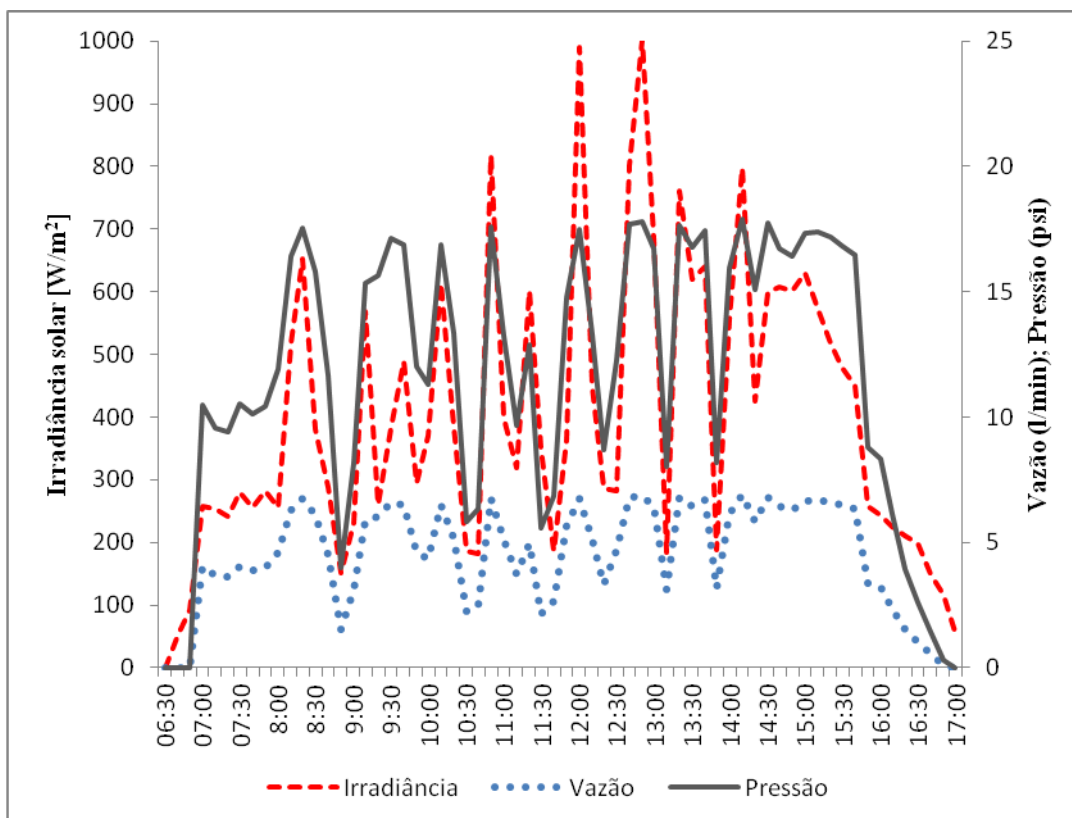
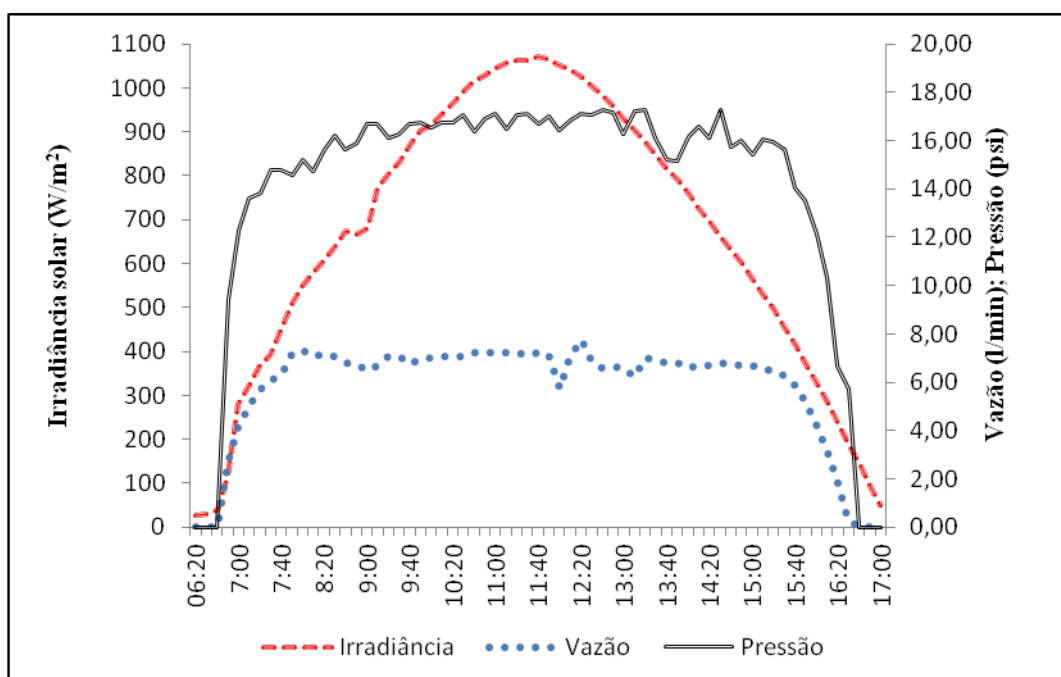


Figura 48: Curvas de irradiância, vazão e pressão ao longo do dia 15 de Setembro de 2014



Foram coletados dados de vazão, pressão e irradiação solar ao final de 10 dias de bombeamento. No dia 09 de Setembro de 2014 (nublado), as curvas da vazão e pressão se comportaram acompanhando a curva da irradiância; a irradiação deste dia foi de 4,3 kWh/m²/dia e foram bombeados 2.850 litros de água, a vazão média foi de 4,75 l/min com pressão média na saída da bomba de 12,2 psi. Quando a irradiância aumenta ou diminui a curva da vazão e pressão também se comportam de acordo com as oscilações da irradiância, pois a corrente elétrica produzida pelo módulo FV é dependente da irradiância incidente no módulo FV.

No 15 de Setembro de 2014 (menos nublado) a curva da irradiância solar apresenta um comportamento com menor oscilação, a irradiação solar disponível foi de 7,04 kWh/m²/dia e foram bombeados 3973 litros de água, a vazão média foi de 6,5 l/min e pressão média de 15,4 psi. Pode-se observar na figura 48 que a irradiação solar atinge um pico e a curva da pressão e vazão não acompanham o pico da irradiação solar, fator este, causado pela limitação da própria motobomba no que se refere a relação pressão – vazão e corrente.

Com o módulo FV instalado (135 Wp) é possível bombear em média diária 2850 litros a uma irradiação média de 4,75 kWh/m²/dia e 3973 litros a uma irradiação média de 7 kWh/m²/dia.

A forma de otimizar o recurso solar para bombeamento implantado consistirá na ativação de toda unidade instalada, no caso explorar os 91 m² de área inativados totalizando 24 microaspersores ativos. Caso se decida por implantar uma nova cultura um novo cenário de demanda hídrica deverá ser considerado, pois a demanda hídrica diária varia de uma cultura para a outra.

4.5 Eficiência do sistema FV de bombeamento

Para calcular a eficiência do sistema de bombeamento instalado, utilizaram-se as equações 16, 17 e 18 indicadas no capítulo 3. Foram medidos os valores da corrente e tensão elétrica gerados pelo módulo FV e calculados os valores médios da potência elétrica da motobomba em operação, no caso 55 W. Feito isto foi calculada a irradiância média (G) a partir dos valores coletados a cada 10 minutos nos dias de medição (654 W), tais valores foram aplicados a equação 16 e resultaram em uma eficiência de 8,4 % do módulo FV.

Para o cálculo da eficiência da motobomba, foi calculada a potência hidráulica a partir dos valores de referência para operação da unidade, através da equação 10, resultando

em 22,9 W de potência, o resultado obtido foi aplicado a equação 17 obtendo o rendimento do conjunto motobomba de 42 %.

A eficiência global do sistema FV de bombeamento foi calculada com base na equação 18. Foi feita a divisão da potência de saída (potência hidráulica) pela potência solar (irradância), cujo resultado foi de 3,5 %. Os resultados das eficiências obtidos encontram-se resumidas na tabela 11.

Tabela 11: Eficiências calculadas do sistema FV desenvolvido

	Eficiência (%)
Módulo FV	8,4
Motobomba	42
Global	3,5

4.6 Avaliação financeira

A presente secção apresenta a avaliação financeira do sistema FV de bombeamento aplicado à irrigação. Embora a tecnologia de bombeamento de água para a irrigação abranja fontes de energia convencionais e não convencionais para o acionamento da motobomba, estudos econômicos e comparativos realizados por FEDRIZZI (2003) demonstram que a tecnologia FV aplicada no bombeamento de água torna-se adequada para áreas remotas e afastadas da rede elétrica convencional.

Para a presente análise financeira, foi calculado o custo total de vida útil e o custo de vida útil anualizado, considerando o custo inicial, manutenção e operação e a vida útil de 20 anos. A taxa de juros anualizada considerada é de 10 % (CAMARGO, 1998).

Custo total de vida útil (C_T): representa a soma de todas as despesas efetuadas ao longo da vida útil:

$$C_T = C_I + OM \quad (21)$$

C_I - Custos de investimento inicial [R\$]

OM - Custos de Operação e manutenção [R\$]

C_T - Custo total de vida útil [R\$]

Os custos de investimento iniciais são fornecidos na tabela 12. Para os custos de OM, 10% são acrescidos ao custo total de vida útil anualizado, para suprir questões de manutenção da motobomba, canalização hidráulica e elétrica.

Tabela 12: Custos de investimento inicial dos componentes de bombeamento FV

Produto	Custo unitário R\$	Quantidade	Custo total R\$
Painel FV SUN135-36P ⁶	1049,00	1	1049,00
Motor bomba Shurflo 8000 ⁷	332,00	1	332,00
Chave bóia CB-200	28,00	1	28,00
Outros (estrutura, material elétrico e hidráulico)	285,00	1	285,00
Custo de investimento inicial	1694,00		

Custo total de vida útil anualizado (C_{TA}): este valor é o mesmo do C_T , traduzido na forma anual. O C_{TA} é anualizado mediante a aplicação do fator de retorno do capital (F_{RC}), que expressa a taxa de retorno esperada para a recuperação do capital investido nos 20 anos.

$$C_{TA} = F_{RC} * C_T \quad (21)$$

$$F_{RC}(n; i) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (22)$$

i - taxa de retorno anual [10% ao ano no presente estudo]

n - vida útil [anos]

C_{TA} – Custo total anualizado [R\$]

⁶ Preço do módulo FV: <https://troniquices.wordpress.com/2007/12/27/comparativo-de-paineis-solares-fotovoltaiacos/>: acessado a 15 de Agosto de 2014

⁷ Preço da motobomba consultado em:

<http://www.brasilhobby.com.br/descricao.asp?CodProd=8000-443-136>: acessado a 15 de Agosto de 2014

Custos específicos

Cenário 1: Irrigação do coentro na área de 43 m²

Para obter os custos específicos, foi considerada a unidade funcionando apenas com a produção do coentro no período de um ano. Os custos específicos foram calculados por meio das equações 23 e 24

$$\text{Custo específico da energia} = \frac{C_{TA}}{E_C} \quad (23)$$

$$\text{Custo específico da água} = \frac{C_{TA}}{V_b} \quad (24)$$

E_C – Energia elétrica consumida em um ano [kWh]

V_b – Volume de água bombeado em ano [l]

Para o período de 1 ano de cultivo de coentro na área de 43 m² com ciclo de produção de 45 dias serão materializados 8,1 ciclos de produção do coentro, cujo volume de água anualizado será de 292.000 litros com consumo de 49 kWh. Estes valores resultam no custo de R\$ 34,57 por kWh e R\$ 0,006 por litro.

Cenário 2: Considerando a capacidade plena de bombeamento da unidade (134 m²)

Para obter os custos específicos da água e da energia elétrica, foi considerada a unidade funcionando em plena capacidade e não apenas às horas de irrigação do coentro. Para tal foi utilizada a irradiação solar disponível ao longo do ano, considerando a sazonalidade e o volume anual de água a ser bombeada. Foi avaliada a irradiação solar anual [kWh/m²/ano] disponível no Campus do Pici da UFC - Fortaleza, através de uma série histórica de dados de 2 anos (2003 e 2004); posteriormente dividiu-se essa irradiação em 4 faixas para calcular a frequência de ocorrência de cada faixa ao longo do ano, conforme figura 49.

O bombeamento de água com funcionamento pleno da unidade permitiu avaliar o volume de água bombeado diariamente para diferentes faixas de irradiação solar. Após obter os dados diários do volume bombeado foi desenhada a curva do volume bombeado em função da irradiação solar e foi adicionada a curva de tendências que permitiu obter a equação de ajuste para o volume de água em função da irradiação solar (ver figura 50); numa segunda etapa foi calculada a partir da equação de ajuste o volume diário para as faixas de irradiação

solar consideradas, conforme figura 51 e posteriormente o volume anual, ilustrado na tabela 13.

Figura 49: Médias de frequência de ocorrência de cada faixa de irradiação solar ao longo do ano 2003/2004 no Campus do Pici – Fortaleza

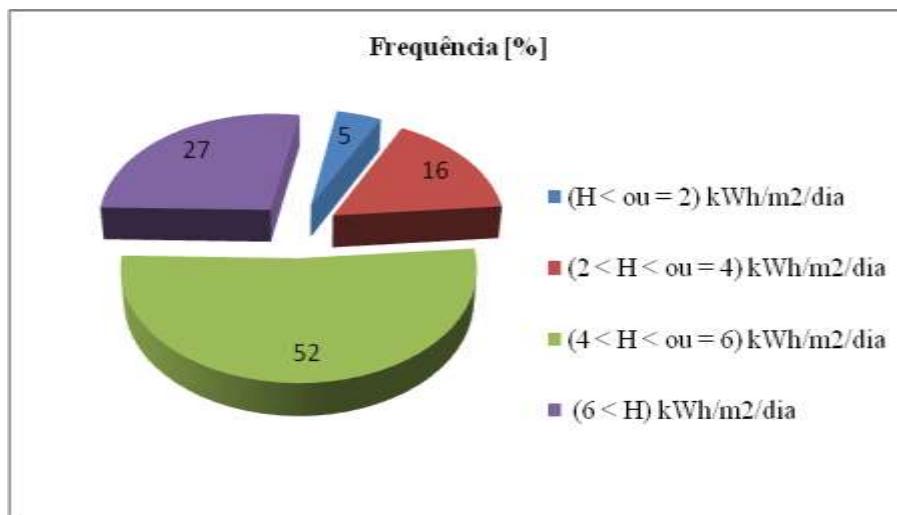
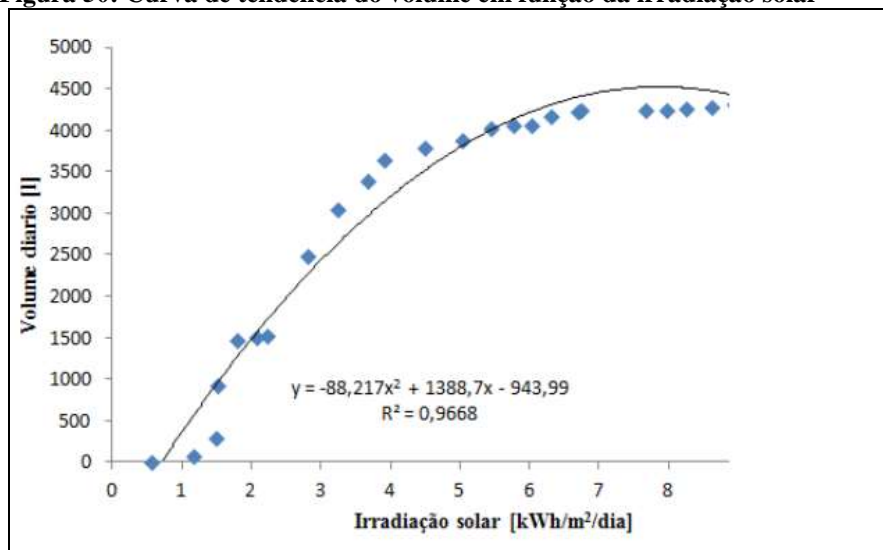


Figura 50: Curva de tendência do volume em função da irradiação solar



Equação de ajuste:

$$Y = -88,217 * X^2 + 1388,7 * X - 943,99 \quad (25)$$

Em que:

Y - Volume diário [l]

X - Irradiação solar [kWh/m²/dia]

O R^2 indica o quanto a curva simulada aproxima-se a curva dos valores medidos, no caso o erro médio quadrático é de 0,04.

Figura 51: Volume de água em função da faixa de irradiação solar no campus do Pici

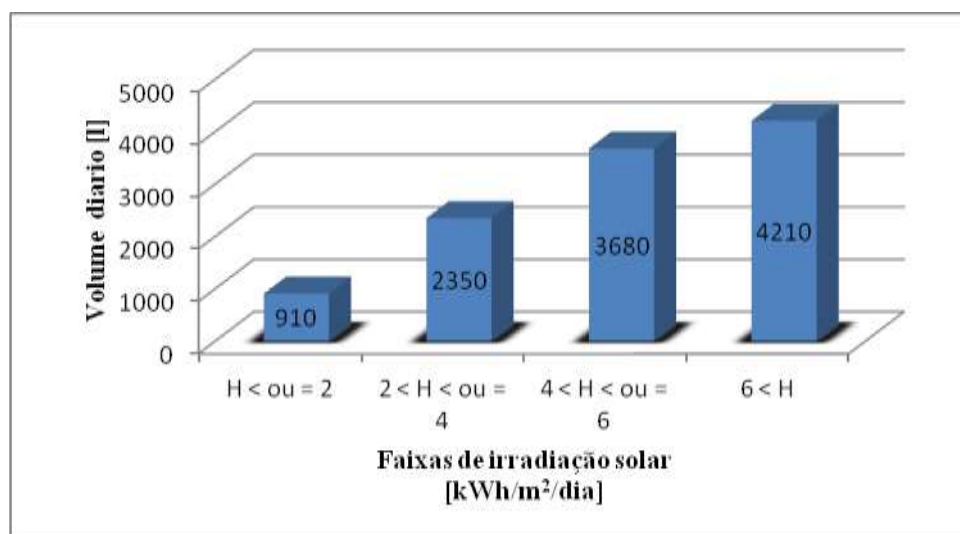


Tabela 13: Volume de água anualizado

Faixa de irradiação solar [kWh/m²/dia]	Número de dias	Volume bombeado por dia [l]	Total do volume bombeado [l]
$2 < H$	17	910	15.470
$2 < H \leq 4$	59	2350	138.650
$4 < H \leq 6$	189	3680	695.520
$6 < H$	100	4210	421.000
Volume de água anualizado [l]			1.270.640

Considerando os valores médios de irradiação solar dos anos considerados, 2003 e 2004:

- 17 dias tiveram irradiação solar na faixa de 0 a 2 kWh/m²/dia cujo volume diário médio correspondente é de 910 l.
- Na faixa de 2 a 4 kWh/m²/dia foram 59 dias, com volume médio diário de 2350 l.
- Com irradiação solar de 4 a 6 kWh/m²/dia, foram 189 dias cujo volume médio diário é de 3680 l;
- Para valores maiores de 6 kWh/m²/dia foram observados 100 dias, com volume médio diário de 4210 l.

Estes valores permitiram calcular o volume de água a ser bombeado no Campus do Pici - Fortaleza ao longo de 1 ano, considerando a sazonalidade da irradiação solar, igual a 1. 270. 640 litros. Pode-se observar que o maior número de dias ao longo do ano apresenta valores de irradiação solar na faixa de 4 a 6 kWh/m²/dia.

Posteriormente, foi calculada a quantidade da energia elétrica consumida por volume de água bombeado, considerando que para um dia inteiro de bombeamento o consumo de energia por volume de água fornecido é de 0,13 kWh/m³. Os custos específicos foram calculados com base nas equações 23 e 24.

Tabela 14: Custos específicos do sistema instalado

	Custo total anualizado [R\$]	Volume anualizado [l]	Energia elétrica consumida [kWh]	Custo específico da água [R\$/l]	Custo específico da energia elétrica [R\$/kWh]
Cenário 1	691,4	292.000	49	0,006	34,57
Cenário 2	218,87	1.270.640	165,2	0,000172	1,325

Análise do fluxo de caixa e incentivos financeiros

O custo dos módulos FVs e acessórios e o desconhecimento dos benefícios proporcionados pela geração fotovoltaica num país como o Brasil, com elevado nível de irradiação solar ainda constituem barreiras para a massificação da tecnologia FV. Avanços são registrados em incentivos à microgeração e minigeração distribuída e sistemas de compensação de energia elétrica pela aplicação da Resolução Normativa nº 482, de 17 de Abril de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica.

Visando abordar o dimensionamento financeiro do presente projeto, uma análise do fluxo de caixa é realizada para avaliar o tempo de retorno do valor investido a partir da ferramenta computacional RETScreen. O RETScreen é um programa de análise de projetos de energia limpa, que apoia projetistas na tomada de decisões para implantação de tecnologias de energias renováveis e eficiência energética (MINISTRY OF NATURAL RESOURCES CANADA, 2014)

Para o presente trabalho, as variáveis de entrada consideradas foram valores das médias mensais da irradiação ao longo de um ano em Fortaleza, ângulo de inclinação do módulo FV adotado e o preço da energia elétrica [R\$/MWh] válido para o Ceará e definido pela ANEEL conforme tabela do anexo 4 e a figura 52, respetivamente. Numa segunda etapa, foram definidos os valores da potência do módulo; tipo do módulo e o valor de perdas (conexões, cabo, contatos, poeiras...). O fator de capacidade obtido foi de 19,9 %, conforme figura 53. Segundo ALMEIDA (2012), o fator de capacidade mostra a proporção entre a energia real gerada pelo sistema fotovoltaico e a energia que seria entregue caso se operasse na potência nominal de forma contínua, 24 horas por dia durante um ano inteiro. No caso do Brasil o fator de capacidade de sistemas FVs esta entre 12 a 19 %.

Foram realizadas 3 análises gráficas para avaliar o fluxo de caixa. Uma das análises é realizada sem subsídios e duas com subsídios de 10 e 20 % na compra do módulo FV e implantação do projeto. Sem subsídio o fluxo de caixa torna-se positivo a partir de 10 anos após a implantação da unidade geradora, considerando o tempo de vida útil da unidade instalada de 20 anos. Com subsídio de 10 % o fluxo de caixa torna-se positivo a partir do nono ano e com 20 % cai para oito anos conforme ilustram as figuras 54, 55 e 56 respetivamente.

Com a unidade FV instalada para o bombeamento de água para irrigação do coentro, foram economizados 70 litros de combustível (petróleo), conforme figura 57.

Figura 52: Variáveis de entrada no RETScreen

Modelo Energético RETScreen - Projeto produção de Eletricidade

Sistema de eletricidade do caso proposto

Custo inicial incremental

Mostrar outras unidades

Tipo de análise

Método 1
 Método 2

Avaliação de recursos

Sistema de posicionamento solar

Fixo
5.0
0.0

Inclinação

Azmut

Mostrar dado

Mês	Radiação solar diária - horizontal kWh/m ² /d	Radiação solar diária - inclinada kWh/m ² /d	Preço eletricidade exportada \$/MWh	Eletricidade exportada p/ rede MWh
Janeiro	5,33	5,44	520,0	0,019
Fevereiro	5,14	5,19	520,0	0,016
Março	4,67	4,66	520,0	0,016
Abril	4,53	4,46	520,0	0,015
Maior	5,03	4,87	520,0	0,017
Junho	5,00	4,80	520,0	0,016
Julho	5,69	5,46	520,0	0,019
Agosto	6,19	6,02	520,0	0,021
Setembro	6,25	6,19	520,0	0,021
Outubro	6,47	6,52	520,0	0,022
Novembro	6,36	6,49	520,0	0,022
Dezembro	6,06	6,22	520,0	0,022
Annual	5,56	5,53	520,00	0,227

Radiação Solar anual - horizontal
MMWh/m² 2,03

Radiação Solar anual - Inclinado
MMWh/m² 2,02

entrada no RETScreen

Figura 53: Variáveis de

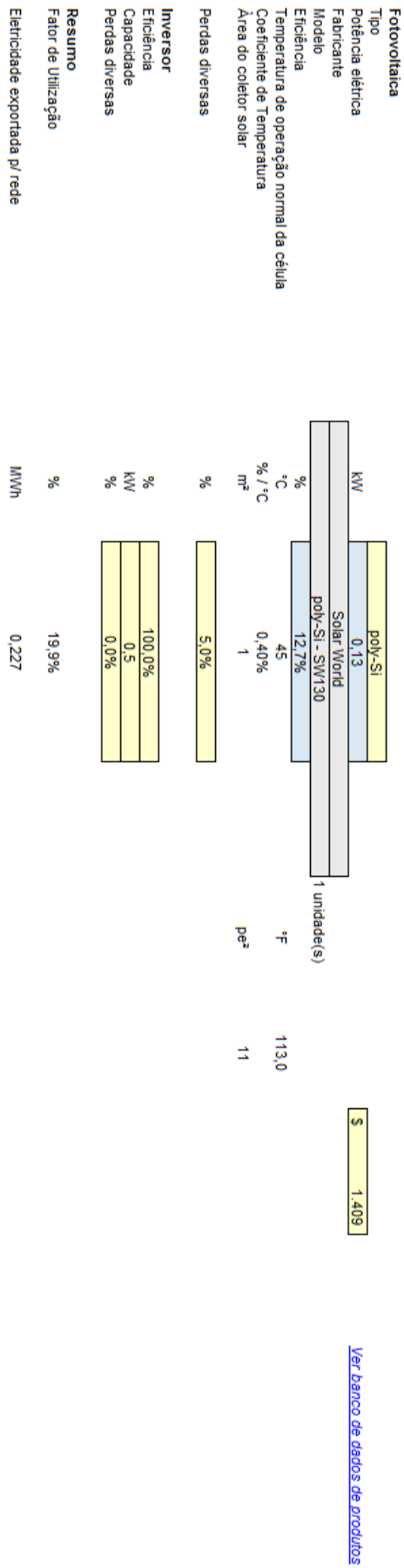


Figura 54: Fluxo de caixa sem subsídios

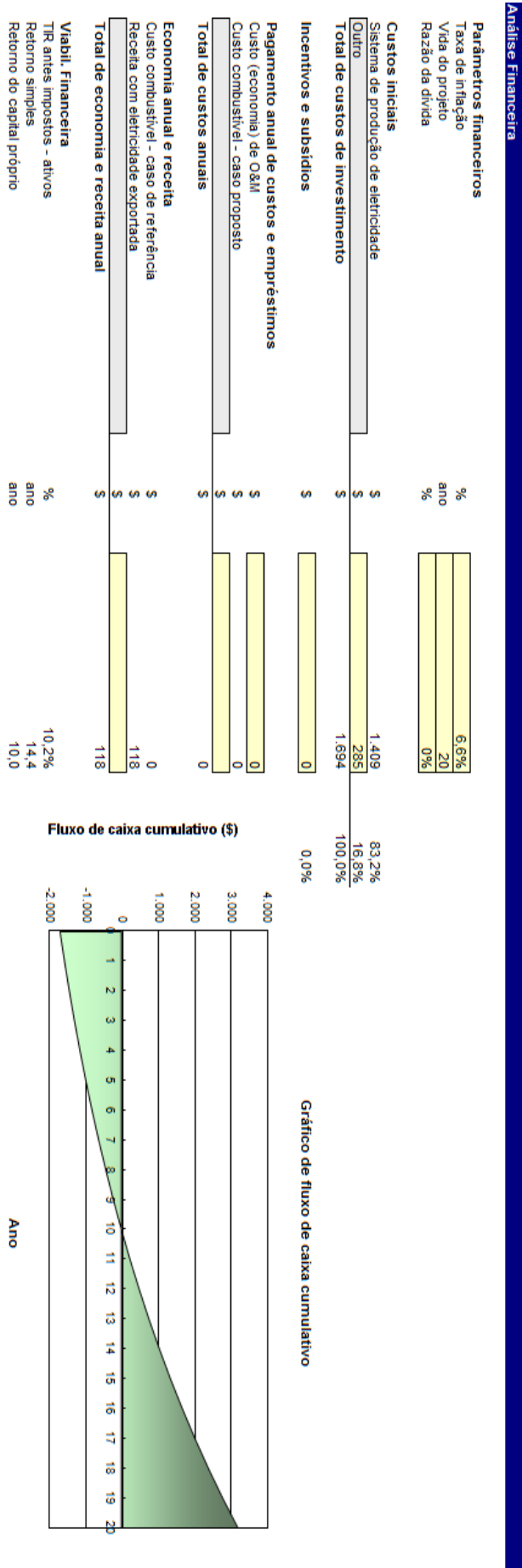


Figura 55: Fluxo de caixa com subsídio de 10 %

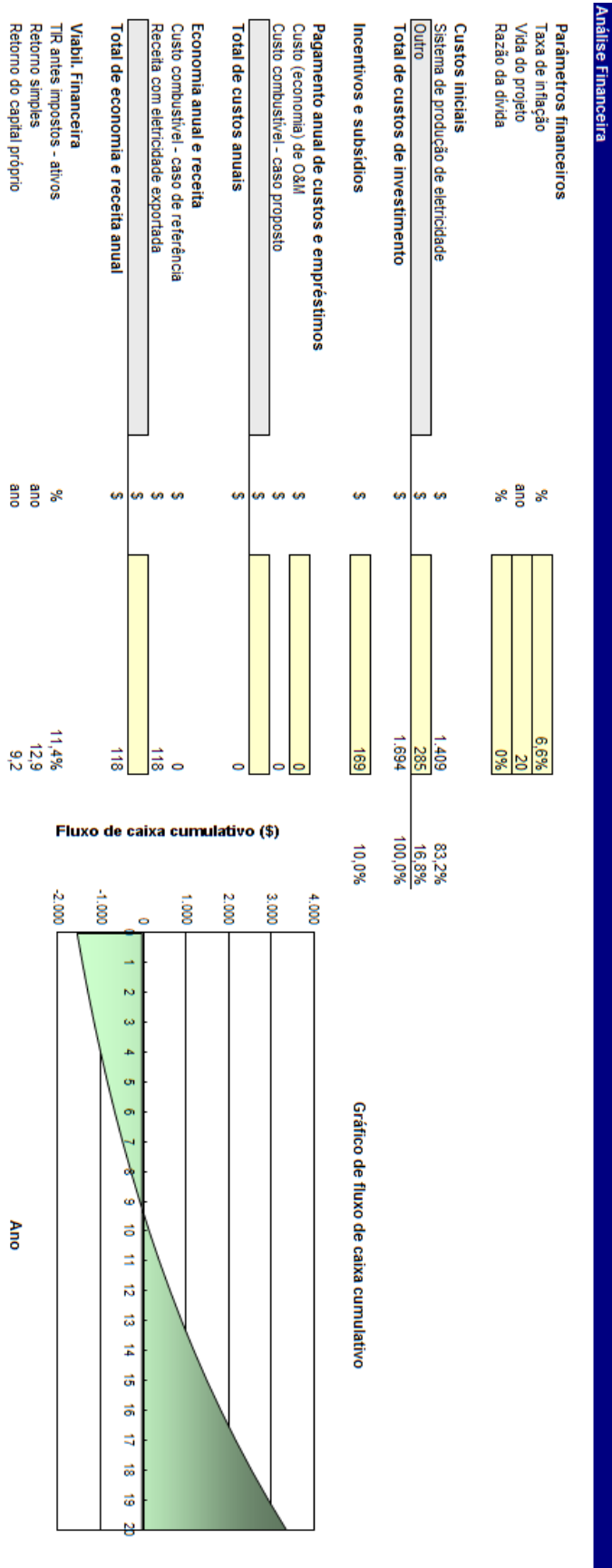


Figura 56: Fluxo de caixa com subsídio de 20 %

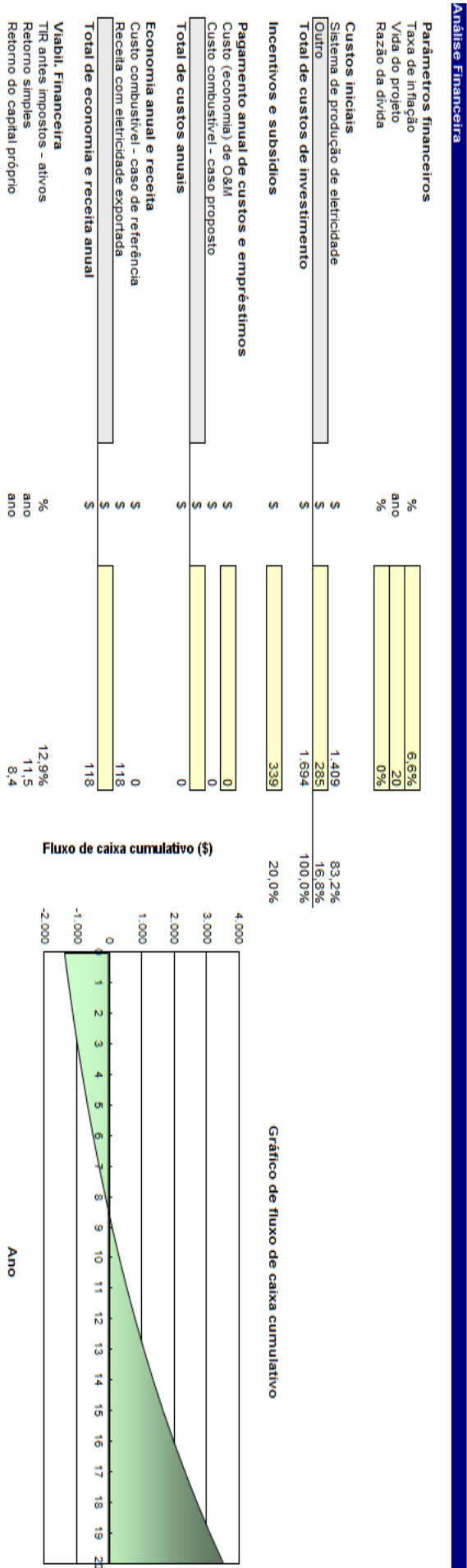


Figura 57: Análise de emissões

Análise de Emissões									
Sistema elétrico de referência (Baseline)		Tipo de		Fator de Emissão de GEE (excl. T&D)		Perdas T&D		Fator de emissão de GEE	
País - região		Óleo (#6)		tCO2/MWh		%		tCO2/MWh	
Brasil				0,719		0,0%		0,719	
Eletricidade exportada p/ rede		MWh		0		Perdas T&D		0,0%	
Emissão de GEE									
Caso de referência		tCO2		0,2					
Caso proposto		tCO2		0,0					
Redução anual bruta de emissões de GEE									
Custo de transação dos créditos de GEE		tCO2		0,2					
Redução anual líquida de emissões de GEE		%		0,0%					
		tCO2		0,2		é equivalente a		70,0	
Litros gasolina não consumidos									
Receita pela redução de GEE									
Crédito para redução de GEE		\$/tCO2		0,00					

CAPÍTULO V: CONCLUSÕES

O uso da tecnologia FV em sistemas de bombeamento de água vem sendo amplamente utilizado em diversos países nas últimas décadas, mostrando-se uma tecnologia bastante promissora. O Nordeste brasileiro, com abundância do recurso solar, vem se colocando em local de destaque na avaliação do potencial solar, comparando-se às melhores regiões do mundo nessa variável. Esta dissertação apresentou uma análise experimental da viabilidade técnica e financeira do uso do sistema FV de bombeamento de água aplicado à irrigação de uma unidade agrícola de produção de alimentos.

Ao avaliar a questão técnica do sistema FV instalado, algumas condições de operação do sistema de bombeamento e irrigação precisam ser garantidas para o atendimento adequado da unidade, tais como a potência elétrica e pressão na saída da motobomba. Considerando as condições de operação, verificou-se que para um módulo FV de 135 Wp é necessário uma irradiância solar de 407 W/m^2 para garantir uma potência elétrica de 55 W e conseqüentemente, uma pressão de 14 psi. Com base nos resultados obtidos, observou-se que durante o cultivo do coentro a irradiância solar média foi de 645 W/m^2 , 1,6 vezes maior que o valor de irradiância solar mínima necessária prevista, permitindo a geração de 55 W de potência elétrica e pressão de 13,8 psi.

Considerando o cálculo da irradiância solar mínima exigida para atender os 55 W de potência elétrica necessária, um módulo FV de 100 Wp, satisfaria as condições de operação da motobomba e do sistema de irrigação reduzindo os custos de investimento inicial considerando o valor da compra do módulo FV em R\$/Wp e a irradiância média observada durante o período de estudo (Agosto à Novembro de 2014).

O manejo racional da irrigação consiste na aplicação da quantidade necessária de água às plantas no momento correto, através de um método de controle da irrigação, pois o excesso de água aplicado à irrigação tem como consequência o desperdício de energia e de água, usado em um bombeamento desnecessário. No presente estudo foi adotado o monitoramento da umidade do solo para controlar a irrigação aliada à solução energética por meio do sistema FV desenvolvido.

O controle da umidade do solo permitiu economizar 3.608 litros de água durante o cultivo do coentro, o que equivaleu à economia de 0,6 kWh de energia. Considerando a irrigação do coentro ao longo de um ano para a área de 43 m^2 corresponderia à economia de 28.864 litros de água o que equivale a 4,8 kWh de energia economizada. O controle da

umidade ajuda a otimizar o uso da água e energia no processo de irrigação de unidades agrícolas.

O sistema FV implantado operou em aproximadamente 2 horas em média diária, ficando no restante do tempo sem irrigar, a forma de otimizar o recurso FV de bombeamento implantado e baixar os custos específicos consistirá na ativação de toda unidade instalada, operando por mais horas ao longo do dia, uma vez que o custo específico da água e energia são elevados ao considerar o funcionamento da unidade somente por 2 horas ao longo do dia. Estes, dentre vários outros aspectos permitiram concluir que o sistema FV desenvolvido apresenta condições técnicas para suprir a demanda hídrica da unidade de produção em condições de pressão e potência elétrica desejadas.

Visando abordar a dimensão financeira do presente projeto, foi realizada a análise do fluxo de caixa para avaliar o tempo de retorno do valor investido a partir da ferramenta computacional *RETScreen*. O custo dos módulos FVs e acessórios ainda constituem barreiras para a massificação da tecnologia FV. Contudo, a existência de políticas de subsídios na aquisição e implantação de uma usina solar, constituem ferramentas de incentivo a maiores investimentos no setor de geração de energia elétrica através de sistemas FVs.

No presente estudo o retorno do capital investido é de 10 anos sem considerar nenhum subsídio, somente a partir do décimo primeiro ano é que o fluxo de caixa se torna positivo, este número de anos é reduzido em até 1,6 anos considerando o subsídio de 20 % sobre o valor do custo de investimento inicial, para taxa de inflação considerada de 6,6 % e taxa interna de retorno de 12,9 %. O que permite concluir que o projeto é financeiramente viável num prazo mínimo de 10 anos.

Da irradiação solar disponível (1.557 kWh/ano) anualmente em Fortaleza, no campus do PICI, apenas 165,2 kWh seriam convertidos em energia elétrica pelo módulo FV utilizado, representando 11 % da irradiação solar disponível. De acordo com o INMETRO (ver anexo 3) a produção anual de energia elétrica do módulo FV utilizado é de 204 kWh/ano, no presente estudo produziria 165,2 kWh/ano, o que equivale a 81 % da capacidade anual de geração prevista.

O sistema FV de bombeamento implementado no campus do PICI em Fortaleza mostrou-se técnica viável, do ponto de vista financeiro, a viabilidade fica dependente de incentivos e dos recursos financeiros disponíveis e pode ser implantado em outros locais uma vez conhecidas as características da irradiação solar do local e as características da cultura a ser produzida.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros se propõem o seguinte:

1. Uso de um conversor CC/CC para reduzir as flutuações de potência elétrica em relação a variação da irradiância solar.
2. Uso de um booster para controlar a corrente de arranque do motor em situações de baixas tensões, para superar as forças internas de atrito e a falta de irradiância solar suficiente durante o nascer do sol.
3. Avaliar a viabilidade técnica e financeira de um sistema FV de bombeamento com um motor de corrente alternada.

TRABALHOS CIENTÍFICOS GERADOS

Artigo publicado em Congresso Nacional Brasileiro

1. CHILUNDO, R. J.; CARVALHO, P. C. M.; & MAHANJANE, U. S. Potencial da Tecnologia Fotovoltaica para Irrigação de Unidades de Produção Familiar: Estudo de caso para Moçambique. V Congresso Brasileiro de Energia Solar. Recife. Abril, 2014.

Artigos aprovados para publicação em congressos internacionais

1. CHILUNDO, R. J.; CARVALHO, P. C. M.; DINIZ, M. M. N.; BEZERRA, A. M. E. Photovoltaic Powered Irrigation System Applied to Familiar Agriculture. International Conference on Renewable Energy and Power Quality. Espanha. Março, 2015.

Dois trabalhos de conclusão de curso

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDOLZADEH M. & AMERI M. 2009. Improving the Effectiveness of a Photovoltaic Water Pumping System by Spraying Water Over the Front of Photovoltaic Cells. *Renewable Energy* .Vol. **34**: pp. 91-96.
- ABINEE. Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira. <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>., 3-176. 2012. 20-9-2014.
- ACKERMANN, T. 2005. *Wind Power Systems*. Edition 2^a. John Wiley & Sons, LTD, Sweden.
- AGÊNCIA MANDALLA. Projecto de Produção Integrada Mandalla. file:///C:/Users/Abel/Downloads/apostila_mandalla.pdf. 2012. Ceará - Brasil, Governo do Estado do Ceará.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 2014. Energia Solar.ANEEL, editor. 29 - 42.
- ALMEIDA M. P. 2012. Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. USP. Mestrado 171.
- ALVES, J., FIGUEREDO, L. G. M., COELHO, R., & ZOCOLER, J. L. Custo da Energia Elétrica na Irrigação. **32**. 2003. Goiânia - Brasil, Congresso Brasileiro de Energia Agrícola: Goiânia - SBEA.
- ANDRADE, C. L. T. Seleção do Sistema de Irrigação. Embrapa Milho e Sorgo. 1-16. 2001. Sete Lagoas - Minas Gerais, Embrapa.
- ANONYM.Kassel Universität. 2003. *Photovoltaic systems technology*.Germany.
- BEZERRA, A. M. E., PINHEIRO, J. M., CHAVES, F. C. M., ALVES, J. M. A., GASPAR JUNIOR, J. C., ASSUNÇÃO, M. V., & SANTOS, J. H. R. Hortaliças cultivadas no cinturão verde de Fortaleza e análise bacteriológica da água utilizada. *Revista de Horticultura Brasileira* **Vol.8**: N^o1. 2012.
- BORGES NETO, M. R. & CARVALHO, P. C. M. 2012. *Geração de Energia Elétrica. Fundamentos*. Edition 1^a ed. Érica Ltda, São Paulo.
- CAMARGO, I. M. T. 1998. *Noções Básicas de Engenharia Econômica: Aplicações ao setor Elétrico*. FINATEC, Brasília.
- CARVALHO, P. C. M., PONTES, R. S. T., OLIVEIRA Jr, D. S., RIFFEL, D. B., OLIVEIRA, R. G. V., & MESQUITA, S. B. Estudo estatístico de radiação solar visando o projeto de unidades de dessalinização acionadas por painéis fotovoltaicos sem baterias. Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída. 2004. Campinas, 5^o Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída.
- CHILUNDO, R. J., CARVALHO, P. C. M., & MAHANJANE, U. S. Potencial da Tecnologia Fotovoltaica para Irrigação de Unidades Produção Familiar: Estudo de caso para Moçambique. 1-8. 2014. Recife, V Congresso Brasileiro de Energia Solar.

- COSTA, H., ARAUTO, K., & COSTA, G. N. Água do Sol - Uso da Energia Fotovoltaica na Pequena Irrigação de Base Familiar no Semi-árido Brasileiro. <http://www.asades.org.ar/modulos/averma/trabajos/2006/2006-t004-a005.pdf>. *AVERMA - Avances en Energias Renovables y Medio Ambiente* **10**. 2006. Argentina.
- DE ANDRADE, E. H. P., BIZERRA, L. D. S., ANTUNES, F. L. M., & BORGES NETO, M. R. Sistema de Bombeamento de Água com Energia Solar Fotovoltaica Utilizando Motor de Indução Trifásica. <http://www.nipeunicamp.org.br/agrener/anais/2008/Artigos/53.pdf>. 2008. 26-8-2014.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. http://www.epe.gov.br/geracao/documents/estudos_23/nt_energiasolar_2012.pdf. *Governo Federal do Brasil*, 1-64. 2012. Brasil, Ministério de Minas e Energia. 19-9-2014.
- FEDRIZZI M. C. 2003. Sistemas Fotovoltáicos de abastecimento de água para uso comunitário: Lições apreendidas e procedimentos para potencializar sua difusão. Universidade de São Paulo. Doutorado .pp 201.
- FEDRIZZI M. C. & SAUER I. L. 2002. Bombeamento Solar Fotovoltaico, Histórico, Características e Projetos. Congresso Brasileiro de Energia. Rio de Janeiro - Brasil,
- FIASCHI D., GRANIGLIA R. & MANFRIDA G. 2005. Improving the effectiveness of solar pumping systems by using modular centrifugal pumps with variable rotational speed. *Solar Energy* **79**: 3, 234-244.
- FRAIDENRAICH, N. & COSTA, H. Procedure for the determination of the maximum surface wick can be irrigated by a photovoltaic pumping system. *Solar Wind Technology* **5**: 2. 1998.
- GREEN M. A., EMERY K., HISHIKAWA Y., WARTA W. & DUNLOP E. D. 2013. Solar cell efficiency tables (version 41). *Prog Photovolt: Res Appl* **21**: 1, 1-11.
- GREEN M. A., EMERY K., HISHIKAWA Y., WARTA W. & DUNLOP E. D. 2014. Solar cell efficiency tables (version 44). *Prog Photovolt: Res Appl* **22**: 7, 701-710.
- HAHN A. 1998. Lessons learned from the international photovoltaic pumping program. 15th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Vienna., 2941 - 2945.
- HALCROW, W. et. al. Handbook on solar water pumping: intermediate technology power. 1984. Londres, Intermediate Technology Publications.
- IEA. World Energy Outlook 2010. <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weo2010.pdf>., 130-133. 2010. Paris - France, International Energy Agency.
- IFM ELECTRONIC. Ficha técnica do sensor de vazão SU 7000. 2010a.
- IFM ELECTRONIC. Manual de instruções - Sensor de pressão combinado. 2010b.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Agropecário 2006. Resultados Preliminares.

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/2006/agropecuario.pdf>, 1-146. 2007. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 19-9-2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo 2010. 2014. 6-10-2014.

Instituto Joazeiro de Desenvolvimento Sustentável. Instalação de Centros de Referência. <http://www.institutojoazeiro.org.br/projeto>. 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, N. E. Q. I. Tabela de consumo/Eficiência energética - Componentes fotovoltaicos. <https://pt.scribd.com/doc/86202964/Classificacao-INMETRO-dos-paineis.4>. 2011.

JUCÁ S. C. S. 2014. Desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados sem fio aplicados á microgeração descentralizada. Universidade Federal do Ceará. Tese de doutorado .

KAPADIA, K. Productive Uses of Renewable Energy: A Review of Four Bank - GEF Projects. <http://www.eci.ox.ac.uk/publications/downloads/kapadia04-consultancy.pdf>, 1-33. 2004.

KOLLING E. M., de SOUZA S. N. M., RICIERY R. P., SAMPAIO S. C. & DALLACORT R. 2004. Análise Operacional de um Sistema Fotovoltaico de Bombeamento de Água. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal* **23**: 3, 527-535.

KONER P. K. 1993. A review on the diversity of photovoltaic water pumping systems. *ERIC International Energy Journal* **15**: 2.

KÜSTER, A., MARTÍ, J. F., NOGUEIRA, L. A. H., TONIOLO, E. R., CAMPELLO, F. B., PAUPITZ, J., MELCHERS, I., & ANHALT, J. Tecnologia Apropriada para Terras Secas: Manejo Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Semi-áridas no Norte do Brasil. http://www.cbn.org.br/redemi/images/download/tecno_adequada/tecno_apropriada_terra_seca.pdf, 1-212. 2006. Fortaleza - Ceará, Fundação Konrad Adenauer e GTZ.

LOPES, F. B., CAITANO, R. F., & de SOUZA, F. Estimativa do Déficit Hídrico e a Demanda da Agricultura Irrigada no Estado do Ceará, Brasil. 1-6. 2012. Fortaleza, Ceará, IV WINOTEC - Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação.

MALBRANCHE P., SERVANT J. M., HELM P. & HAENEL A. 1994. Recent developments in photovoltaic water pumping applications and research in the european community. 476 - 481.

MARQUELLI, W. A. & SILVA, W. L. C. Seleção de Sistemas de Irrigação para Hortaliças. http://www.cnph.embrapa.br/paginas/bbeletronica/2011/ct/ct_98.pdf.2 Edição, 1-24. 2011. Embrapa. 20-9-2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Manual de Projectos Especiais: Programa Luz para Todos. https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Manual_de_Projetos_Especiais2011-2014.pdf, 1-20. 2011a. Brasil, Governo Federal do Brasil. 5-3-2014a.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Manual de Projectos Especiais: Programa Luz para Todos.

https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Manual_de_Projetos_Especiais2011-2014.pdf, 1-20. 2011b. Brasil, Governo Federal do Brasil. 5-3-2014b.

MINISTRY OF NATURAL RESOURCES CANADA. RETScreen software, online user manual.

http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CCkQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.retscreen.net%2Fdownload.php%2Fang%2F454%2F0%2FG_SHP3.pdf&ei=BbKBVI6PNsPkoATj-ILQAQ&usg=AFQjCNEpVgMQE4O7clhn09BGpcdJCPx6w&sig2=AzMItImPIOVtS3uQ8dQP2Q. 2014.

NARVARTE L. & LORENZO E. 2010. Sustainability of PV water pumping programmes: 12-years of successful experience. *Prog Photovolt: Res Appl* **18**: 4, 291-298.

NOGUEIRA C. U. 2009. Utilização de Sistema Solar e Eólico no Bombeamento de Água para Uso na Irrigação. Universidade Federal de Santa Maria. Mestrado 3 - 102.

ODEH I., YOHANIS Y. G. & NORTON B. 2006. Influence of pumping head, insolation and PV array size on PV water pumping system performance. *Solar Energy* **80**: 1, 51-64.

OLIVEIRA R. S. H. 2011. Planta laboratorial de dessalinização via osmose reversa alimentada por energia solar fotovoltaica com ou sem baterias. Universidade Federal do Ceará. Mestrado 1 - 196.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., de ABREU, S. L., & RÜTHER, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar. http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf.^{1ª} Edição, 1-64. 2006. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 20-9-2014.

PINHO, J. T. & GALDINO, M. A. 2014. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. CRESESB/CEPEL, Rio de Janeiro.

SANTOS E. C., de SOUZA L. C., SOUTO J. S. & FILHO J. B. d. A. 2007. Energia Solar na Fruticultura Irrigada Familiar. *Tecnologia & Ciência Agropecuária* **1**: 2, 1-7.

STANHILL, G. 1984. *Energy and agriculture*. Springer Heidelberg New York Tokyo, Berlin.

TANJI, K. K. & YARON, B. Management of water use in agriculture. **Advanced series in agricultural sciences**: 22, 1-320. 1994.

THE WORLD BANK. World Development Report 2008: Agriculture for Development. http://siteresources.worldbank.org/INTWDR2008/Resources/WDR_00_book.pdf, 3-4. 2014. Washington DC, The World Bank.

TIBA, C. Atlas Solarimétrico do Brasil - Banco de Dados Terrestres. http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf, 1-116. 2000. Recife - Brasil, Editora Universitária da UFPE. 20-9-2014.

VALER MORALES L. R. 2011. A Utilização de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento para Irrigação em Pequenas Propriedades Rurais. Universidade de São Paulo. Mestrado **Energia**: 5 - 170.













VALER, L. R., FEDRIZZI, M. C., MELENDEZ, T. A., & ZILLES, R. Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento para Uso na Agricultura. <http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2010/Trabalhos/valersistemas.pdf>, 1-11. 2010. Universidade de São Paulo, AGRENER. 20-9-2014.

WICKLE, P. W. & ALACHE, J. Ex-post Evaluation 2007 Resource - Conserving Irrigation with Photovoltaic Pumping Systems in Chile. <https://www.giz.de/de/downloads/gtz2007-en-chile-energy-ex-post-evaluation.pdf>, 55-63. 2008. Deutsche Gesellschaft für. 29-9-2014.

ZAKI A. M. & ESKANDER M. N. 1996. Matching of photovoltaic motor-pump systems for maximum efficiency operation. *Renewable Energy* **7**: 3, 279-288.

APÊNDICES

Apêndice 1: Material de canalização hidráulica usado

ITEN	Descrição	Quantidade	Imagem
1	Microaspersor bailarina	12	
2	Registro para bloqueio de vazão, bitola de 1"	4	
3	Joelho interno duplo, bitola de 1/2"	8	
4	Tê PVC soldável com bucha de latão, 1/2"	4	
5	Joelho PVC 90° soldável, 1"	1	
6	Luva PVC soldável, 1"	4	
7	Luva PVC soldável, 1/2"	1	
8	Redução PVC soldável, 1" - 1/2"	1	
9	Adaptador rosca soldável, 1/2"	2	
10	Tê PVC soldável, 1"	1	
11	Tubo PVC soldável, 1/2"		
12	Tubo agropecuário PVC, 1"		

Apêndice 2: Etapas de implantação e produção da unidade instalada

Construção da unidade de produção



Plantio e fase inicial do crescimento do coentro



Seleção de mudas e estagio de crescimento do coentro



Colheita e classificação do coentro



Pesagem e empacotamento do coentro para distribuição



Teste no solo do sensor de umidade



Unidade desenvolvida em operação com o cultivo da alface



Reunião de planificação



ANEXOS

Anexo 1

Tabela B1 - ETo médio para varias regiões agroclimáticas em mm/dia

Região	Temperatura media diária (°C)		
	Frio (~ 10°C)	Moderado (20°C)	Quente (>30°C)
Trópicos e subtropicos			
- Úmido e semiúmido	2 – 3	3 – 5	5 – 7
- Árido e semiárido	2 – 4	4 – 6	6 – 8
Clima temperado			
- Úmido e semiúmido	1 – 2	2 – 4	4 – 7
- Árido e semiárido	1 – 3	4 – 7	6 – 9

Fonte: ALLEN et al. 1998

Tabela B2 - Valores médios do Coeficiente de cultura para diversas plantas

Cultura	Inicial	Fase fonológica da cultura		
		Crescimento vegetativo	Intermediário	Final
Alface/ Espinafre	0,45	0,60	1,00	0,90
Batata	0,45	0,75	1,15	0,85
Beterraba	0,45	0,80	1,15	0,80
Cebola	0,50	0,75	1,05	0,85
Cebolinha verde	0,50	0,70	1,00	1,00
Cenoura	0,45	0,75	1,05	0,90
Ervilha	0,45	0,80	1,15	1,05
Feijão (verde)	0,35	0,70	1,10	0,90
Feijão (maduro)	0,35	0,70	1,10	0,30
Lentilha	0,45	0,75	1,10	0,50
Melão	0,45	0,75	1,00	0,75
Milho doce	0,40	0,80	1,15	1,00
Milho	0,40	0,80	1,15	0,70
Pimentão	0,35	0,70	1,05	0,70
Rabanete	0,45	0,60	0,90	0,90
Tomate	0,45	0,75	1,15	0,80

Fonte: DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H, 1979

Anexo 2

Tabela 6.6 - Perda de carga em tubulações de PVC. Fonte: Adaptado de (Creder, 2006).

Perdas de Carga (perda equivalente em metros de altura manométrica para cada 100 m de tubulação)							
Vazão (L/h)	Diâmetro interno da tubulação (mm)						
	19	26	32	38	50	63	75
500	1,15						
1.000	4,65	1,15	0,23				
2.000	22,40	5,30	1,43	0,55			
3.000		9,90	2,50	1,00	0,50	0,18	
4.000		16,25	4,55	2,00	0,83	0,38	0,14
5.000			6,45	2,60	1,15	0,48	0,17
6.000			9,25	4,30	1,55	0,58	0,20
7.000			12,85	5,45	2,00	0,68	0,25
8.000			16,60	7,50	2,50	0,90	0,30
9.000				9,45	3,05	1,13	0,40
10.000				12,50	4,25	1,40	0,58
12.000				15,45	5,45	1,90	0,75
15.000				23,50	8,10	3,00	1,18

Tabela 6.7 - Perdas de carga em conexões de PVC. Fonte: Adaptado de (Creder, 2006).

Perdas de Carga (m) por tipo de conexão – Equivalência em metros lineares de tubulação de mesmo diâmetro interno			
Conexão	Diâmetro interno da tubulação (mm)		
	32	50	63
Joelho 45°	0,274	0,457	0,610
Joelho 90°	0,457	0,762	1,067
T	0,762	1,067	1,524
Válvula Globo	7,620	13,716	16,764
Válvula Gaveta	0,183	0,305	0,396
Válvula de Retenção	0,914	1,524	2,134

Anexo 3



INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM



Tabelas de Consumo / Eficiência Energética - Componentes Fotovoltaicos - Edição 04/11

Categoria: MÓDULOS

Nº Modelos: 99

Nº Marcas: 18

CLASSES	ÍNDICE MÓDULO		SILÍCIO CRISTALINO		FILMES FINOS		EE
	SILÍCIO CRISTALINO (MONO-SI / MULTI-SI)	FILMES FINOS	TOTAL	%	TOTAL	%	
A	EE > 13,5	EE > 9,5	40	40,8	0	0,0	Mais eficiente
B	13,5 >= EE > 13,0	9,5 >= EE > 7,5	15	15,3	1	100,0	
C	13,0 >= EE > 12,0	7,5 >= EE > 6,5	24	24,5	0	0,0	
D	12,0 >= EE > 11,0	6,5 >= EE > 5,5	4	4,1	0	0,0	
E	EE < 11,0	EE > 5,5	15	15,3	0	0,0	Menos eficiente
			98	100,0	1	100,0	

A) SILÍCIO CRISTALINO (mono-Si ou multi-Si)

FABRICANTE	MARCA	FAMÍLIA / MODELO	ÁREA EXTERNA (m ²)	POTENCIA NA CONDIÇÃO PADRÃO (W)	CORRENTE NO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (A)	PRODUÇÃO MÉDIA MENSAL DE ENERGIA (kWh/mês)	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (%)	PESO (kg)	CLASSIFICAÇÃO
CONERGY	PHOTON	Q 80 PI	0,583	80	4,50	9,41	12,9	7,0	C
CONERGIA	SUNCO	SSM 40	0,354	40	2,20	5,00	11,3	5,8	D
CONERGIA	SUNCO	SSM 80	0,660	80	4,58	10,00	12,1	9,2	C
CONERGIA	SUNCO	SSM 120	0,971	120	3,43	15,00	12,4	14,0	C
CONERGIA	SUNCO	SSM 175	1,277	175	4,64	21,88	13,7	17,0	A
ELTEK	NAPS	NP 125 GK	0,992	125	7,30	15,63	12,6	10,6	C
ELTEK	NAPS	NP 130 GK	0,992	130	7,50	16,25	13,1	10,6	B
ELTEK	ERDM	QM 590/12	0,655	90	5,13	11,25	13,7	11,0	A
ELTEK	ERDM	QP6-130/12	0,994	130	7,65	16,25	13,1	14,0	B
EXXA GLOBAL	EXXA SOLAR	CSUN 50M	0,356	50	2,67	6,25	13,9	5,1	A
EXXA GLOBAL	EXXA SOLAR	CSUN 60M	0,440	60	3,21	7,50	13,7	6,0	A
EXXA GLOBAL	EXXA SOLAR	CSUN 75M	0,509	75	4,03	9,38	14,7	6,8	A
EXXA GLOBAL	EXXA SOLAR	CSUN 100M	0,662	100	5,35	12,50	15,0	8,5	A
EXXA GLOBAL	EXXA SOLAR	CSUN 150M	0,992	150	8,03	18,75	15,1	12,5	A
EXXA GLOBAL	EXXA SOLAR	CSUN 220M	1,465	220	8,04	27,50	15,0	17,8	A
EXXA GLOBAL	EXXA SOLAR	CSUN 290M	1,936	290	8,11	36,25	14,9	23,8	A
EXXA GLOBAL	EXXA SOLAR	CSUN 135-36P	0,992	135	7,72	16,88	13,6	13,0	A
FC SOLAR	FC SOLAR	MDP-215	1,468	215	7,88	26,88	14,6	17,2	A
GUASCOR	SUNTECH	STP075S-12Bb	0,646	75	4,35	9,37	11,6	8,0	D
GUASCOR	SUNTECH	STP085S-12/Bb	0,646	85	4,80	10,63	13,1	8,0	B

Valores de referência medidos em laboratórios, conforme procedimentos estabelecidos no Regulamento de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica

Anexo 4

"Preço *FEED-IN*" refere-se ao valor final da tarifa após o incentivo percentual dado.

Tabela 3 - Valores da tarifa *Feed In* por estado para tomar o RCB menor que 1

Estado	Preço Final Anterior [R\$/kWh]	Aumento percentual	Preço FEED-IN [R\$/kWh]	RCB
Acre	0,48	20%	0,58	0,93
Alagoas	0,39	40%	0,55	0,98
Amapá	0,26	130%	0,59	0,99
Amazonas	0,39	50%	0,59	0,99
Bahia	0,42	20%	0,51	0,98
Ceará	0,41	30%	0,54	0,93
Distrito Federal	0,29	70%	0,50	0,97
Espírito Santo	0,45	40%	0,64	0,97
Goiás	0,45	20%	0,55	0,92
Maranhão	0,44	20%	0,53	0,95
Mato Grosso	0,44	20%	0,53	0,94
Mato Grosso do Sul	0,42	20%	0,51	0,99
Minas Gerais	0,54	0%	0,54	0,90
Pará	0,35	60%	0,56	0,99
Paraíba	0,43	40%	0,60	0,95
Paraná	0,49	10%	0,54	0,98
Pernambuco	0,43	30%	0,56	0,99
Piauí	0,49	10%	0,54	0,92
Rio de Janeiro	0,41	50%	0,62	0,94
Rio Grande do Norte	0,40	40%	0,56	0,96
Rio Grande do Sul	0,34	60%	0,54	0,97
Rondônia	0,44	40%	0,61	0,94
Roraima	0,41	40%	0,57	1,00
Santa Catarina	0,33	90%	0,63	0,98
São Paulo	0,37	40%	0,52	0,95
Sergipe	0,34	70%	0,58	0,95
Tocantins	0,50	10%	0,55	0,96
Média Brasil	0,41	40%	0,56	0,96

RCB – Relação custo benefício.

VIEIRA, A.R. *Análise de políticas de subsídio para geração distribuída de energia fotovoltaica nas residências brasileiras*. Universidade Federal de Santa Catarina. Monografia. 2013. Pp98.

Tabela 4 - Abatimento no custo total de instalação por estado

Estado	Desconto	Custo Total final [R\$]	RCB
Acre	15,00%	23.060,61	0,95
Alagoas	30,00%	18.991,09	0,96
Amapá	60,00%	10.852,05	0,91
Amazonas	35,00%	17.634,58	0,96
Bahia	20,00%	21.704,10	0,95
Ceará	20,00%	21.704,10	0,96
Distrito Federal	40,00%	16.278,08	0,98
Espírito Santo	30,00%	18.991,09	0,95
Goiás	10,00%	24.417,12	0,99
Maranhão	15,00%	23.060,61	0,97
Mato Grosso	15,00%	23.060,61	0,96
Mato Grosso do Sul	20,00%	21.704,10	0,95
Minas Gerais	0,00%	27.130,13	0,90
Pará	20,00%	21.704,10	0,96
Paraíba	30,00%	18.991,09	0,93
Paraná	30,00%	18.991,09	0,99
Pernambuco	25,00%	20.347,60	0,97
Piauí	5,00%	25.773,62	0,96
Rio de Janeiro	30,00%	18.991,09	0,98
Rio Grande do Norte	30,00%	18.991,09	0,94
Rio Grande do Sul	40,00%	16.278,08	0,93
Rondônia	25,00%	20.347,60	0,99
Roraima	30,00%	18.991,09	0,98
Santa Catarina	50,00%	13.565,06	0,93
São Paulo	25,00%	20.347,60	1,00
Sergipe	40,00%	16.278,08	0,97
Tocantins	10,00%	24.417,12	0,95
Média do Brasil	25,93%	20.096,39	0,96

VIEIRA, A.R. *Análise de políticas de subsídio para geração distribuída de energia fotovoltaica nas residências brasileiras*. Universidade Federal de Santa Catarina. Monografia. 2013. Pp98.

Anexo 5

BOMBAS DE DIAFRAGMA
SHURflo[®]
 First in Fluid Innovation

FICHA TÉCNICA DO PRODUTO

MODELO: 8000-443-136

ESPECIFICAÇÕES:

MODELO NÚMERO: 8000-443-136

TIPO DE BOMBA: Deslocamento Positivo – 3 Câmaras de Diafragma

VÁLVULA DE SEGURANÇA: (1-Via) Previne Fluxo Reverso

CAME: 3.0 Graus

MOTOR: Ímã Permanente, P/N 11-111-00

VOLTAGEM: 12 VCC Nominal

PRESSOSTATO: Desligamento Ajustável (Alcance 40-60 PSI)

Configuração de Fábrica: 60 PSI, Liga 45 PSI \pm 5 PSI

TEMPERATURA DO LÍQUIDO: 77°C Max.

SUCÇÃO: Auto-escorvação de até 3,66 m Vertical,
 Max. Pressão de Entrada 30 PSI (2.1 Bar)

SAÍDAS: 1/2"-14 Paralelo Macho

MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO:

PLÁSTICOS- Polipropilênio

VALVULAS- EPDM

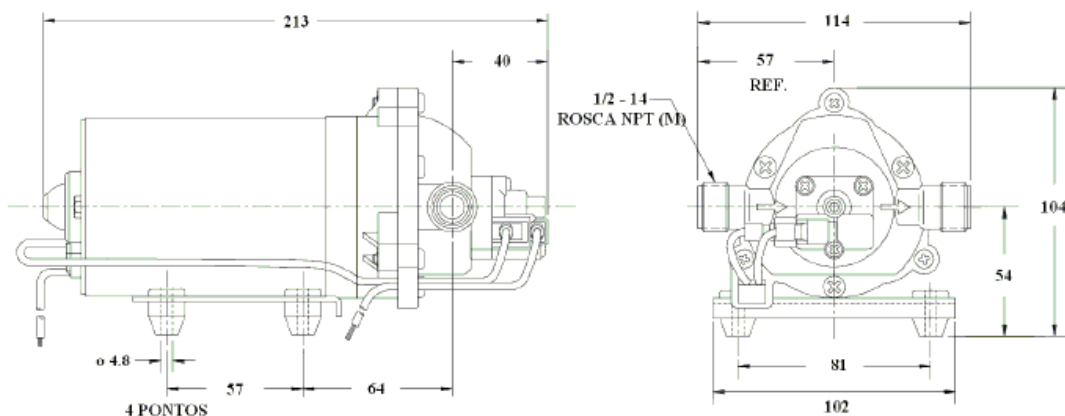
DIAFRAGMA- Santoprene

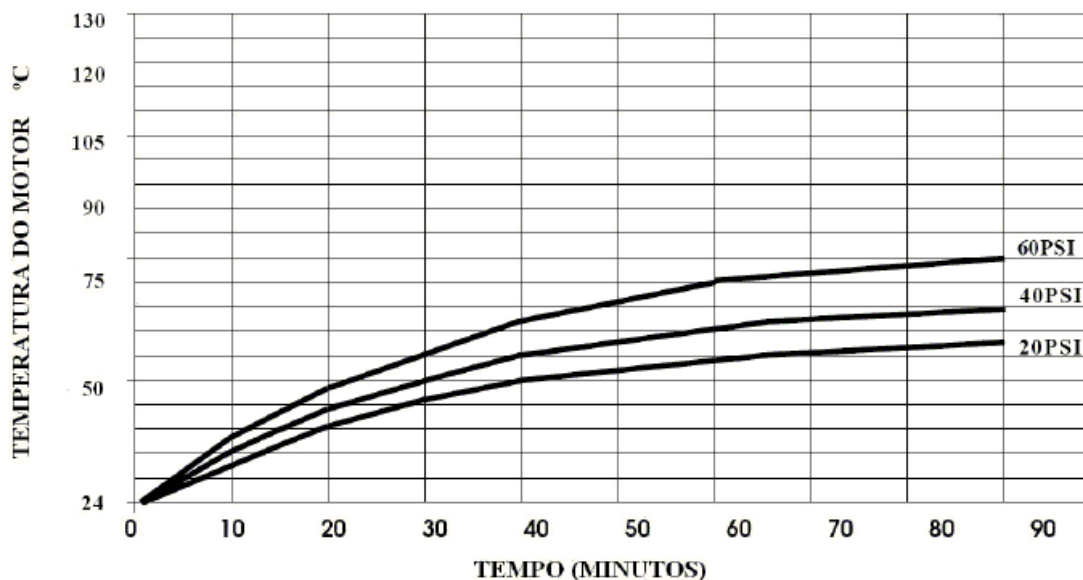
BASE- Aço Zincado

PESO LÍQUIDO: 2.07 Kg

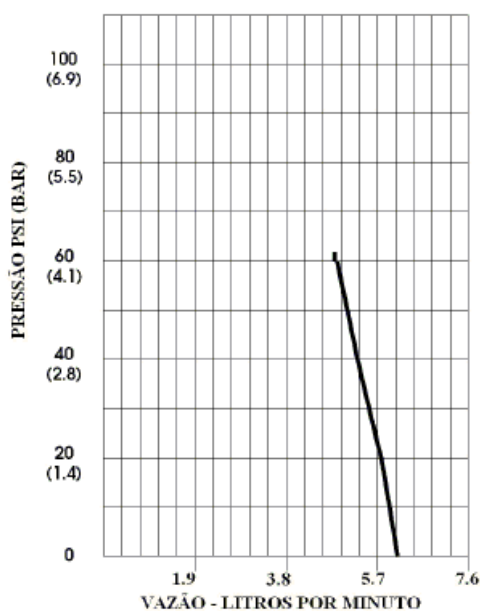
CICLO DE SERVIÇO: Contínuo (Ver Curva de Temperatura)

APLICAÇÕES TÍPICAS: Bombeamento de Água

DIMENSÕES:

MODELO: 8000-443-136
CURVA DE TEMPERATURA


ESTE GRÁFICO É PARA SER UTILIZADO COMO UM GUIA PARA PROJETOS. É BASEADO EM USO CONTÍNUO EM AMBIENTE A 24°C.

PERFORMANCE TÍPICA


PRESSÃO (PSI)	VAZÃO (LPM)	RPM MIN/MAX	CORRENTE (AMPS)	VOLTAGEM (VOLTS)
ABERTO	6.6	2290/2315	3.1	12 VCC
10	6.3	2225/2255	3.4	12 VCC
20	5.9	2170/2205	4.2	12 VCC
30	5.6	2130/2155	4.9	12 VCC
40	5.2	2045/2085	5.6	12 VCC
50	4.9	2020/2045	6.9	12 VCC
60	4.6	1893/1970	7.2	12 VCC

-ESPECIFICAÇÕES SUJEITAS A ALTERAÇÕES SEM AVISO PRÉVIO.

-TODOS OS DADOS SÃO BASEADOS EM TESTES COM ÁGUA À TEMPERATURA AMBIENTE.