



Universidade Federal do Amapá
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais



ANDRÉ OLIVEIRA QUEIROZ

SISTEMA FOTOVOLTAICO DE CONEXÃO DIRETA EM APLICAÇÃO
MULTIMOTORES PARA O SETOR RURAL

MACAPÁ – AP
2019

ANDRÉ OLIVEIRA QUEIROZ

SISTEMA FOTOVOLTAICO DE CONEXÃO DIRETA EM APLICAÇÃO
MULTIMOTORES PARA O SETOR RURAL

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais (PPGCA) da
Universidade Federal do Amapá,
como requisito parcial à obtenção do
título de Mestre em Ciências
Ambientais.

Orientador: Dr. Alaan Ubaiara Brito.

MACAPÁ - AP

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central da Universidade Federal do Amapá
Elaborada por Cristina Fernandes – CRB2/1569

Queiroz, André Oliveira.

Sistema fotovoltaico de conexão direta em aplicação multimotores para setores para o setor rural. / André Oliveira Queiroz; Orientador, Alaan Ubaiera Brito. – 2019.
87 f.

Dissertação (Mestrado) – Fundação Universidade Federal do Amapá, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais.

1. Sistema fotovoltaico de bombeamento com conversor de frequência. 2. Equipamento agrícola. 3. Beneficiamento de mandioca (*Manihot esculenta Crantz*). I. Brito, Alaan Ubaiera, orientador. II. Fundação Universidade Federal do Amapá. III. Título.

571.97 Q3s
CDD. 22 ed.

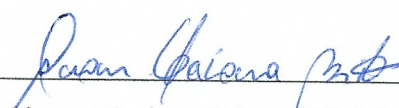
ANDRÉ OLIVEIRA QUEIROZ

**SISTEMA FOTOVOLTAICO DE CONEXÃO DIRETA EM APLICAÇÃO
MULTIMOTORES PARA O SETOR RURAL**

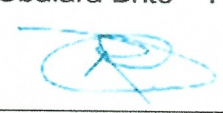
Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais (PPGCA) da
Universidade Federal do Amapá,
como requisito parcial à obtenção do
título de Mestre em Ciências
Ambientais.

Aprovada em 26 de abril de 2019.

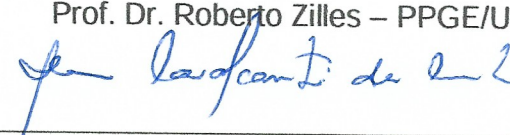
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Alaán Ubaiara Brito – PPGCA/UNIFAP



Prof. Dr. Roberto Zilles – PPGE/USP



Prof. Dr. Alan Cavalcanti da Cunha – PPGCA/UNIFAP



Prof. Dr. Geraldo Neves de Albuquerque Maranhão – PROFNIT/UNIFAP

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela sabedoria, saúde e perseverança concedida durante estes dois anos, permitindo a realização e finalização deste trabalho.

Ao meu orientador Dr. Alaan Ubaiara Brito, por ter aceitado orientar-me neste programa, pelas contribuições relevantes realizadas e acompanhamento na pesquisa de campo.

Aos Prêmios Professor Samuel Benchimol e Banco da Amazônia de Empreendedorismo Consciente edição 2018, pelo reconhecimento do projeto e apoio financeiro fundamental para o sucesso deste trabalho.

À minha família, pelo apoio incondicional à minha formação acadêmica e pessoal.

À minha querida noiva Luanda, pelo apoio emocional concedido nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos do PPGCA, Evellyn Façanha e Rafael Neri, pelos momentos de conversa, descontração e por todo o apoio acadêmico que foi imprescindível para o êxito desta jornada.

Ao sr. Manoel de Oliveira e toda sua família, pela hospitalidade em sua residência e auxílios fornecidos durante os ensaios de campo e instalação do equipamento agrícola.

Ao Gilvan Portela, por sua grande prestatividade em toda a logística necessária para a realização deste trabalho, pelas histórias, conversas durante as refeições e por toda a motivação concedida enquanto realizávamos nossas viagens.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a conclusão deste trabalho, crescimento profissional e pessoal, a minha profunda gratidão.

RESUMO

QUEIROZ, A. O. **Sistema fotovoltaico de conexão direta em aplicação multimotores para o setor rural**. 87 f. Dissertação – Departamento de Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2019.

Os sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversor de frequência (SFB-CF) geralmente são utilizados em localidades onde não há abastecimento de água e atendimento energético convencional. Por se tratar de um sistema fotovoltaico de conexão direta é comum a ocorrência de duas situações de operação: energia disponível e o reservatório cheio ou energia disponível e insuficiente para realizar o bombeamento de água. Nestes cenários, o gerador fotovoltaico estará sendo subutilizado. Deste modo, a proposta deste trabalho consistiu em avaliar o uso compartilhado do gerador fotovoltaico de SFB-CF em uma aplicação multimotores, ou seja, uma motobomba e um motor de indução trifásico de um equipamento agrícola conectados ao mesmo conversor de frequência. O local de estudos foi o laboratório de energias renováveis da Universidade Federal do Amapá e uma propriedade agrícola localizada no município de Itaubal-AP. A carga motriz selecionada para integrar o SFB-CF foi o ralador de Mandioca, sendo um protótipo construído com motor de $\frac{1}{2}$ CV para os ensaios de laboratório e um ralador de Mandioca reformado na propriedade agrícola para os ensaios de campo, a reforma consistiu na substituição de um motor à gasolina 5,5 CV por um motor elétrico trifásico 1 CV. Em seguida, houve a programação no conversor de frequência que se mostrou compatível com a motobomba do SFB-CF e os dois motores utilizados nos raladores. O ensaio de laboratório foi realizado utilizando o equipamento a cada duas horas, enquanto que os ensaios de campo foram realizados de forma contínua, simulando a utilização do agricultor. Durante os ensaios, foi possível sintonizar o controlador PID do sistema e o controle escalar para o motor de $\frac{1}{2}$ CV. Os resultados apontam que só há bombeamento de água em frequências superiores a 32 Hz na motobomba, as quais foram obtidas em valores de irradiância a partir de 375 W/m². Os testes em campo dos motores foram realizados em período chuvoso com irradiância máxima de 351,83 W/m², nestas condições meteorológicas o ralador com motor de $\frac{1}{2}$ CV funcionou com velocidade nominal em todos os períodos testados e o de 1 CV operou de forma satisfatória, porém com velocidade reduzida. O rendimento mínimo do ralador foi estimado em 800 g/min e sua utilização em 4 horas diárias, o que representa uma produção diária mínima de 192 kg de Mandioca ralada e uma capacidade de tempo de retorno de investimento inferior a um mês. Conclui-se, com a elaboração deste estudo, que é possível otimizar o uso de energia em SFB-CF compartilhando o conversor de frequência com duas cargas motrizes distintas. A programação e o ajuste no controlador PID realizados mostram-se compatíveis com ambos os motores utilizados, desse modo a aplicação final torna-se de fácil operação e, portanto, adequada para o setor rural.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico de bombeamento com conversor de frequência, Equipamento agrícola, Beneficiamento de Mandioca (*Manihot esculenta* Crantz).

ABSTRACT

QUEIROZ, A. O. **Direct-coupled photovoltaic system in multimotor application for the rural sector**. 87 f. Master Thesis – Department of Environment and Development, Federal University of Amapá, Macapá, 2019.

Variable-speed drive pumping system (PVPS-VSD) are generally used in conditions where there is no water supply and conventional energy service. Because it is a direct-coupled photovoltaic system, it is common two operating situations: available energy and the full storage tank or available energy and insufficient to perform water pumping. In these scenarios, the photovoltaic generator will be underused. Therefore, the proposal of this work was to evaluate the shared use of the photovoltaic generator of PVPS-VSD in a multi-motor application, i.e. a motorpump and a three-phase induction motor of an agricultural equipment connected to the same variable-speed drive. The study site was the renewable energy laboratory of the Federal University of Amapá and an agricultural property located in the county of Itaubal-AP. The motor load selected to integrate the PVPS-VSD was the Cassava grater, being a prototype built with a 0.5 HP motor for the laboratory tests and a Cassava grater reformed in the agricultural property for the field study, the reform consisted in the substitution of a petrol engine 5.42 HP by a three-phase electric motor 1 HP. Then, there was the programming in the variable-speed drive that proved to be compatible with the motorpump of the PVPS-VSD and the two motors used in the graters. The laboratory test was performed using the equipment every two hours, while the field study were carried out continuously, simulating the use of the farmer. During the tests, it was possible to tune the system PID controller and the scalar control to the 0.5 HP motor. The results indicate that there is only water pumping at frequencies above 32 Hz in the motorpump, which were obtained in irradiance values from 375 W/m². The field tests of the motors were carried out in a rainy season with a maximum irradiance of 351.83 W/m², under these meteorological conditions the grater with a 0.5 HP motor operated at rated speed in all periods tested and the 1 HP operated satisfactorily, but with reduced speed. The minimum yield of the grater was estimated at 800 g/min and its use in 4 hours per day, which represents a minimum daily production of 192 kg of grated Cassava and a payback of less than one month. It is concluded, with the elaboration of this study, that it is possible to optimize the energy use in PVPS-VSD by sharing the variable-speed drive with two different motor loads. The programming and adjustment in the PID controller are shown to be compatible with both motors used, so the final application becomes easy to operate and therefore suitable for the rural sector.

Keywords: Variable-speed drive photovoltaic pumping system, Agricultural equipment, Processing of Cassava (*Manihot esculenta* Crantz).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de um SFB-CF	22
Figura 2 – Diagrama de um conversor de frequência	27
Figura 3 – Diagrama de blocos de um sistema malha fechada com controlador PID	28
Figura 4 – Terminais de entrada e saída do conversor de frequência	29
Figura 5 – Circuito divisor de tensão para o sistema malha fechada do CF	29
Figura 6 – Curva tensão/frequência do conversor de frequência CFW500	30
Figura 7 - Variação de vazão e irradiância para o SFB-CF ao longo dia	34
Figura 8 - Alimentos cultivados x número de estabelecimentos (lavouras permanentes)	38
Figura 9 – Alimentos cultivados x Produção em toneladas (lavouras permanentes)	38
Figura 10 – Alimentos cultivados x número de estabelecimentos (lavouras temporárias)	39
Figura 11 – Alimentos cultivados x Produção em toneladas (lavouras temporárias)	39
Figura 12 – SFB-CF instalado no lote do agricultor.....	42
Figura 13 – Equipamento utilizado pelo agricultor para ralar Mandioca.....	42
Figura 14 – Estrutura metálica do ralador de mandioca utilizado	44
Figura 15 – Configuração do SFB-CF com a integração do equipamento agrícola.	45
Figura 16 – Protótipo do painel elétrico e do ralador de mandioca.	46
Figura 17 – Circuito divisor de tensão para realimentação do controlador PID.....	46
Figura 18 – Ralador de mandioca após a substituição do motor à gasolina por um motor elétrico.....	47
Figura 19 – Gerador fotovoltaico utilizado nos testes de laboratório.....	48
Figura 20 – Diagrama com os equipamentos e sensores utilizados.	49
Figura 21 – Bancada montada no laboratório para realização dos testes.....	49
Figura 22 – Protótipo montado em campo para realização dos ensaios.	50
Figura 23 – Preparação da Mandioca para o processo de ralagem.....	53
Figura 24 – Ralagem de Mandioca realizada no ensaio de laboratório.....	53
Figura 25 – Produção de mandioca ralada (g/min) em intervalos de duas horas.	54
Figura 26 – Preparação da mandioca na propriedade agrícola.....	55
Figura 27 – Instalação do ralador de Mandioca de ½ CV na propriedade agrícola... ..	55
Figura 28 – Agricultor utilizando o ralador de Mandioca de ½ CV.....	56
Figura 29 – Capacitação dos agricultores para utilização do ralador de Mandioca... ..	58
Figura 30 – Agricultores utilizando o ralador de Mandioca de madeira e com motor de 1 CV.	58
Figura 31 – Pesagem da quantidade ralada de Mandioca no ensaio.....	59
Figura 32 – Inspeção final no quadro da unidade de condicionamento de potência.	60
Figura 33 – Agricultores utilizando o ralador de Mandioca em sua demanda diária de utilização.	61
Figura 34 – Curvas de potência do gerador fotovoltaico de 1.045 Wp em 50°C.	63
Figura 35 – Coleta de dados do ralador de Mandioca ½ CV no ensaio 1.	64

Figura 36 - Curva de potência do gerador fotovoltaico de 1.045 Wp em 35°C.....	66
Figura 37 – Coleta de dados da motobomba no ensaio 3.	67
Figura 38 – Operação da motobomba em diferentes cenários de irradiância.	68
Figura 39 – Produção de mandioca ralada (g/min) estimada para o motor de ½ CV.	69
Figura 40 – Produção de mandioca ralada (g/min) estimada para o motor de 1 CV.	69
Figura 41 – Comparação entre a potência consumida da motobomba e do motor de 1 CV.	70
Figura 42 – Irradiância estimada para o mês de março no município de Itaubal-AP.	71
Figura 43 – Certificado da premiação obtida.....	86
Figura 44 – Troféu da premiação obtida.	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre motores elétricos c.c. e c.a. de SFB	22
Quadro 2 – Programação de conversor de frequência para operar em SFB-CF	32
Quadro 2 (continuação) – Programação de conversor de frequência para operar em SFB-CF	33
Quadro 3 – Parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico do laboratório	47
Quadro 4 – Descrição técnica dos sensores utilizados nos ensaios.	48
Quadro 5 – Parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos instalados na localidade.	50
Quadro 6 – Parâmetros elétricos dos motores utilizados nos ensaios.	51
Quadro 7 – Programação realizada no CFW 500 para SFB-CF e ralador de Mandioca.	52
Quadro 8 – Coleta de dados com o sistema a vazio (sem carga) e em funcionamento (com carga).	54
Quadro 9 – Coleta de dados do ensaio do ralador de Mandioca de ½ CV instalado na propriedade agrícola.	56
Quadro 10 – Ajustes realizados na programação do CF para operar com o motor de 1 CV.	57
Quadro 11 - Coleta de dados do ensaio do ralador de Mandioca de 1 CV operando com média irradiância.	59
Quadro 12 - Coleta de dados do ensaio do ralador de Mandioca de 1 CV operando com a demanda do agricultor.	61
Quadro 13 – Materiais necessários para integrar o ralador de Mandioca ao SFB-CF.	72
Quadro 14 – Análise econômico-financeira da integração do ralador de mandioca ao SFB-CF.	73
Quadro 15 – Equipamentos agrícolas que podem ser integrados ao SFB-CF.....	75
Quadro 16 - Demonstração do cálculo do VPL.	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CF	Conversor de Frequência
CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	Central Process Unit
DAP	Declaração de Aptidão ao Pronaf
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GF	Gerador Fotovoltaico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEPA	Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá
IHM	Interface Homem Máquina
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
LDR	Light Dependent Resistor
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MDA	Ministério do Desenvolvimento Agrário
PID	Proporcional Integral e Derivativo
Pronaf	Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar
SF	Sistemas Fotovoltaicos
SFB-CF	Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento com Conversor de Frequência
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento
UNIFAP	Universidade Federal do Amapá

LISTA DE SÍMBOLOS

c.a.	Corrente alternada
c.c.	Corrente contínua
CV	Cavalo Vapor, equivalente a 736 W
Imp	Corrente de máxima potência
Isc	Corrente de curto circuito
kW	Quilowatt.
kWp	Quilowatt-pico
Stc	Standart Test Conditions
V/F	Controle Escalar
Vca	Tensão em corrente alternada
Vcc	Tensão em corrente contínua
Vmp	Tensão de máxima potência
Voc	Tensão de circuito aberto
VVW	Controle Vetorial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Problemática.....	17
1.2	Hipóteses.....	17
1.3	Justificativa	17
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo Geral	20
2.2	Objetivos Específicos.....	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1	Sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversor de frequência (SFB-CF).....	21
3.1.1	Configuração do gerador fotovoltaico (GF)	24
3.1.2	Especificações do conversor de frequência (CF).....	26
3.1.3	Programação do conversor de frequência em SFB-CF	30
3.2	A relação entre SFB-CF e o setor rural.....	33
3.2.1	A agricultura familiar e o crédito rural	35
3.3	Crédito rural e produção agrícola no Amapá	37
3.4	Contexto histórico de SFB-CF no Amapá	40
4	MATERIAL E MÉTODOS	41
4.1	Definição do local de estudo e da carga motriz agrícola.....	41
4.2	Construção do protótipo para desenvolvimento da atividade produtiva.....	43
4.3	Montagem da instrumentação eletrônica.....	47
4.4	Avaliação do projeto piloto em ensaios de laboratório e de campo	50
5	RESULTADOS	63
5.1	Análise técnica do sistema	63
5.2	Análise da integração do ralador de Mandioca ao SFB-CF	67
5.3	Análise econômico-financeira	71
5.4	Análise da transferência de tecnologia	74
5.5	Equipamentos agrícolas compatíveis com SFB-CF.....	74
6	DISCUSSÃO.....	76
7	CONCLUSÃO.....	78
	REFERÊNCIAS.....	79
	APÊNDICE A – DEMONSTRAÇÃO DO VPL	83

PREMIAÇÃO OBTIDA DURANTE A DISSERTAÇÃO.....	86
---	----

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos são formados por um conjunto de elementos que tem por finalidade a geração e fornecimento de eletricidade pela conversão da energia solar, de modo que a configuração e os componentes utilizados variam de acordo com a aplicação desejada (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Estes sistemas podem ser classificados em: sistemas isolados, sistemas autônomos, sistemas conectados à rede elétrica, sistemas puros ou sistemas híbridos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

Os sistemas fotovoltaicos autônomos consistem seguinte na combinação de: 1) Módulos fotovoltaicos; 2) Controladores de carga; 3) Inversor de frequência e 4) Banco de baterias. Estes sistemas podem ser utilizados em prol do desenvolvimento de regiões remotas, nas quais o custo por eletrificação rural é elevado em relação ao retorno financeiro do investimento.

A intermitência da geração fotovoltaica é compensada pelos bancos de baterias, os quais são dimensionados para atender a demanda de energia elétrica durante períodos noturnos e em dias chuvosos e/ou nublados, ou seja, quando a geração de energia fotovoltaica fica reduzida. Do ponto de vista ambiental, estes sistemas apresentam obstáculos quanto ao uso de tecnologia empregada na construção das baterias e o correto descarte das baterias após o término da sua vida útil.

De acordo com Pinho e Galdino (2014), apesar de existir vários estudos em andamento, o armazenamento de energia em baterias eletrolíticas ainda é o mais utilizado. As baterias eletrolíticas, também conhecidas como baterias de chumbo-ácido, possuem o elemento Chumbo (Pb) que é classificado como um metal pesado¹, tóxico, de efeito acumulativo no organismo e de elevado risco ambiental, que se descartado de forma inadequada pode ultrapassar a capacidade adsortiva² própria do ambiente e tornar-se potencialmente disponível para ser absorvido pelas cadeias alimentares (FERNANDES et al., 2011).

¹ Metais pesados: Elementos químicos cuja massa específica varia entre 3,5 a 6g.cm⁻³, que possuem massa atômica igual ou maior que 23 e número atômico igual ou maior do que 20 (LIMA e MERÇON, 2011).

² Capacidade adsortiva: Capacidade de adesão de moléculas de um fluido em uma superfície sólida.

De modo geral, a desvantagem das baterias em um sistema fotovoltaico autônomo é que, mesmo se corretamente utilizadas e dimensionadas, têm vida útil máxima estimada em cinco anos (ACUMULADORES MOURA, 2016), enquanto que fornecedores estimam uma vida útil de até 30 anos para os módulos fotovoltaicos (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017). Consequentemente, são necessárias manutenções periódicas para averiguar a qualidade das baterias e o correto funcionamento do sistema, sendo que a realização das manutenções requer mão-de-obra qualificada, a qual pode ser escassa ou inexistente em locais de difícil acesso e compostos por comunidades tradicionais.

Uma alternativa para garantir maior confiabilidade, reduzir o número de manutenções e evitar a poluição do meio ambiente com Chumbo é a elaboração de sistemas fotovoltaicos autônomos sem banco de baterias. Estes sistemas geralmente são projetados para energizar de forma direta um determinado equipamento, sendo um dos casos mais comuns os sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água (MUHSEN et al., 2017).

Aliyu et al. (2018) afirmam que, dentre vários fatores, o aumento da percepção dos impactos ambientais negativos causados pela queima de combustíveis fósseis, ocasionou o aumento da pesquisa e desenvolvimento de sistemas de bombeamento de água que pudessem ser alimentados diretamente por fontes renováveis de energia, especialmente a energia solar, que, até os dias atuais, se mostra a mais adequada para este tipo de aplicação.

No cenário nacional, esta tecnologia possuía entraves quanto à compra, manutenção e substituição de componentes que geralmente eram importados e de difícil oferta em mercado local. Uma solução encontrada por grupos de pesquisa foi a utilização de motobombas elétricas convencionais, compostas por motores de indução c.a. trifásicos e acionadas por conversores de frequência devidamente programados (PINHO; GALDINO, 2014).

Valer et al. (2016) realizaram um levantamento das experiências brasileiras com sistemas fotovoltaico de bombeamento com conversores de frequência e, de acordo com os autores, o primeiro sistema instalado no país foi no estado de São Paulo, decorrente da pesquisa “Otimização do acoplamento de geradores fotovoltaicos a motores de corrente alternada através de conversores de frequência comerciais para acionar bombas centrífugas” de autoria de Alaan Ubaiara Brito.

Brito (2006) otimizou o acoplamento de geradores fotovoltaicos a motobombas centrífugas utilizadas em bombeamento de água. Para isso realizou ajustes de sintonia no controlador PID³ de conversores de frequência comerciais. Fedrizzi, Ribeiro e Zilles (2009) avaliaram algumas aplicações de sistemas fotovoltaico de bombeamento com conversores de frequência considerando as especificidades locais e os métodos de transferência de tecnologia.

Driemeier e Zilles (2010) desenvolveram um circuito de baixo custo para monitorar o ponto de máxima potência do sistema, no qual a entrada é a tensão do arranjo fotovoltaico e a saída alimenta o controlador PID do sistema. O estudo resultou em uma eficiência maior que 98% ao rastreador de máxima potência. Maranhão et al. (2015b) propuseram a aplicação de um controlador Fuzzy⁴ no conversor de frequência do sistema fotovoltaico de bombeamento, utilizando um microcontrolador Arduino e um resistor dependente de luz (LDR).

Meléndez, Fedrizzi e Zilles (2016) apresentaram uma caracterização operacional de um sistema fotovoltaico de bombeamento usando conversor de frequência com Controlador Lógico Programável (CLP) e suas vantagens em relação ao conversor de frequência convencional sem CLP, ambos de fabricação nacional. Maranhão et al. (2016) realizaram os testes experimentais do controlador Fuzzy em uma bancada de testes de motobombas, a qual é capaz de simular poços de água com diferentes alturas manométricas. O controlador apresentou uma eficiência média de 23%.

Os sistemas de bombeamento fotovoltaico com conversor de frequência (SFB-CF) utilizados como referência nestes estudos possuem a seguinte configuração: gerador fotovoltaico, conversor de frequência, motobomba com motor indução c.a. trifásico, tanque de armazenamento e/ou sistema de distribuição de água. Desse modo, pelo fato de não possuírem o banco de baterias, quando se faz o dimensionamento destes sistemas, geralmente utiliza-se como critério de dimensionamento o fato de que o volume diário de água fornecido pelo SFB-CF deve ser superior a demanda de consumo, de modo que possa ser garantido os dias mínimos de autonomia, conforme a necessidade.

³ Controlador PID: Técnica de controle de processos comumente utilizada em sistemas de controle industrial. Serve para minimizar o erro destes sistemas.

⁴ Fuzzy: É uma lógica derivada da lógica booleana. Utilizada em controladores e sistemas de inteligência artificial.

1.1 Problemática

Considerando que um SFB-CF geralmente possui capacidade de bombeamento diária superior ao volume de água a ser armazenado por uma residência rural e que os reservatórios são dimensionados para possibilitar mais de um dia de autonomia, observa-se que, durante o dia, pode haver momentos com elevada irradiância⁵ e que o reservatório estará cheio. Desse modo a energia fotovoltaica deixará de ser aproveitada, pois o sistema encontra-se sem finalidade.

Um outro caso frequente acontece nos instantes com irradiância abaixo do valor crítico, tais como: períodos chuvosos/nublados e início da manhã ou final da tarde, em que a energia produzida é insuficiente para o bombeamento de água. Com base nestas informações, questiona-se: como otimizar a utilização da energia produzida em sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversor de frequência?

1.2 Hipóteses

A otimização da utilização da energia produzida em sistemas fotovoltaicos de bombeamento será possível compartilhando a geração fotovoltaica com cargas motrizes adicionais tendo em vista que conversor de frequência é um equipamento que possibilita a ligação de motores de indução trifásicos distintos. A possibilidade da ligação de um segundo motor de indução c.a. ao SFB-CF, além de otimizar o aproveitamento da energia solar fotovoltaica, irá agregar novas funcionalidades a aplicação como, por exemplo, a integração a uma atividade produtiva por meio do uso de equipamentos agrícolas.

1.3 Justificativa

No Brasil, apenas 83,3% da população total é atendida com abastecimento de água tratada, ou seja, são mais de 33 milhões de pessoas que ainda não tem acesso a este tipo de serviço. Na região Norte, o índice desce para 55,4%, o que representa

⁵ Irradiância: Fluxo de energia fornecida pelo Sol, em forma de radiação eletromagnética, em uma determinada área. A unidade de medida é Watt/m².

mais de 6,5 milhões de brasileiros que ainda se encontram nesta situação (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO, 2018).

Nestes locais torna-se comum o uso de sistemas manuais de captação e armazenamento de água ou de bombeamento de água por meio de motores à gasolina/diesel, quando não há o abastecimento convencional de energia elétrica. Diante desse cenário, a utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento mostra-se viável (FEDRIZZI, 2003; BRITO, 2006; FEDRIZZI et al., 2009; MARANHÃO et al., 2015b).

Estima-se que no território nacional 3.300 sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água estejam funcionando desde 2002, dos quais 2.485 foram instalados por meio do Programa para o Desenvolvimento da Energia nos Estados e Municípios – PRODEEM e 300 já foram instalados após este programa (VALER et al., 2016).

Deste modo, considerando que sistemas fotovoltaicos utilizados para bombeamento de água já estão presentes no país e que, até o momento da elaboração desta pesquisa, não foram encontrados trabalhos na literatura que analisem a operação de forma integrada de SFB-CF com um motor de indução trifásico adicional, ressalta-se a relevância deste estudo, pois possibilitará a concepção de uma nova metodologia que aproveitará os benefícios ambientais advindos da tecnologia solar fotovoltaica e, ao mesmo tempo, servirá de modelo para construção de modelos de utilidade⁶ que proporcionam maior produtividade em processos que operam com cargas motrizes e utilizam água no beneficiamento de produtos rurais.

Portanto, o estudo proposto se trata de uma tecnologia ambiental que pode ser adicionada em SFB-CF já em funcionamento. De modo que será possível a ligação de um equipamento agrícola sem o uso de banco de baterias, o que evita a poluição por Chumbo, e sem o uso de motores e geradores a gasolina/diesel, inibindo emissões de dióxido de carbono (CO₂). No contexto amazônico, alguns equipamentos agrícolas importantes para produção de alimentos regionais poderiam ser ligados a este sistema e, assim, facilitar o trabalho do produtor rural, tais como: descascador e ralador de mandioca, batedeira de açaí, despulpadora de frutas,

⁶ Modelos de utilidade: “[...] o objeto de uso prático, ou parte deste, suscetível de aplicação industrial, que apresente nova forma ou disposição, envolvendo ato inventivo, que resulte em melhoria funcional no seu uso ou em sua fabricação.” (BRASIL, 1996).

moedor de cana-de-açúcar, debulhador de milho, forno mecanizado para casa de farinha, entre outros.

Do ponto de vista ambiental, o sistema proposto proporciona impacto reduzido na implantação, pois os agricultores geralmente já são habituados com estes tipos equipamentos. Além de proporcionar a vantagem de que não será mais necessário viajar periodicamente aos centros urbanos para conseguir combustível, o que representa um incentivo de manutenção do homem no campo. Outra característica importante é que os SFB-CF fornecem água subterrânea e, portanto, de melhor qualidade para consumo humano. Deste modo, ganhos em valores intangíveis podem ser obtidos em aspectos higiênicos e sanitários da água e dos alimentos produzidos, como, por exemplo, redução da mortalidade infantil e de doenças relacionadas ao consumo de água não potável.

Assim, garantir o acesso à água e, ao mesmo tempo, auxiliar os produtores rurais em suas atividades diárias pode resultar em uma melhoria na qualidade de vida destes cidadãos. Tendo em vista que a utilização deste equipamento cria uma oportunidade para que o trabalhador rural utilize equipamentos motorizados e, portanto, mais robustos, o que pode ter como consequência a diminuição no tempo de produção, a diversificação dos produtos comercializados e a criação de novas culturas e atividades. Todas estas qualificações possibilitam, desta forma, um cenário econômico e ambiental mais favorável para que estes agricultores consigam comercializar seus produtos no mercado regional, praticando economia verde, contribuindo para a preservação do estado e com um preço ainda mais competitivo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o uso compartilhado do gerador fotovoltaico de sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversor de frequência em aplicação multimotores.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar as cargas motrizes agrícolas apropriadas para compartilhar a energia produzida pelo gerador fotovoltaico do sistema fotovoltaico de bombeamento com conversor de frequência.
- Propor um sistema piloto para desenvolvimento de uma atividade produtiva, típica da região amazônica.
- Avaliar o sistema piloto em laboratório e em campo.
- Realizar análise técnica e econômico-financeira deste sistema.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversor de frequência (SFB-CF)

Existem diversos métodos para realizar bombeamento de água utilizando energia solar fotovoltaica. Dois casos podem ser considerados como os de maior ocorrência: acoplamento direto do gerador fotovoltaico ao motor elétrico de corrente contínua e acoplamento do gerador fotovoltaico por meio de conversor de frequência ao motor de indução c.a. trifásico (FEDRIZZI, 2003).

Os sistemas fotovoltaicos de bombeamento (SFB) quando instalados em uma destas configurações são considerados como sistemas de conexão direta, pois não fazem uso de banco de baterias. Deste modo, estes sistemas se tornam mais baratos e requerem menos manutenções se comparados aos sistemas fotovoltaicos convencionais autônomos.

Quanto aos motores utilizados, as vantagens de se utilizar motores c.c. em sistemas fotovoltaicos de bombeamento ocorrem devido à alta eficiência e simplicidade de implementação. Porém, como desvantagem, tem-se a necessidade de manutenção frequente. Uma alternativa que pode ser adotada é a substituição do motor c.c. convencional pelo motor c.c. de ímã permanente sem escovas, desde que o sistema seja de baixa potência. No entanto, utilizar motores de indução c.a. representa uma alternativa confiável e sem manutenção (MUHSEN et al., 2017).

Além disso, os motores c.c., ainda que eficientes, apresentam maior custo de manutenção em comparação aos motores de indução c.a., sem contar que não são adequados em áreas remotas, pois existe dificuldade em se encontrar mão de obra especializada para operação desses motores e peças no mercado local para os serviços de manutenção (CARACAS et al., 2014). Uma comparação entre os tipos de motores elétricos utilizados em SFB é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 - Comparação entre motores elétricos c.c. e c.a. de SFB (Adaptado de MUHSEN et al., 2017).

Motor corrente contínua (c.c.)	Motor corrente alternada (c.a.)
1. Custo elevado.	1. Mais barato e facilmente encontrado.
2. Acoplado diretamente ao gerador fotovoltaico.	2. Acoplado a um gerador fotovoltaico por meio de um conversor de frequência c.c. – c.a.
3. Alta eficiência e alto torque de partida, recomendável para SFB.	3. Menos eficiente.
4. Necessita de manutenção frequente, especialmente o motor do tipo escova.	4. Menor número de manutenção e falhas.

De acordo com Brito (2006), uma das desvantagens em se utilizar os SFB com motores de corrente contínua ocorria pelo fato de que os sistemas eram obtidos no mercado internacional na forma de *kits*, ou seja, eram constituídos por componentes importados e de difícil aquisição no mercado nacional, o que tornava árdua e onerosa a manutenção desses sistemas. Este problema foi solucionado com a inclusão do conversor de frequência ao sistema e a troca da motobomba c.c. importada pela motobomba c.a. nacional, sendo esta a primeira experiência no Brasil com este tipo de tecnologia (VALER et al., 2016). A configuração do SFB-CF é composta por módulos fotovoltaicos, unidade de condicionamento de potência e conjunto motobomba, a qual pode ser verificada na Figura 1.

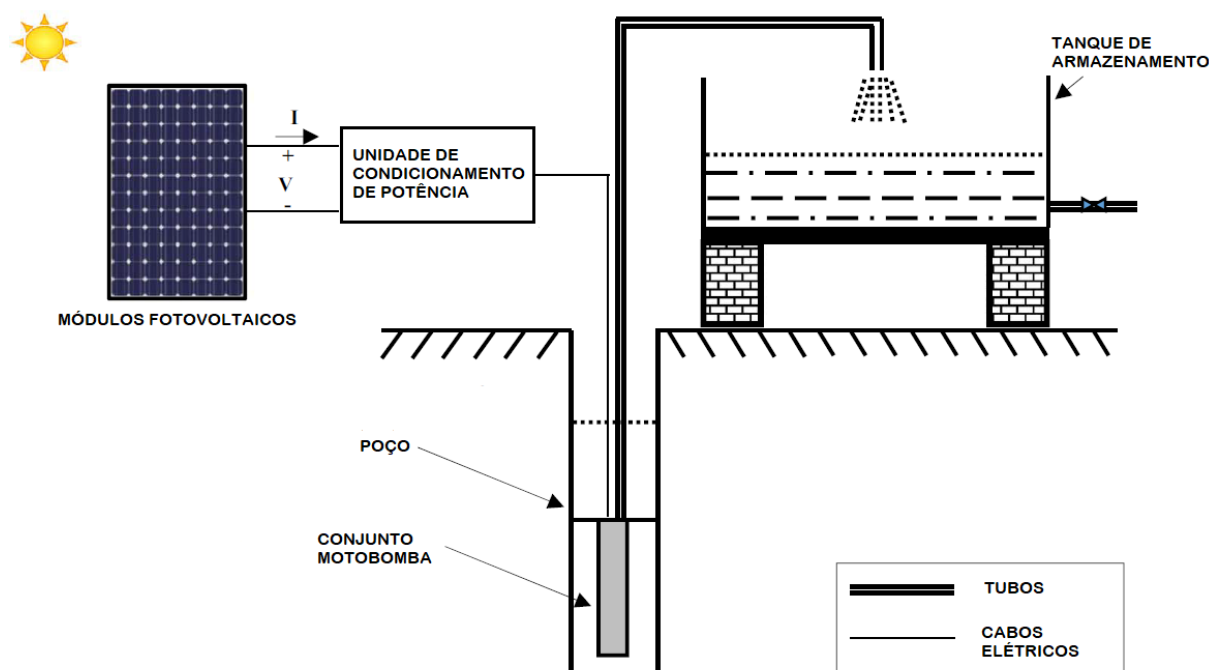


Figura 1 – Representação de um SFB-CF (Adaptado de MUHSEN et al., 2017).

A unidade de condicionamento de potência, além da conversão da tensão, tem por finalidade conectar o gerador fotovoltaico ao conjunto motobomba, satisfazendo certas operações, tais como: regulação de tensão e corrente do motor da bomba, controle da partida e parada do ciclo de bombeamento, otimização da eficiência do sistema e proteção da motobomba contra distúrbios elétricos (VALER et al., 2016).

Os estudos posteriores ao de Brito (2006), nessa área, consistiram em verificar a aplicação destes sistemas em comunidades tradicionais (FEDRIZZI; RIBEIRO; ZILLES, 2009), implementar um monitoramento do ponto de máxima potência ao controlador PID do sistema (DRIEMEIER; ZILLES, 2010), verificar a performance de um controlador Fuzzy em conversores que não possuem um controlador PID embarcado (MARANHÃO et al., 2015b) e apresentar as vantagens do conversor de frequência com Controlador Lógico Programável (CLP) em relação ao conversor de frequência convencional sem CLP, ambos de fabricação nacional (MÉLENDEZ; FEDRIZZI; ZILLES, 2016).

Ressalta-se que, em outras aplicações, é comum encontrar os sistemas fotovoltaicos instalados com inversores de frequência. Os inversores são equipamentos que realizam a conversão da energia disponibilizada pelos módulos fotovoltaicos de corrente contínua em corrente alternada. São comercializados para aplicações conectadas à rede ou *Grid-tie* e para aplicações isoladas/autônomas ou *Off-grid*. Os tipos encontrados são: Onda quadrada, que são os mais simples e baratos; Onda senoidal modificada, que produzem uma onda intermediária entre a quadrada e a senoidal e Onda senoidal pura, que produzem uma onda semelhante à da rede elétrica, por esse motivo tem o preço mais elevado que os anteriores.

No caso do SFB-CF, o equipamento utilizado é o conversor de frequência, o qual faz a conversão de um sinal em corrente alternada de tensão e frequência fixa em um sinal de corrente alternada com tensão e frequência variáveis. A principal aplicação deste equipamento ocorre em instalações industriais pelo fato de possibilitar o controle de velocidade e torque de motores de indução trifásicos. Entretanto, pelo fato de que é possível energizar esse equipamento com tensão em corrente contínua (BRITO, 2006; MARANHÃO, 2015a), utiliza-se esse equipamento para o controle de velocidade e torque de motobombas trifásicas convencionais.

Deste modo, pelo fato do conversor de frequência ser um equipamento, originalmente, de uso geral na indústria, ou seja, possuir parâmetros que permitem a configuração deste dispositivo para diferentes motores e aplicações, verifica-se que há a possibilidade da utilização do conversor para mais de um motor de indução, desde de que sejam conhecidos os parâmetros elétricos do sistema para correto dimensionamento da nova carga motriz.

3.1.1 Configuração do gerador fotovoltaico (GF)

O dimensionamento da potência do gerador fotovoltaico e, conseqüentemente, do volume de água a ser bombeado variam de acordo com as especificidades de cada projeto, como, por exemplo, o número de usuários contemplados, a irradiância presente no local, a altura manométrica entre o conjunto motobomba e o reservatório, entre outras. Com a finalidade de demonstrar os cálculos realizados nesta etapa, considerar-se-á módulos fotovoltaicos policristalinos de 36 células e 55 Wp⁷ de potência. A escolha por estes módulos é devido a este valor de potência ser comercializado em placas de peso de 4,79 kg e dimensões: comprimento 69 cm, largura 66 cm e altura 21 cm (YINGLI SOLAR S/A, 2013), o que proporciona maior facilidade na instalação e transporte para regiões rurais mais afastadas.

Em SFB-CF ocorre a substituição da rede elétrica convencional, 220 V ou 380 V bifásico e em corrente alternada, por um gerador fotovoltaico, o qual fornece tensão em corrente contínua. Para que o conversor de frequência (CF) funcione em corrente contínua é necessário que a tensão fornecida pelo gerador fotovoltaico seja compatível com a tensão de funcionamento do equipamento. De acordo com o fabricante WEG (2010), a tensão no barramento c.c.⁸ tende-se a estabilizar no valor da equação (1) quando o motor estiver em vazio ou em cargas leves e no valor da equação (2) quando o motor estiver com cargas mais pesadas. Considerando a tensão da rede em 220 V, tem-se que:

$$V_{c.c. \text{ vazio}} \approx 1,41 \times V_{rede} \approx 1,41 \times 220 \approx 310,2 \text{ V} \quad (1)$$

⁷ Watt-pico (Wp): Unidade de potência criada para módulos fotovoltaicos. Representa a máxima potência que o módulo pode fornecer em condições ideais, simuladas em laboratório.

⁸ Barramento c.c.: Faz parte do circuito intermediário do inversor, é a tensão em corrente contínua obtida pela retificação da tensão alternada de alimentação ou através de uma fonte externa (WEG, 2016).

$$V_{c.c. \text{ plena carga}} \approx 1,35 \times V_{rede} \approx 1,35 \times 220 \approx 297 \text{ V} \quad (2)$$

Além desse valor é necessário estimar os limites superiores e inferiores da tensão do barramento c.c., utilizados para os erros de sobretensão e subtensão do conversor de frequência. De acordo com o manual de programação do conversor de frequência CFW500 do fabricante WEG, para tensão de alimentação de 220 V, o CF apresenta erro de subtensão em 200 Vcc e erro de sobretensão em 410 Vcc. Em redes de 380 V, estes erros passam a ser 360 Vcc e 810 Vcc, respectivamente (WEG S/A, 2016).

De acordo com Maranhão (2015a), além desses valores é estipulada uma margem de 30% nos limites superiores e inferiores de tensão correspondente aos erros de sobretensão e subtensão respectivamente. Quanto ao gerador fotovoltaico, ressalta-se que os módulos fornecem duas tensões para o sistema: a tensão de circuito aberto (V_{oc}), quando não há cargas conectadas nos terminais e a tensão de máxima potência (V_{mp}), quando o gerador está operando próximo à tensão nominal dos módulos. Considerar-se-á para o cálculo da quantidade de módulos fotovoltaicos os dados do módulo YL055P-17b 2/5 do fabricante Yingli Solar, portanto $V_{oc} = 22,07 \text{ Vcc}$ e $V_{mp} = 17,83 \text{ Vcc}$ (YINGLI SOLAR S/A, 2013).

A quantidade mínima de módulos fotovoltaicos associados em série, necessário para o funcionamento de CF com configuração para entrada de tensão de 220 Vca ou de 200 a 410 Vcc, é demonstrada nas equações (3) e (4).

$$\frac{200}{V_{mp}} \leq N_{série} \leq \frac{410}{V_{mp}} \quad (3)$$

$$\frac{200}{17,83} \leq N_{série} \leq \frac{410}{17,83} \quad \therefore 11,217 \leq N_{série} \leq 22,995 \quad (4)$$

Repetindo a análise para a tensão de circuito aberto dos módulos fotovoltaicos, tem-se as equações (5) e (6):

$$\frac{200}{V_{oc}} \leq N_{série} \leq \frac{410}{V_{oc}} \quad (5)$$

$$\frac{200}{22,07} \leq N_{série} \leq \frac{410}{22,07} \quad \therefore 9,062 \leq N_{série} \leq 18,577 \quad (6)$$

Deste modo, para satisfazer as equações (4) e (6), ou seja, o sistema funcionar sem erros de subtensão e sobretensão, os SFB-CF devem ser compostos por 18 a 19 módulos fotovoltaicos em série. A potência máxima fornecida pelo gerador fotovoltaico, nestas configurações, é dada pela equação (7) e (8).

$$Potência_{gf} = N_{série} \times Potência_{módulo} \quad (7)$$

$$Potência_{gf} = 19 \times 55 \therefore Potência_{gf} = 1.045 \text{ Wp} \quad (8)$$

3.1.2 Especificações do conversor de frequência (CF)

No SFB-CF, será o conversor de frequência o dispositivo responsável por converter a energia em corrente contínua gerada nos módulos fotovoltaicos para corrente alternada, o que possibilita a utilização de motores de indução trifásicos. De acordo com o fabricante WEG (2010), a utilização de conversores frequência compreende um método eficiente para controlar a velocidade dos motores de indução. Primeiramente é realizada a transformação da tensão da entrada, de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de saída de amplitude e frequência variáveis. Com a variação da frequência na tensão de saída, consegue-se variar a velocidade mecânica de rotação do motor.

No entanto, para que seja possível a utilização do CF em sistemas fotovoltaicos de bombeamento, além de possibilitar a substituição da fonte de alimentação de corrente alternada para uma corrente contínua, é necessário que este tenha um controlador proporcional integral derivativo (PID) embarcado ao seu circuito (BRITO, 2006) ou que possua os requisitos mínimos para a inserção de um controlador PID externo (MARANHÃO, 2015a). A representação em blocos de um conversor de frequência pode ser verificada na Figura 2.

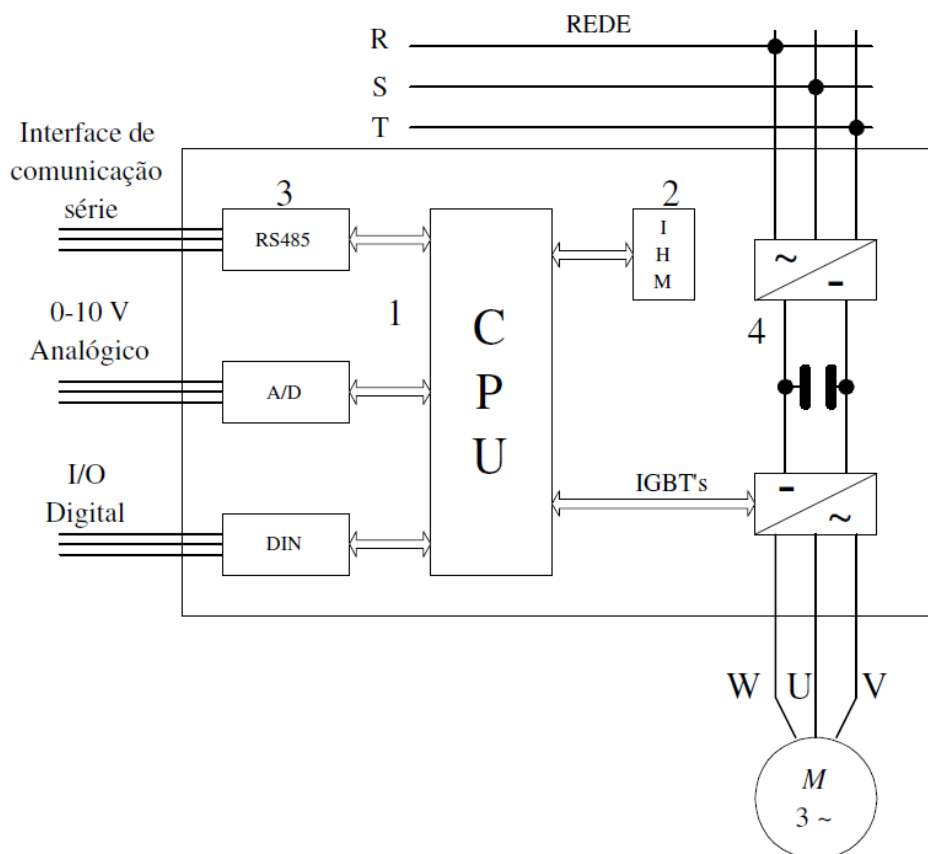


Figura 2 – Diagrama de um conversor de frequência (CAPELLI, 2002 apud BRITO, 2006).

O bloco 1, Unidade Central de Processamento (CPU), consiste em um microprocessador ou microcontrolador que armazena os dados e parâmetros do CF e executa a geração de pulsos de acionamento nos IGBT's⁹. O bloco 2, Interface Homem Máquina (IHM), é o dispositivo em que podem ser visualizadas as atividades e realizada a programação no CF. O bloco 3, Interfaces, é composto por entradas e saídas analógicas e digitais que servem como comandos elétricos e a etapa 4, denominada de Etapa de potência, é formada pelo circuito retificador, circuito intermediário, denominado de barramento c.c. e o circuito de saída, conhecido como módulo IGBT (CAPELLI, 2002).

De modo que, a adaptação do CF utilizando o gerador fotovoltaico como fonte de energia pode ser realizada ligando-se a tensão positiva e negativa do arranjo, respectivamente, nas fases R e S do CF, ou diretamente no barramento c.c. se o CF tiver esses terminais disponíveis. A ligação do gerador fotovoltaico no barramento

⁹ IGBT: Do inglês, Insulated Gate Bipolar Transistor. Ou Transistor Bipolar de Porta Isolada, traduzido para o português.

c.c. evita as perdas no sistema ocorridas no circuito retificador (MARANHÃO, 2015a).

Pelo fato da tensão do gerador fotovoltaico variar de acordo com a irradiância e, portanto, depender da hora do dia e das condições meteorológicas, nestes sistemas é necessário que o CF esteja devidamente otimizado para tornar confiável a aplicação e proporcionar maior vazão possível ao conjunto motobomba (BRITO, 2006), ou seja, deve atender dois requisitos: confiabilidade do sistema em períodos de intermitência da radiação solar e disponibilidade de entrega da máxima potência do gerador fotovoltaico (VALER et al., 2016). Este ajuste é possível por meio da sintonização do controlador PID e que o sistema seja do tipo malha fechada. O diagrama de blocos de um sistema nestas configurações é apresentado na Figura 3.

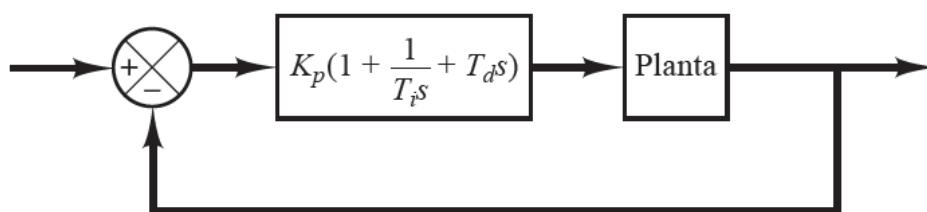


Figura 3 – Diagrama de blocos de um sistema malha fechada com controlador PID (OGATA, 2010).

Onde: K_p corresponde ao ganho proporcional, T_i é o tempo integral e T_d é o tempo derivativo (OGATA, 2010).

A realimentação destes sistemas é realizada por meio de entradas analógicas disponíveis nos terminais de entrada e saída disponíveis no CF. A Figura 4 apresenta os terminais disponíveis no CFW 500 do fabricante WEG.

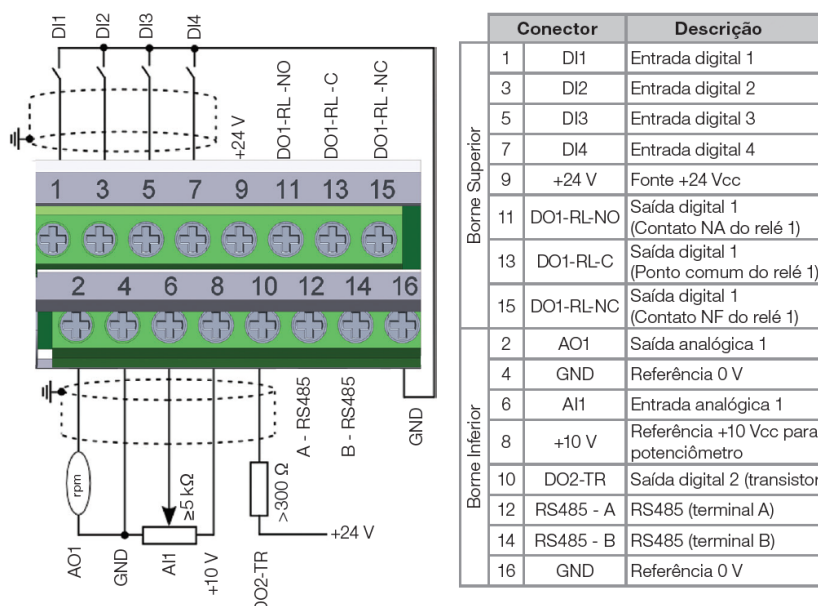


Figura 4 – Terminais de entrada e saída do conversor de frequência CFW500 (WEG S/A, 2017).

A entrada analógica do conversor de frequência suporta sinais de tensão de até 10 Vcc (WEG S/A, 2016). Deste modo, em CF's que não possuem a opção para que a saída analógica forneça um sinal de tensão proporcional ao sinal de entrada, é necessário a instalação de um divisor de tensão externo para realizar a leitura de tensão do gerador fotovoltaico e, portanto, realizar a realimentação do sistema. A figura 5 apresenta o divisor de tensão proposto para SFB-CF.

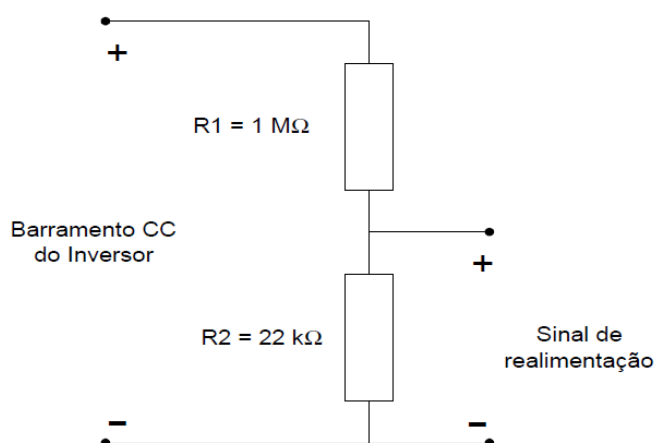


Figura 5 – Circuito divisor de tensão para o sistema malha fechada do CF (MENDES et al., 2014)

Quanto aos parâmetros de sintonia do controlador PID, estes podem ser obtidos conforme metodologia utilizada por Brito (2006), o qual aplicou a sintonia de ganhos pelo método de Ziegler-Nichols e verificou experimentalmente que no ganho

proporcional = 1,666, ganho integral = 0,666, ganho diferencial = 0 e set-point = 44%, a motobomba utilizada apresentou o melhor desempenho para aplicação em SFB-CF. Entretanto, devido ao fato de que os testes foram realizados em um CF do fabricante WEG, porém de modelo diferente, é recomendável verificar a aplicabilidade destes ganhos em ensaios de campo e realizar o devido refinamento caso seja necessário.

3.1.3 Programação do conversor de frequência em SFB-CF

A finalidade de uso de um CF é aplicar tensão e frequência variáveis nos terminais de um motor de indução para controlar a sua velocidade e torque. No entanto para que isto seja possível é necessário escolher o tipo de controle que será utilizado. Os conversores de frequência possuem basicamente dois tipos de controle: o controle escalar e o controle vetorial.

O controle escalar é baseado em uma relação tensão/frequência constante ou variável quadrática, este controle é aplicável em casos em que não há necessidade de rápida resposta de torque e velocidade e quando há mais de um motor conectado ao conversor (WEG S/A, 2010), sendo também indicado quando a corrente nominal do motor é menor que $\frac{1}{3}$ da corrente nominal do CF (WEG, 2016). A relação da curva tensão/frequência com os parâmetros utilizados no CFW500 é apresentada na Figura 6.

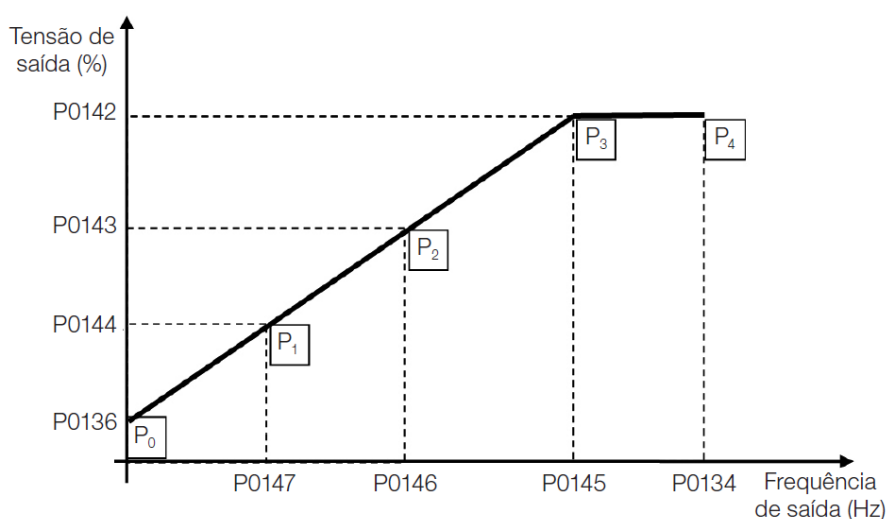


Figura 6 – Curva tensão/frequência do conversor de frequência CFW500 (WEG S/A, 2016).

Na qual os parâmetros disponíveis são:

- Frequência de saída: P0147 = Frequência de Saída Baixa; P0146 = Frequência de Saída Intermediária; P0145 = Frequência de Início de Enfraquecimento de Campo e P0134 = Velocidade máxima.
- Tensão de saída: P0136 = *Boost* de torque automático; P0144 = Tensão de saída mínima; P0143 = Tensão de saída intermediária e P0142 = Tensão de saída máxima.

O controle vetorial, por sua vez, é utilizado quando se deseja alto desempenho na regulação da velocidade de saída e maior capacidade de torque em baixas rotações, sendo que com apenas a medição da corrente de saída já é possível obter o torque e o escorregamento instantâneo do motor (WEG S/A, 2016). Deste modo, a curva tensão/frequência do controle escalar é substituída pela informação dos dados de placa do motor utilizado associado a um auto ajuste realizado pelo próprio CF para alcançar o melhor desempenho.

O controle a ser escolhido para SFB-CF depende do tipo de motobomba instalada no sistema. De modo geral, o controle escalar é indicado para casos de aplicações de baixo desempenho, em que a motobomba é de torque constante ou variável, enquanto que o controle vetorial é indicado para aplicações de alto desempenho e que a motobomba é de torque constante (MARANHÃO, 2015a).

As bombas centrífugas são indicadas para grandes vazões e menores alturas manométricas, enquanto que as bombas helicoidais são recomendadas para grandes alturas manométricas e menores vazões (FEDRIZZI, 2003). Sendo assim, dadas as características do SFB-CF, verifica-se que é mais comum o uso de motobombas centrífugas e, pelo fato destas motobombas operarem com torque variável, é utilizado o controle escalar.

Além do controle de torque, há no conversor de frequência o controle de velocidade. Este ocorre por meio de modulação PWM enviada pelo controlador PID, em que é realizada a leitura do valor de tensão disponível na entrada analógica, dos ganhos e set-point configurados (MARANHÃO, 2015a). Deste modo, se a potência disponibilizada pelo gerador fotovoltaico, em determinada irradiância, não for suficiente para manter a motobomba funcionando na frequência nominal, o CF, configurado no modo controle escalar e com o controlador PID ajustado, reduz a

relação tensão/frequência para manter o torque necessário para operação do motor. Consequente, o SFB-CF tem uma redução do volume de água bombeado em relação ao ponto de operação nominal do sistema (BRITO, 2006).

Quanto à operação do CF, o acionamento pode ser realizado via modo LOCAL ou modo REMOTO. No modo LOCAL são utilizadas as teclas presentes na Interface Homem Máquina (IHM) para escolha das funções, enquanto que no modo REMOTO as operações são efetuadas por meio do chaveamento das entradas analógicas e digitais (WEG, 2009). Para facilitar o manuseio e tornar possível a transferência de tecnologia para o usuário que vai utilizar este tipo de equipamento, geralmente opta-se pela construção de painéis elétricos com botoeiras e interruptores para chavear as entradas analógicas e digitais e possibilitar a operação do CF no modo REMOTO.

O desafio e motivação da aplicação multimotores proposta é verificar experimentalmente como se comporta a carga motriz adicional utilizando a parametrização em controle escalar e torque quadrático realizada para a motobomba centrífuga. Os parâmetros configuráveis no CF são: tipos de controle, parâmetros elétricos do motor, uso ou não do controlador PID, sintonia do controlador PID, entradas e saídas analógicas, sentido de rotação, comando girar e parar, controle de velocidade de rotação do motor, tempo de reinício do sistema em caso de falhas na operação, entre outros.

Mendes et al. (2014) realizaram a programação de um SFB-CF no estado do Amapá com um conversor de frequência semelhante ao utilizado neste estudo. O Quadro 2 apresenta os parâmetros modificados no CF para o funcionamento deste sistema.

Quadro 2 – Programação de conversor de frequência para operar em SFB-CF (MENDES et al., 2014)

Parâmetro	Função	Faixa de Valores	Ajuste de Fábrica	Unidade	Ajuste do Usuário
P100	Tempo de aceleração	0.1 a 999	5.0	s	0.1
P101	Tempo de desaceleração	0.1 a 999	10.0	s	0.1
P121	Referência de frequência pelas HMI	P133 a P134	3.00	Hz	6.00
P133	Frequência Mínima	0.00 a P134	3.00	Hz	0

Quadro 2 (continuação) – Programação de conversor de frequência para operar em SFB-CF (MENDES et al., 2014)

Parâmetro	Função	Faixa de Valores	Ajuste de Fábrica	Unidade	Ajuste do Usuário
P151	Nível de Atuação da regulação da tensão do circuito intermediário	Linha 200V: 325 a 410 Linha 400V: 564 a 820	380 780	V	410
P202	Tipo de controle	0 = V/F Linear (escalar) 1 = V/F Quadrático (escalar) 2 = Vetorial Sensorless	0	-	1
P203	Seleção de funções Especiais	0 = nenhuma 1 = Regulador PID	0	-	1
P206	Tempo de Autoreset	0 a 255	0	s	30
P235	Sinal de entrada Analógica – A1	0 = 0-10V/0-20mA 1 = 4-20mA	0	-	0
P279	Frequência de chaveamento	4 = 5.0 5 = 2.5 6 = 10 7 = 15	4	kHz	5
P310	Flyng start e ridethrough	0 = Inativas 1 = Flyng start 2 = Flyng start e ridethrough 3 = ride-through	0	-	2
P311	Rampa de tensão	0.1 a 10.0	5.0	s	10.0
P520	Ganho proporcional	0.000 a 7.999	1.000	-	1.666
P521	Ganho integral	0.000 a 7.999	1.000	-	0.666
P522	Ganho diferencial	0.000 a 9.999	0.000	-	0
P525	Set-point Via teclas do regulador PID	0.000 a 100.0	0.00	%	44

3.2 A relação entre SFB-CF e o setor rural

O funcionamento da motobomba em SFB-CF é condicionado ao volume de água presente no reservatório e a irradiância disponível no local. Brito (2006) verificou que em um SFB-CF com reservatório de capacidade de 7,5 m³, ocorreram 49 interrupções no sistema, ou seja, o volume diário de água que pode ser bombeado pelo sistema é superior a capacidade do reservatório e ao consumo dos usuários. Outra característica é que, para esta configuração de SFB-CF, é necessário que a

irradiância disponível no local seja superior a 500 W/m^2 para haver bombeamento de água, conforme apresentado na Figura 7.

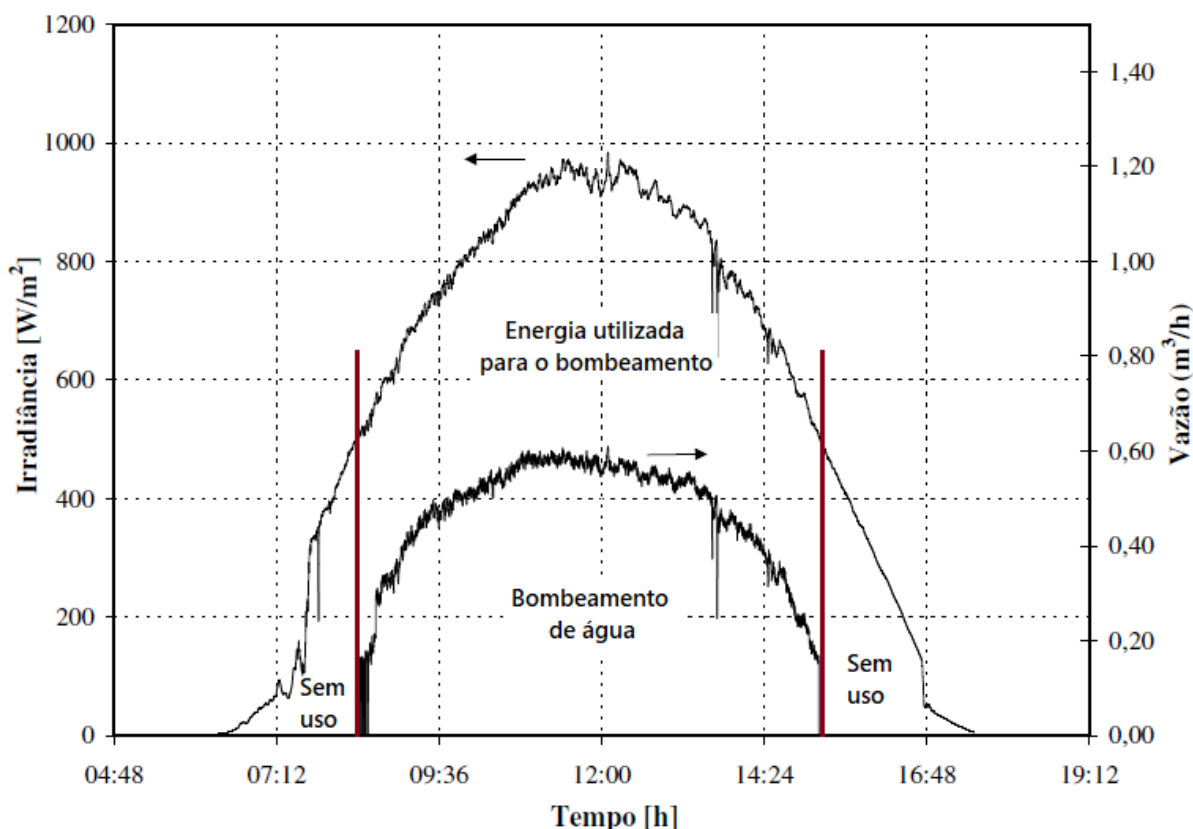


Figura 7 - Variação de vazão e irradiância para o SFB-CF ao longo dia (Adaptado de BRITO, 2006).

Em cenários que a irradiância é inferior a 500 W/m^2 , o que geralmente ocorre no início da manhã, no final da tarde e em períodos nublados/chuvosos, o sistema pode ser utilizado para outras aplicações com carga motrizes que demandem menor potência do que a motobomba ao gerador fotovoltaico. Além disso, tem-se os períodos em que o reservatório estará cheio e a energia fotovoltaica, que não seria utilizada, pode ser aproveitada para esta nova carga motriz.

Este aproveitamento de energia pode ser realizado por meio de uma carga motriz pertencente a um equipamento agrícola. A escolha por esse tipo de equipamento se faz pertinente pelo fato de que em regiões mais afastadas ainda é comum a prática de agricultura de subsistência e agricultura familiar.

Para integrar o equipamento agrícola ao SFB-CF é necessário que o motor de indução utilizado neste aparelho seja do tipo trifásico. Entretanto, as configurações

mais comuns disponíveis no mercado para estes equipamentos são: com motor de indução monofásico e sem o motor. Sendo assim, uma solução proposta neste trabalho é a aquisição individual da estrutura metálica do equipamento e de um motor de indução trifásico de potência e velocidade nominal equivalente. Ressalta-se que a potência do motor utilizado deverá ser compatível com a potência de entrada do gerador fotovoltaico do SFB-CF, a qual pode ser calculada por meio da divisão entre a potência nominal (equação 8) e a eficiência dos módulos fotovoltaicos, disponibilizada nos dados elétricos fornecidos pelo fabricante.

3.2.1 A agricultura familiar e o crédito rural

A Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006, conhecida como a “Lei da Agricultura Familiar”, considera como agricultor familiar aquele que pratica atividades no meio rural e que atende, simultaneamente, aos seguintes requisitos: I) não detenha, a qualquer título, área maior do que quatro módulos fiscais; II) utilize predominantemente mão-de-obra da própria família nas atividades econômicas do seu empreendimento; III) tenha percentual mínimo da renda familiar originada de atividades econômicas do seu empreendimento; IV) dirija seu empreendimento com sua família (BRASIL, 2006).

No contexto amazônico, a mão de obra é predominante na extração de recursos naturais e na produção de alimentos. Tem como base o extrativismo vegetal, os produtos de caça e pesca, sendo estes produtos destinados ao consumo, comércio ou troca, o que representa uma importante estratégia de sustentabilidade destas famílias (MENEZES, 2002).

Os produtos extraídos dessa forma geralmente necessitam de algum tipo de beneficiamento, seja por meio da utilização de água e/ou pela realização de processos mecânicos, os quais são executados manualmente quando não há recursos para aquisição de equipamentos apropriados, o que resulta em menor produtividade e maior demanda de trabalho para os agricultores. Neste contexto, um SFB-CF que além de fornecer água também auxilia no beneficiamento dos produtos agrícolas mostra-se de grande valia neste setor.

Alves (2006) afirma que na região amazônica, mesmo com o agricultor de posse de pequenas áreas de terra, ainda ocorre de muitas delas ficarem ociosas. Isso se deve

ao fato de que sendo baixo nível de mecanização, a mão-de-obra familiar torna-se insuficiente para eliminar a capacidade ociosa do estabelecimento.

Dar acesso à mecanização é muito importante para a agricultura familiar, de modo que possa explorar toda a área, além de realizar as operações agrícolas na hora certa, com precisão e menos sofrimentos. Sem a mecanização, a tecnologia que faz diretamente cada hectare produzir mais não revela todo seu potencial (Alves, 2006).

No entanto, estes agricultores carecem de recursos para investir em equipamentos para melhorar sua produção. Para amenizar este problema, o governo federal tem programas que visam à capitalização do agricultor familiar por meio do crédito rural, sendo um deles o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Pronaf). O Pronaf serve para financiar projetos coletivos ou individuais que melhorem a renda de agricultores familiares e assentados da reforma agrária, cuja renda anual bruta seja de até R\$ 360 mil. O programa oferece baixas taxas de juros de financiamentos rurais e menores taxas de inadimplência entre os sistemas de crédito do País (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO, 2019a).

As linhas de crédito compatíveis com o sistema proposto são: o “Pronaf Mais Alimentos – Investimento” e o “Microcrédito Rural”. O Pronaf Mais Alimentos destina recursos para investimentos em infraestrutura de produtos e serviços que aumentem a produtividade da propriedade familiar. Para SFB-CF, destaca-se a finalidade do programa: “implantação, ampliação e reforma de infraestrutura de captação, armazenamento e distribuição de água, inclusive aquisição e instalação de reservatórios d’água, infraestrutura elétrica e equipamentos para a irrigação”, que dispõe de limite de crédito individual de R\$ 165 mil e coletivo de R\$ 800 mil, juros de 2,5% ao ano e prazo máximo de 10 anos de financiamento (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO, 2019b).

O Microcrédito Rural, também conhecido como Pronaf Grupo B, caracteriza-se como um programa de combate à pobreza rural e é destinado aos agricultores de baixa renda. É permitido o financiamento de atividades agropecuárias e não agropecuárias e os créditos podem ser utilizados para cobrir qualquer demanda que possa gerar renda para a família atendida. Nesta modalidade são atendidas famílias agricultoras, pescadoras, extrativistas, ribeirinhas, quilombolas e indígenas que desenvolvam atividades produtivas no meio rural. A renda anual familiar não pode ser superior a

R\$ 20 mil e no mínimo 50% da renda deve ser proveniente de atividades rurais. O limite de crédito é de R\$ 4 mil e podem ser realizadas até três operações simultâneas por família (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO, 2019a).

3.3 Crédito rural e produção agrícola no Amapá

Os dados dos financiamentos rurais realizados no Estado do Amapá estão disponíveis na base de dados do Sistema de Informações para o Município (SIM). O último levantamento realizado foi em 2015, no qual aponta que naquele ano foram emitidos 324 contratos do Pronaf, resultando em 12.733 Declarações de Aptidão ao Pronaf (DAP) ativas e um valor total de investimento de R\$ 4.225.944,00 no setor (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO, 2015).

No Amapá, os produtos hortifrutigranjeiros locais são oriundos das regiões de assentamentos rurais. No estado, existem 54 assentamentos, os quais ocupam uma área de 2.245.310 hectares e atendem a um público de 14.723 famílias (INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA, 2017). Nestes assentamentos é predominante a agricultura familiar com o cultivo de pequenas roças de lavouras anuais, especialmente a mandioca, a qual é a principal fonte de alimento e renda para os agricultores (FILOCREÃO; SILVA, 2016).

De acordo com o Censo Agropecuário 2017 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), a área de estabelecimentos agropecuários no Amapá é de 1.506.294,002 hectares, dos quais 139.510,961 hectares são utilizados por consórcios e 1.050.411,142 hectares são utilizados por produtores individuais. Quanto às lavouras, 21.233,078 hectares são de lavouras permanentes e 43.415,658 hectares são de lavouras temporárias. As Figuras 8 e 9 apresentam o número de empreendimentos e a produção de alimentos nas lavouras permanentes.

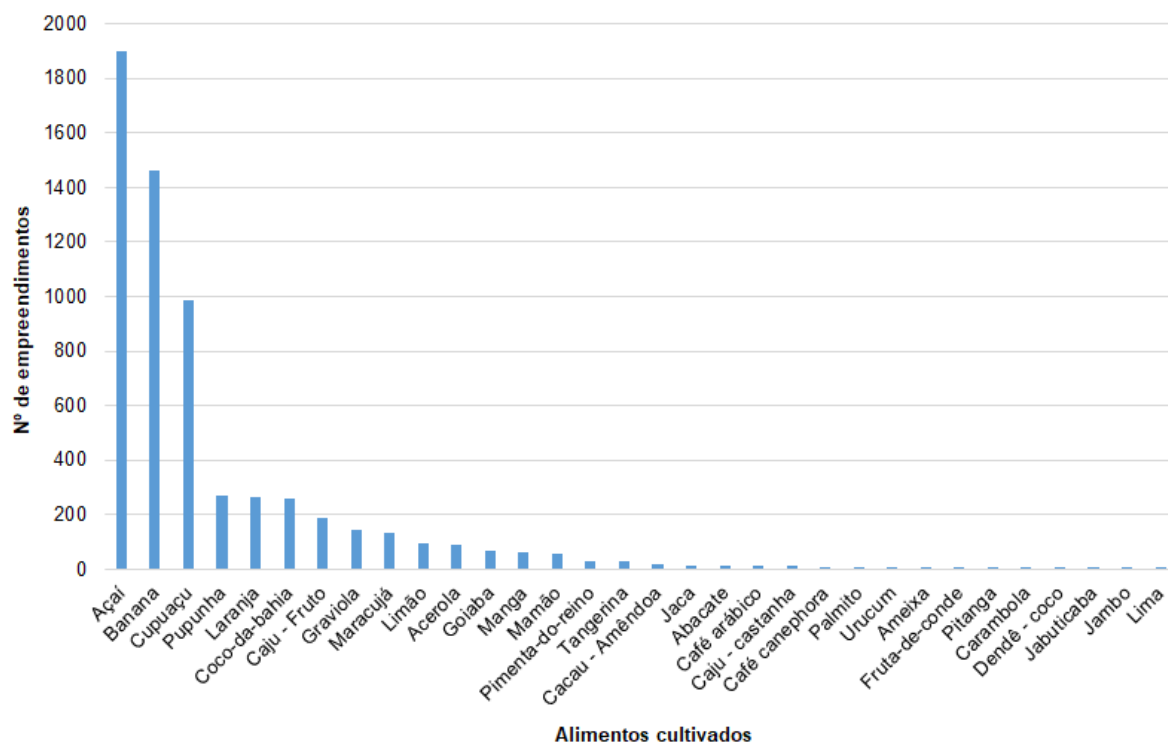


Figura 8 - Alimentos cultivados x número de estabelecimentos (lavouras permanentes) (IBGE,2018).

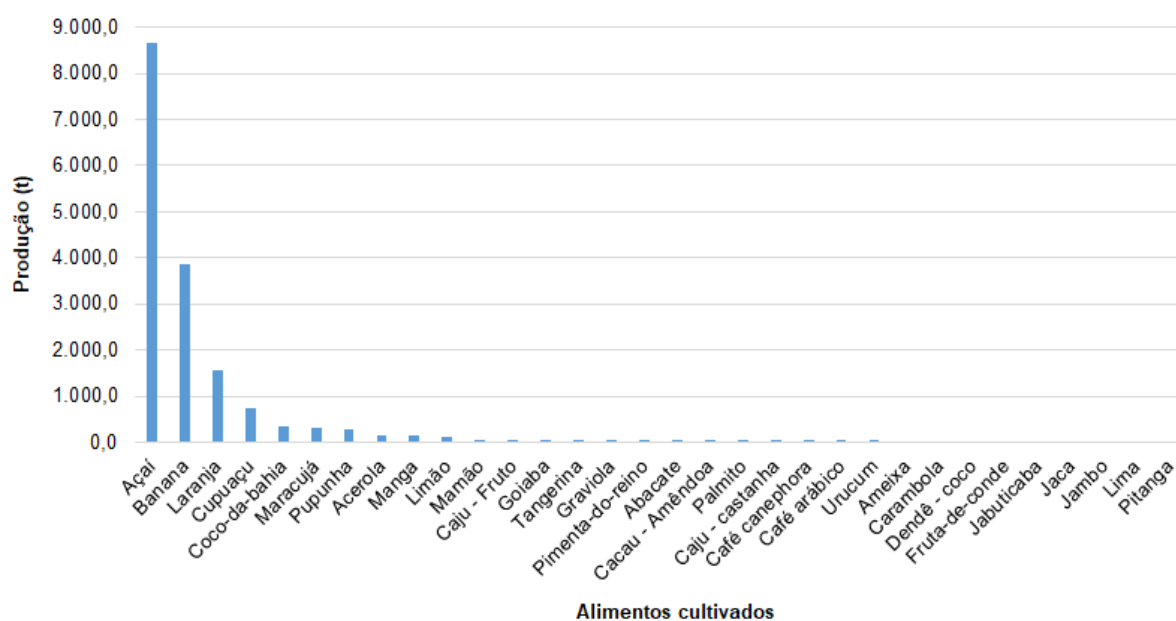


Figura 9 – Alimentos cultivados x Produção em toneladas (lavouras permanentes) (IBGE, 2018).

As Figuras 10 e 11 apresentam este levantamento para as lavouras temporárias.

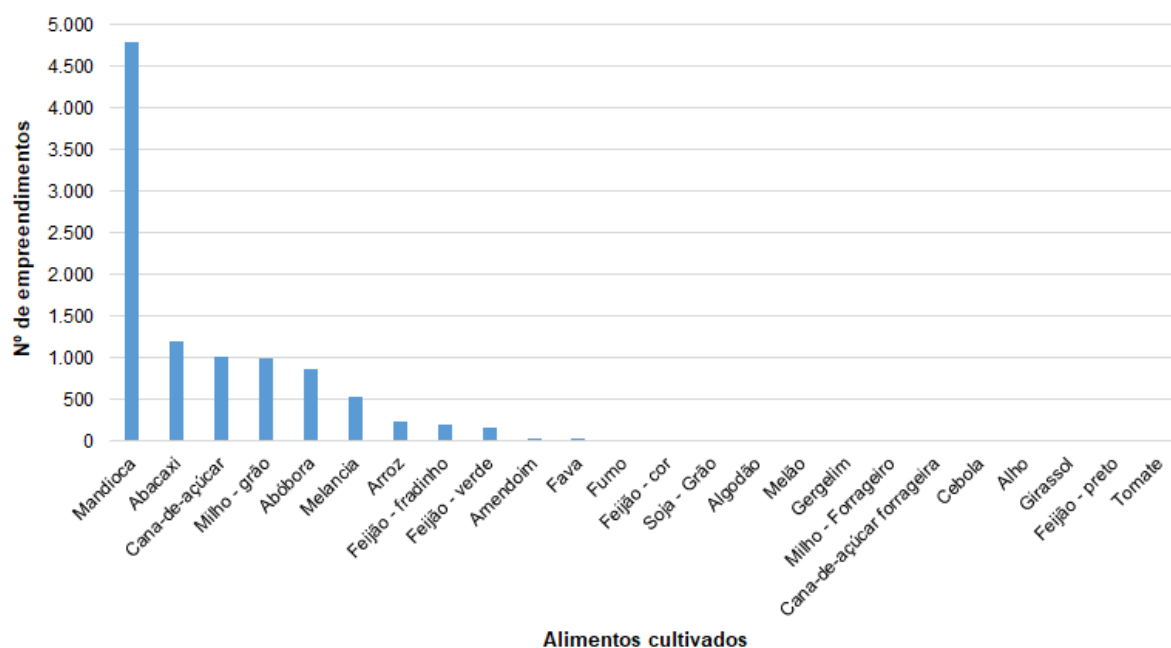


Figura 10 – Alimentos cultivados x número de estabelecimentos (lavouras temporárias) (IBGE, 2018).

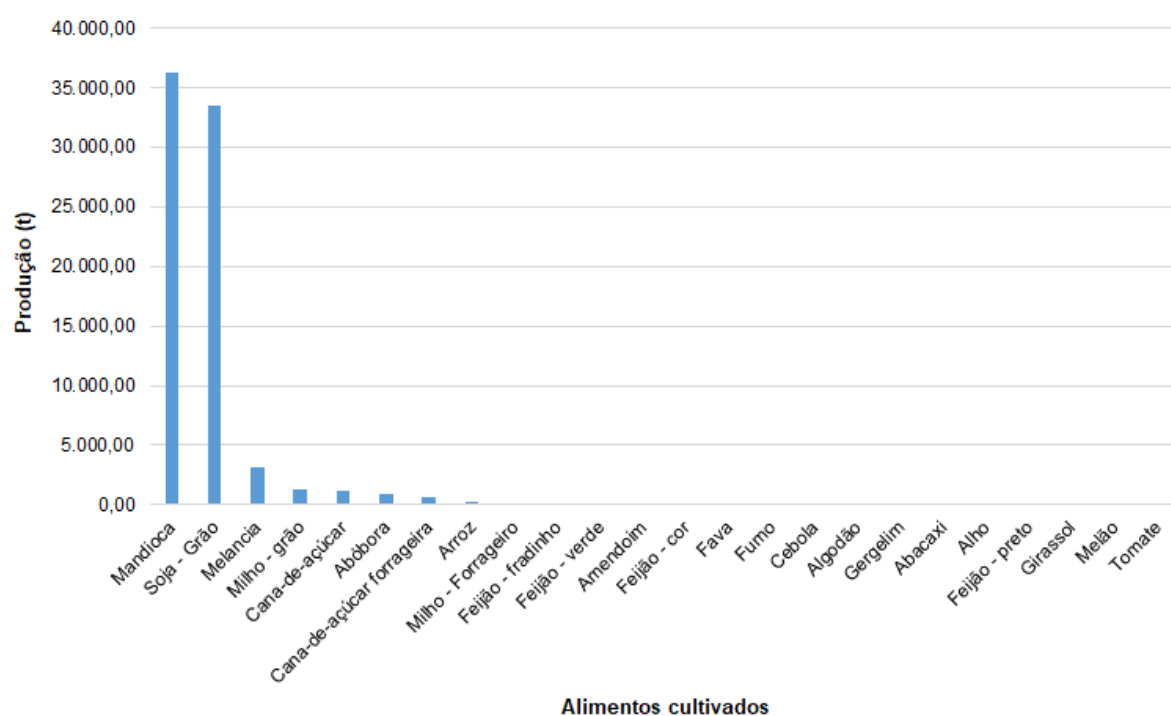


Figura 11 – Alimentos cultivados x Produção em toneladas (lavouras temporárias) (IBGE, 2018).

Por meio destes dados, verifica-se que no estado do Amapá se destacam o cultivo do Açaí e Banana em lavouras permanentes e da Soja e Mandioca em lavouras temporárias. Entretanto, conforme exposto na Figura 10, observa-se que o cultivo de Soja ocorre em um número reduzido de empreendimentos, enquanto que o cultivo

da mandioca é o que possui o maior número de empreendimentos, o que demonstra sua importância como base alimentar e fonte de renda aos agricultores locais.

3.4 Contexto histórico de SFB-CF no Amapá

A primeira iniciativa no Amapá com o objetivo de garantir o fornecimento de água utilizando conversores de frequência e motobombas trifásicas ocorreu em 2006, na realização do Projeto de Pesquisa denominado “Desenvolvimento de um Aerogerador e Otimização de seu Acoplamento à Motobombas Convencionais por meio de Inversores de Frequência - AERBOM” com recursos obtidos pela chamada pública “01/2006 – Desenvolvimento em fontes de energias renováveis” da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) vinculada ao Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) e executado pelo Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA).

O projeto AERBOM tinha por objetivo verificar o potencial eólico do município de Itaúbal, localizado no estado do Amapá, para aplicação em bombeamento de água. Este estudo possibilitou a construção de um sistema de acumulação de água, correspondente a uma torre de 5 metros, um reservatório de água com capacidade para 3.000 litros e uma casa de proteção para condicionamento do conversor de frequência, além da perfuração de um poço tubular de 40 m de profundidade e 6 polegadas de diâmetro (BRITO, 2011).

Em seguida, foi desenvolvido o projeto de pesquisa “Desenvolvimento de um Sistema Híbrido Solar-Eólico de Bombeamento de Água – Edital Universal 14/2011, CNPq”, executado pela Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) em parceria com o IEPA, em que foi avaliado o funcionamento do sistema com a inserção de um gerador fotovoltaico de 1.100 Wp. Após a montagem do sistema, foram realizados os testes de qualidade e potabilidade de água e fornecida água para consumo humano e prática de agricultura familiar na localidade (BRITO et al., 2011). Em 2016 foi realizada a substituição da motobomba centrífuga submersível trifásica 2CV por uma de 1CV, 6 estágios (MARANHÃO et al., 2016).

4 MATERIAL E MÉTODOS

A elaboração desta pesquisa foi dividida em quatro etapas: 1) Definição do local de estudo e da carga motriz agrícola compatível a ser integrada no SFB-CF; 2) Construção do protótipo para desenvolvimento da atividade produtiva; 3) Montagem da instrumentação eletrônica e 4) Avaliação do sistema piloto por meio de ensaios experimentais em laboratório e campo.

4.1 Definição do local de estudo e da carga motriz agrícola

O critério utilizado para escolha do local de estudo foi de encontrar uma localidade que já tivesse um SFB-CF instalado e que os moradores obtivessem sua fonte de renda por meio de atividades rurais. Conforme especificado no tópico 3.4., já existe um SFB-CF no estado do Amapá, sendo este localizado no loteamento 52 do projeto de reforma agrária do município de Itaubal.

A propriedade é denominada de “Retiro Deus Proverá” e é situada nas coordenadas geográficas: Latitude: 00°35'37,5" N e Longitude: 50°43'31,7" W. Deste modo, primeiramente foi realizada uma visita para verificação do SFB-CF instalado no local. A Figura 12(a) apresenta o gerador fotovoltaico instalado na localidade e a Figura 12(b) mostra a estrutura montada para o reservatório de água e que serve como casa de proteção para a unidade de condicionamento de potência.



(a)



(b)

Figura 12 – SFB-CF instalado no lote do agricultor.

Durante a visita verificou-se que este SFB-CF, que opera desde 2011, encontra-se em normal funcionamento e, portanto, é adequado para a aplicação do presente estudo. Em seguida, por meio de relatos do agricultor, foi possível verificar que sua principal atividade agrícola e fonte de renda é o beneficiamento da Mandioca (*Manihot esculenta Crantz*) para produção de farinha e outros derivados. A Figura 13 apresenta o equipamento utilizado pelo agricultor para a ralagem de Mandioca.



Figura 13 – Equipamento utilizado pelo agricultor para ralar Mandioca.

Este equipamento é denominado popularmente de “caititu” e para seu funcionamento é necessário um motor elétrico para girar o cilindro composto pelas serras que ralam a mandioca. Para realizar esta tarefa sem eletricidade, o agricultor realizou a adaptação de um Motor de Popa com as seguintes especificações técnicas: motor à gasolina, 4 tempos, potência de 5,5 CV e partida manual.

Originalmente, este motor é utilizado em embarcações de pequeno porte e por isso ele é conhecido comercialmente como “motor rabeta”. O fato do agricultor utilizar esse motor para uma aplicação a qual ele não foi projetado tem como consequência o consumo excessivo de gasolina, estimado em cerca de 1,5 litros por hora. Além disso, segundo o agricultor, já ocorreram acidentes de trabalho durante o manuseio do equipamento e isto ocorre devido a potência do motor ser superior à necessária para execução da atividade.

Outro problema encontrado é que, para utilizar este equipamento, o agricultor precisa se deslocar a cidade de Itaúbal para conseguir o combustível. O que muitas vezes não é possível ou tornaria muito elevado os seus custos com a produção. Diante deste cenário, o agricultor muitas vezes acaba optando por realizar o processo de ralagem de mandioca de forma manual. Deste modo, o equipamento escolhido para ser integrado ao SFB-CF existente foi o ralador de Mandioca.

4.2 Construção do protótipo para desenvolvimento da atividade produtiva

Nesta etapa foram verificados os equipamentos e peças disponíveis no mercado e levou-se em consideração questões logísticas como: peso, transporte dos equipamentos até a localidade, ferramentas necessárias para a instalação e o valor a ser investido no sistema. Sendo assim, o sistema proposto é composto por: um gerador fotovoltaico de 1 kWp (já existente no local), um conversor de frequência de 1 CV, uma motobomba trifásica de 1 CV e um motor de indução trifásico que fará parte do ralador de Mandioca.

A potência do motor do ralador de mandioca varia de acordo com a estrutura a qual ele está conectado. Neste estudo foram considerados dois casos distintos. O primeiro consiste em um sistema móvel e de baixo peso que facilite os testes em

laboratório e o segundo é um sistema mais robusto e, portanto, mais pesado, que pode ser aplicado em campo e garantir uma maior produtividade ao agricultor.

Para os ensaios de laboratório, foi proposto um motor trifásico de $\frac{1}{2}$ CV adaptado em uma estrutura metálica de dimensões comprimento: 59 cm, largura: 44cm e altura de 93 cm, com peso de 19 kg. A Figura 14 apresenta a estrutura utilizada.



Figura 14 – Estrutura metálica do ralador de mandioca utilizado (BOTINI, 2012).

Para os ensaios de campo, a proposta foi aproveitar a estrutura de madeira utilizada pelo agricultor para ralar mandioca e realizar a troca do motor à gasolina por um motor de indução trifásico de 1 CV. De modo geral, a configuração elaborada para SFB-CF com o ralador de mandioca é apresentada na Figura 15.

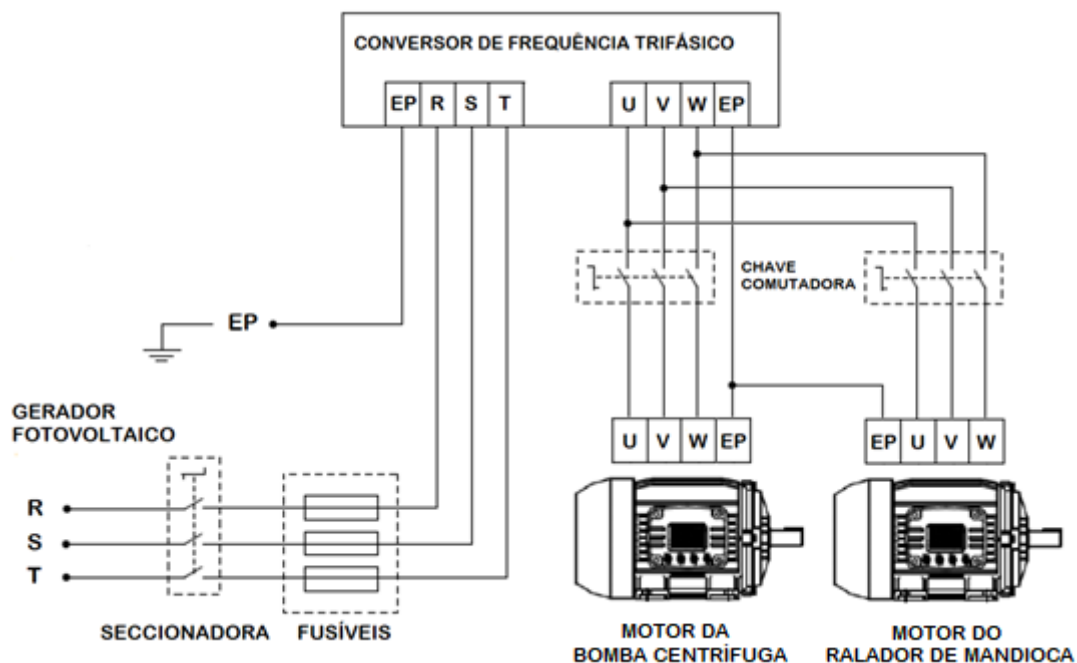


Figura 15 – Configuração do SFB-CF com a integração do equipamento agrícola.

Onde: R,S,T = fases do sistema trifásico da rede elétrica, no caso do gerador fotovoltaico apenas as entradas R e S são utilizadas, sendo R para o polo positivo e S para o polo negativo; Ep = Equipotencial, no qual tem-se a conexão para o aterramento do sistema, e U,V,W = entradas das fases do motor trifásico.

Após a definição da configuração, iniciou-se a construção do protótipo composto por: Painel em madeira; conversor de frequência; disjuntores e barramentos; motor de indução trifásico e estrutura do ralador de mandioca. A Figura 16 apresenta o protótipo do painel elétrico e do ralador de Mandioca.

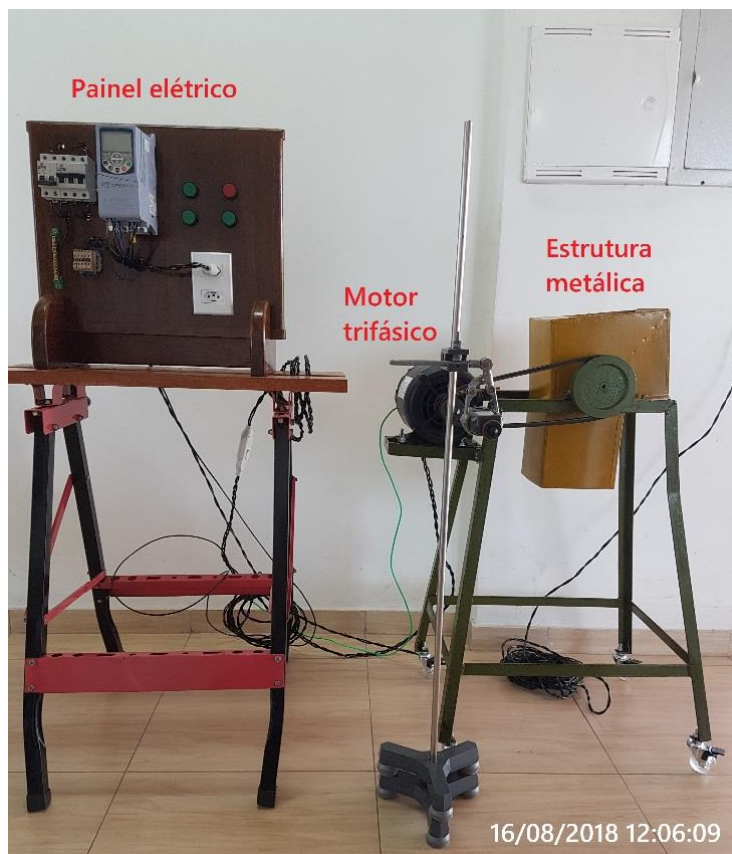


Figura 16 – Protótipo do painel elétrico e do ralador de mandioca.

O circuito divisor de tensão para a realimentação do controlador PID via entrada analógica foi elaborado em uma placa de fenolite de comprimento 3 cm e largura 2 cm e pode ser verificado na Figura 17.

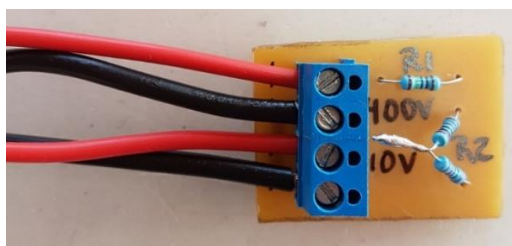


Figura 17 – Circuito divisor de tensão para realimentação do controlador PID.

Em campo, foi realizada a troca do motor à gasolina por um motor trifásico de 1 CV. A Figura 18 mostra a mudança realizada no equipamento do agricultor.



Figura 18 – Ralador de mandioca após a substituição do motor à gasolina por um motor elétrico.

4.3 Montagem da instrumentação eletrônica

Esta etapa ocorreu no Laboratório de Energias Renováveis da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e na propriedade do agricultor. Consistiu na montagem da infraestrutura necessária para medir e monitorar os parâmetros do sistema em funcionamento. Primeiramente, foi instalado o ralador de mandioca com motor de $\frac{1}{2}$ CV no laboratório e conectado o conversor de frequência ao gerador fotovoltaico instalado na cobertura do prédio. No Quadro 3 podem ser verificadas as principais características elétricas dos módulos fotovoltaicos presentes no local.

Quadro 3 – Parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico do laboratório (YINGLI SOLAR S/A, 2013).

Parâmetros em Standard Test Conditions (STC)	Unidade	Valores
Modelo do módulo fotovoltaico	-	YL055P-17b 2/5
Potência de saída – Wp	W	55,00
Tensão de circuito aberto (Voc)	V	22,07
Corrente de curto circuito (Isc)	A	3,28
Tensão de máxima potência (Vmp)	V	17,83
Corrente de máxima potência (Imp)	A	3,08

O gerador fotovoltaico está em operação desde 2016 e é composto por 19 módulos conectados em série, totalizando uma potência de 1.045 Wp. A disposição dos módulos na cobertura do prédio pode ser verificada na Figura 19.



Figura 19 – Gerador fotovoltaico utilizado nos testes de laboratório.

Para o monitoramento dos dados foi utilizado o Data logger Agilent 34970A e os sensores listados no Quadro 4.

Quadro 4 – Descrição técnica dos sensores utilizados nos ensaios.

Tipo	Modelo	Descrição
Célula Fotovoltaica Calibrada	Spektron 210. Tensão de 75,10mV em 1000 W/m ² .	Medição da irradiância.
Sensor de temperatura do módulo fotovoltaico	Thermoprozess Austria. PTC 1000. LC #15015.	Medição da temperatura no módulo fotovoltaico.
Sensor de temperatura ambiente	Sem marca. PTC 1000.	Medição da temperatura ambiente.
Resistor shunt	Sem marca. Capacidade 10 A, saída: 0 – 1000 mV.	Medição de corrente.
Transdutor de tensão	SECOM, Entrada: 0 – 500 V. Saída: 0 – 10V.	Medição de tensão.

O diagrama com os equipamentos e sensores utilizados na bancada de instrumentação eletrônica está representado na Figura 20. A foto da bancada montada no laboratório para realização dos testes pode ser verificada na Figura 21.

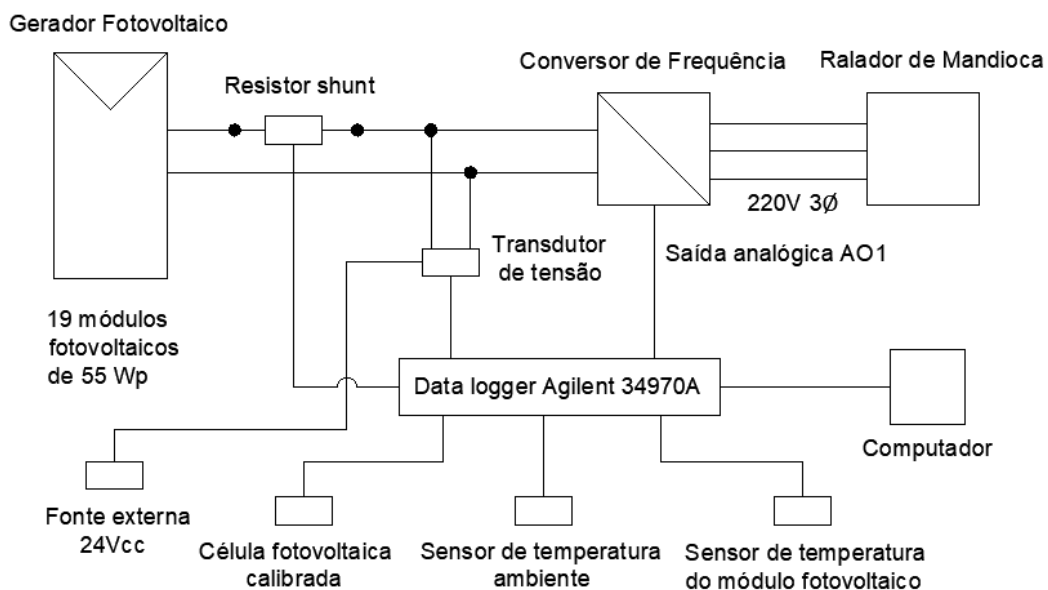


Figura 20 – Diagrama com os equipamentos e sensores utilizados.



Figura 21 – Bancada montada no laboratório para realização dos testes.

Na propriedade do agricultor, o gerador fotovoltaico possui configuração semelhante à do laboratório, contendo 19 módulos fotovoltaicos conectados em série. As características elétricas do módulo fotovoltaico podem ser verificadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos instalados na localidade.

Parâmetros em Standard Test Conditions (STC)	Unidade	Valores
Modelo do módulo fotovoltaico	-	SOLARIS S 55P
Potência de saída – Wp	W	55,00
Tensão de circuito aberto (Voc)	V	21,85
Corrente de curto circuito (Isc)	A	3,24
Tensão de máxima potência (Vmp)	V	18,20
Corrente de máxima potência (Imp)	A	3,04

A montagem da instrumentação eletrônica foi realizada próxima ao conversor de frequência localizado dentro casa de proteção. A Figura 22 apresenta a disposição dos equipamentos de medição.

**Figura 22** – Protótipo montado em campo para realização dos ensaios.

4.4 Avaliação do projeto piloto em ensaios de laboratório e de campo

Após a montagem da instrumentação foram realizados os testes de programação no conversor de frequência. A finalidade desses testes foi verificar se a configuração do CF aplicada em SFB-CF é compatível com o motor trifásico utilizado no ralador de

Mandioca. Para realizar a programação foi necessário o conhecimento dos parâmetros elétricos da motobomba instalada no sistema e dos motores propostos para os raladores de mandioca do laboratório e da propriedade agrícola. Estes dados estão apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Parâmetros elétricos dos motores utilizados nos ensaios.

Descrição	Local	Potência	Corrente Nominal	Rotação	Fator de potência	Eficiência
Motobomba trifásica EBARA cód. 4BPS5f-06	SFB-CF	$\frac{3}{4}$ CV	4,90 A	3420 RPM	Não informado	Não informado
Motor trifásico WEG cód. 10021714	Laboratório	$\frac{1}{2}$ CV	1,90 A	1730 RPM	0,73	70,0%
Motor trifásico WEG cód. 12216002	SFB-CF	1 CV	3,26 A	1740 RPM	0,75	80,5%

A programação do CF foi baseada nos parâmetros expostos no Quadro 2 do tópico 3.1.3 do presente estudo. Entretanto, alguns critérios foram adotados para tornar a programação universal entre os motores:

- Para a operação do ralador de mandioca, o torque pode ser variável e não é necessário um controle de velocidade de alta precisão. Portanto, o modo de controle escalar utilizado em SFB-CF também pode ser aplicado neste caso.
- O sistema foi configurado para o motor que exige maior corrente e rotação, que neste caso será a motobomba. Sendo assim, pressupõe-se que o controle escalar irá proteger os motores dos raladores de mandioca contra possíveis sobrecorrentes.

Deste modo, a proposta de programação realizada no conversor de frequência CFW 500 do fabricante WEG para funcionar em SFB-CF e no ralador de mandioca está apresentada no Quadro 7.

Quadro 7 – Programação realizada no CFW 500 para SFB-CF e ralador de Mandioca.

Parâmetro	Função	Ajuste Fábrica	Ajuste aplicado
P0100	Tempo Aceleração	10,0 s	1,0 s
P0101	Tempo Desaceleração	10,0 s	1,0 s
P0121	Referência via HMI	3,0 Hz	60,0 Hz
P0134	Velocidade Máxima	66,0 Hz	60,0 Hz
P0135	Corrente Saída Máxima	1,5 x P0401	7,0 A
P0156	Corrente Sobrecarga 100%	1,1 x P0401	5,4 A
P0157	Corrente Sobrecarga 50%	1,0 x P0401	4,9 A
P0158	Corrente Sobrecarga 5%	0,8 x P0401	3,9 A
P0202	Tipo de Controle	0 = Escalar V/F	0 = Escalar V/F
P0203	Seleção Função Especial	0 = Nenhuma	1 = PID via AI1
P0220	Seleção Local/Remoto	2 = Tecla HMI (LOC)	3 = Tecla HMI (REM)
P0222	Seleção Referência REM	1 = AI1	10 = Sem Função
P0226	Seleção Giro REM	4 = Dlx	2 = Tecla HMI (H)
P0263	Função da Entrada DI1	1 = Gira/Para	6 = Start
P0264	Função da Entrada DI2	8 = Sentido de Giro Horário	7 = Stop
P0295	Corrente Nom. do Inversor	7,0 A	7,0 A
P0297	Frequência de Chaveamento	5.000 Hz	15.000 Hz
P0320	Flying Start/Ride-Through	0 = Inativas	2 = FS / RT
P0331	Rampa de Tensão FS e RT	2,0 s	10,0 s
P0340	Tempo Auto Reset	0 s	30 s
P0399	Rendimento Nominal Motor	75,00%	70,0%
P0401	Corrente nominal motor	1,0 x P0295	4,9 A
P0402	Rotação nominal motor	1710 RPM	3420 RPM
P0404	Potência nominal motor	8 = 3,00 HP (2,20 kW)	5 = 1,00 HP (0,75 kW)
P0407	Fator Pot. Nom. Motor	0,8	0,75
P0520	Ganho Proporcional PID	1,000	1,666
P0521	Ganho Integral PID	0,43	0,666
P0525	Setpoint PDI pela HMI	0,00%	44,00%
P0527	Tipo de Ação PID	0 = Direto	1 = Reverso
P0536	Ajuste Automático P0525	0 = Inativo	1 = Ativo

O primeiro ensaio no sistema foi realizado em laboratório, no mês de setembro de 2018. Para analisar uma condição real de funcionamento, foram utilizados 10 kg de mandioca, monitoradas as condições climáticas, medidos os parâmetros elétricos e verificada a produção de mandioca por minuto em intervalos de duas horas. As Figuras 23, 24 e 25 apresentam as atividades realizadas.



Figura 23 – Preparação da Mandioca para o processo de ralagem.



Figura 24 – Ralagem de Mandioca realizada no ensaio de laboratório.



Figura 25 – Produção de mandioca ralada (g/min) em intervalos de duas horas.

Os dados instantâneos obtidos no ensaio para o ralador de mandioca com o motor de $\frac{1}{2}$ CV foram coletados do datalogger e estão apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 – Coleta de dados com o sistema a vazio (sem carga) e em funcionamento (com carga).

Horário	Irradiância (W/m ²)	Potência de entrada a vazio (W)	Potência de entrada com carga (W)	Temp. ambiente (°C)	Temp. do módulo (°C)	Freq. a vazio (Hz)	Freq. c/ carga (Hz)	Produção mandioca (g/min)
08:00	411,8	163,8	292,1	34,0	41,5	60,0	59,1	1.079,0
10:00	718,1	149,5	338,1	36,1	47,8	60,0	59,0	1.389,0
12:00	872,3	155,0	375,3	36,7	52,7	60,0	58,6	1.941,0
14:00	755,9	144,5	315,2	39,2	53,1	60,0	59,2	1.573,0
16:00	472,0	149,8	340,2	37,0	44,8	60,0	59,9	1.376,0
Média	647,9	152,6	332,3	36,6	48,0	60,0	59,2	1.472,6

O segundo ensaio foi realizado na propriedade do agricultor, no mês de novembro de 2018. Foram utilizados os mesmos equipamentos do ensaio de laboratório e o objetivo foi verificar o desempenho do sistema em ambos os casos. As Figuras 26, 27 e 28 ilustram as atividades realizadas no local.



Figura 26 – Preparação da mandioca na propriedade agrícola.



Figura 27 – Instalação do ralador de Mandioca de $\frac{1}{2}$ CV na propriedade agrícola.



Figura 28 – Agricultor utilizando o ralador de Mandioca de ½ CV.

O ensaio foi realizado sem interrupções, sendo os parâmetros monitorados no início e no final do teste e para a estimativa da produção de mandioca ralada foi considerada a média por minuto da produção total. O Quadro 9 apresenta os dados coletados no datalogger.

Quadro 9 – Coleta de dados do ensaio do ralador de Mandioca de ½ CV instalado na propriedade agrícola.

Horário	Medições	Irradiância (W/m ²)	Potência de entrada a vazio (W)	Potência de entrada com carga (W)	Temperatura ambiente (°C)	Freq. c/ carga (Hz)	Produção mandioca (g/min)
15:40h - 15:44h	Mínimo	642,6	159,3	372,2	34,3	60,0	5.250,0
	Máximo	684,4			35,5		
	Média	663,5			34,9		

O terceiro ensaio foi realizado na propriedade agrícola, no mês de fevereiro de 2019. Dessa vez foi verificado o funcionamento do ralador de Mandioca com estrutura de madeira e motor de 1 CV instalado e da motobomba realizando o bombeamento de água. Outra característica importante é que foi feita a análise do protótipo em um período de tempo nublado e chuvoso, portanto foi considerada a influência da irradiância no desempenho do sistema.

Ao iniciar os testes, verificou-se que a irradiância estava em $158,5 \text{ W/m}^2$. Com este valor e, com a programação proposta no Quadro 8, o controlador PID não conseguia atuar no sistema. Consequentemente, tanto a motobomba quanto o motor de 1 CV do ralador de mandioca não estavam sendo acionados. Isto ocorreu devido aos valores de ganho sintonizados por Brito (2006) serem utilizados em um sistema que apresenta características dinâmicas diferentes, ou seja, a função de transferência do sistema varia com a irradiância local e também com a carga motriz que está sendo utilizada. O que torna um desafio utilizar apenas um conversor de frequência para duas cargas motrizes distintas e requer uma análise futura mais detalhada para otimização destes valores de ganho.

Para solucionar este problema em campo, foi realizada a reprogramação do controlador PID para a configuração de fábrica e, em seguida, foram feitos ajustes manuais no Setpoint até ser encontrado um ponto em que o sistema operasse de forma satisfatória. A mudança necessária na programação do CF está apresentada no Quadro 10.

Quadro 10 – Ajustes realizados na programação do CF para operar com o motor de 1 CV.

Parâmetro	Função	Valor padrão	Ajuste em laboratório	Ajuste em campo
P0520	Ganho Proporcional PID	1,000	1,666	1,000
P0521	Ganho Integral PID	0,430	0,666	0,430
P0525	Setpoint PDI pela HMI	0,00%	44,00%	54,00%

Após a calibração do controlador PID foram realizadas as demais atividades do ensaio, as quais podem ser verificadas nas Figuras 29, 30 e 31.



Figura 29 – Capacitação dos agricultores para utilização do ralador de Mandioca.



Figura 30 – Agricultores utilizando o ralador de Mandioca de madeira e com motor de 1 CV.



Figura 31 – Pesagem da quantidade ralada de Mandioca no ensaio.

Foi efetuada a ralagem de mandioca das 14:33h até as 14:48h, quando estava ocorrendo uma forte chuva na região. A metodologia adotada foi semelhante à do ensaio do Quadro 9 e os dados obtidos no ensaio podem ser verificados no Quadro 11.

Quadro 11 - Coleta de dados do ensaio do ralador de Mandioca de 1 CV operando com média irradiância.

Horário	Medições	Irradiância (W/m ²)	Potência de entrada a vazio (W)	Potência de entrada com carga (W)	Temp. ambiente (°C)	Freq. c/ carga (Hz)	Prod. mandioca (g/min)
14:33h - 14:48h	Mínimo	198,9	126,4	190,0	24,6	21,0	9.000,0
	Máximo	351,8			24,8	33,0	
	Média	275,4	126,4	190,0	24,7	27,0	600,0

Durante o quarto e último ensaio, ocorrido em março de 2019, foi efetuada a inspeção final do equipamento e o monitoramento do sistema funcionando com a demanda diária dos agricultores. As Figuras 32 e 33 apresentam as atividades realizadas.



Figura 32 – Inspeção final no quadro da unidade de condicionamento de potência.



Figura 33 – Agricultores utilizando o ralador de Mandioca em sua demanda diária de utilização.

Os dados foram obtidos utilizando a mesma metodologia do ensaio anterior, sendo um ensaio realizado no período da manhã e outro à tarde. Os valores obtidos podem ser verificados no Quadro 12.

Quadro 12 - Coleta de dados do ensaio do ralador de Mandioca de 1 CV operando com a demanda do agricultor.

Horário	Medições	Irradiância (W/m ²)	Potência de entrada a vazio (W)	Potência de entrada c/ carga (W)	Temp. ambiente (°C)	Freq. c/ carga (Hz)	Produção mandioca (g/min)
10:54h - 11:01h	Mínimo	322,4	236,6	270,7	26,7	60,0	13.500,0
	Máximo	345,0					
	Média	333,7					
14:10h - 14:40h	Mínimo	220,4	156,3	200,6	24,6	42,0	35.700,0
	Máximo	259,2			25,3	49,0	
	Média	239,8			24,9	45,5	1.190,0

Os dados medidos nos ensaios foram analisados no software Crearray, elaborado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Este software tem a finalidade de analisar arranjos fotovoltaicos em diferentes tipos de configurações.

5 RESULTADOS

5.1 Análise técnica do sistema

As medições realizadas no sistema possibilitaram a coleta de parâmetros, dentre eles a temperatura ambiente para estimativa da temperatura do módulo fotovoltaico. Dos ensaios 1 e 2, foi estimado o valor de aproximadamente 50 °C e este será considerado para as simulações. Inserindo esta temperatura, a irradiância padrão no valor de 1.000 W/m², as irradiâncias medidas nos ensaios, os parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico de 55 Wp e o arranjo de 19 módulos em série no software Crearray, é possível visualizar as curvas de potência do gerador fotovoltaico na Figura 34.

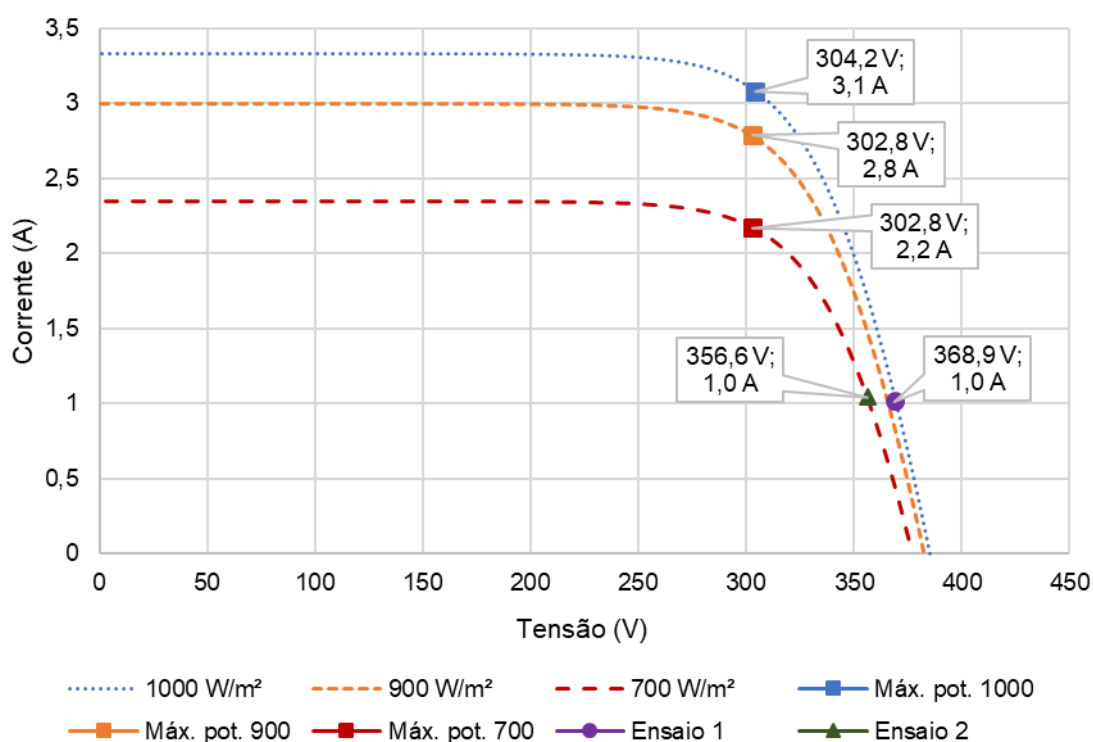


Figura 34 – Curvas de potência do gerador fotovoltaico de 1.045 Wp em 50°C.

Os pontos denominados de Ensaio 1 e Ensaio 2 referem-se aos pontos onde foi consumida a maior potência pelo motor ½ CV do ralador de mandioca.

A máxima potência fornecida pelo gerador fotovoltaico, na irradiância padrão de 1.000 W/m² e temperatura de 50 °C, é de 936,8 Wp e ocorre a uma tensão de 304,2 V e corrente de 3,1 A. A irradiância máxima medida no ensaio 1 foi de

aproximadamente 900 W/m^2 , enquanto que no ensaio 2 foi de 700 W/m^2 . Analisando estas curvas de potência e os pontos de operação do ralador de Mandioca $\frac{1}{2}$ CV, verifica-se que o cenário em que foi exigida maior potência do SFB-CF foi no ensaio 1, quando o ralador de Mandioca de $\frac{1}{2}$ CV consumiu do sistema uma potência de $375,3 \text{ W}$, a qual é inferior a potência de $844,9 \text{ W}$ disponível no gerador fotovoltaico e, portanto, este equipamento é compatível com a aplicação.

Uma análise mais detalhada do ensaio 1, com os dados selecionados em intervalos de 30 minutos, pode ser verificada no Figura 35. Ressalta-se que para esta análise o sensor de irradiância foi colocado no plano do gerador fotovoltaico.

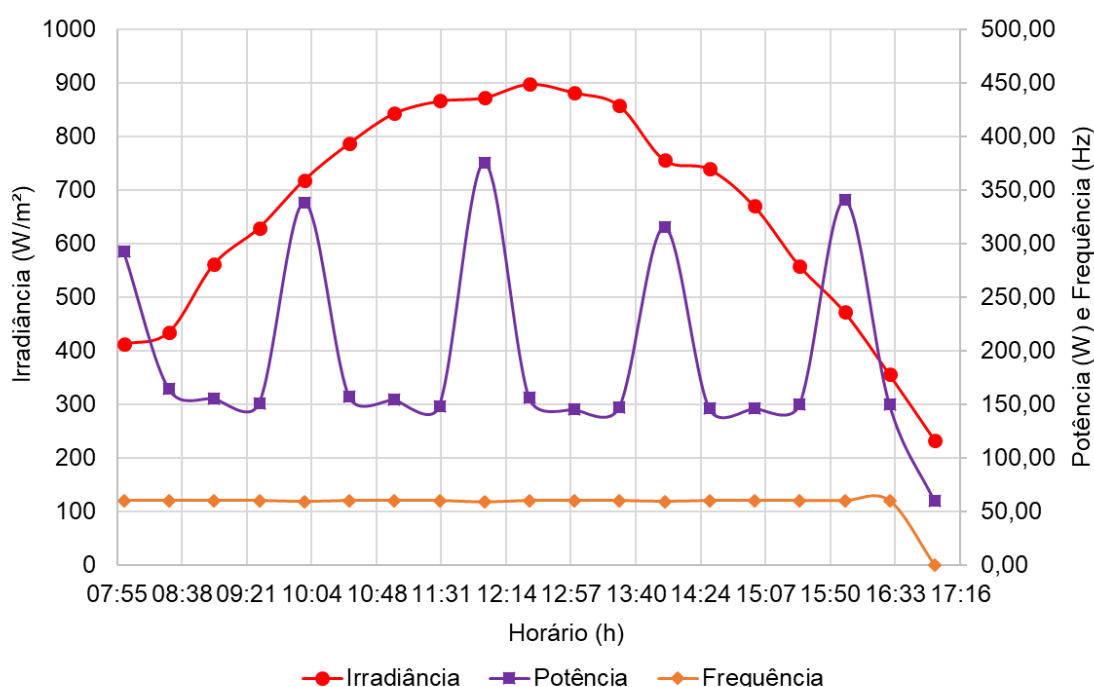


Figura 35 – Coleta de dados do ralador de Mandioca $\frac{1}{2}$ CV no ensaio 1.

Os picos obtidos na curva de potência referem-se aos instantes em que houve ralagem de Mandioca e os demais pontos estão relacionados a operação em vazio do motor. Verificou-se experimentalmente que a diferença ocorrida entre os picos de potência deve-se a propriedades intrínsecas do processo de ralagem, tais como: comprimento, diâmetro e dureza da mandioca; número de mandioca raladas por vez e acúmulo de resíduos nas serras do ralador. Por isso que no último ensaio houve um acréscimo de potência, mesmo com a redução de irradiância.

Quanto ao motor de $\frac{1}{2}$ CV, verifica-se que, neste ensaio, o motor de funcionou na frequência nominal todas as vezes em que foi utilizado o ralador de Mandioca, porém, na curva de potência sob irradiância de 900 W/m^2 , a operação do motor excedeu em $7,6 \text{ W}$ a sua potência nominal. Sendo assim, testes adicionais foram realizados no sistema no intuito de analisar a operação do motor em irradiâncias semelhantes.

Mantendo-se a programação apresentada no Quadro 8 e as modificações no controlador PID propostas no Quadro 11, foi constatado que, para irradiâncias superiores a 700 W/m^2 , o motor de $\frac{1}{2}$ CV opera com uma corrente de aproximadamente 200 mA acima da corrente nominal e o CF fornece uma tensão de saída de 240 V . Além disso, percebeu-se que o motor estava operando com a carcaça aquecida, o que poderia ocasionar futuros danos ao equipamento.

Um dos fatores que podem ser a causa desse problema é o torque, o qual não teve os parâmetros que não foram ajustados no CF. Em motobombas centrífugas o torque é quadrático e para o ralador de mandioca pode ser linear, análises futuras devem ser realizadas nas duas cargas motrizes a fim de verificar uma configuração que atenda ambos os casos. Para resolver esta questão de uma forma mais simples, são propostas duas soluções:

- Fixar a potência da motobomba e do motor do ralador em valores próximos ou superiores ao do gerador fotovoltaico, que neste caso seria de 1 CV para ambos os casos.
- Alterar a tensão máxima do controle escalar do CF para proteger o motor de menor potência do sistema, que neste caso é de $\frac{1}{2} \text{ CV}$.

O ajuste proposto para o motor de $\frac{1}{2} \text{ CV}$, no conversor de frequência CFW500 do fabricante WEG, é a alteração do parâmetro "P0142 - Tensão Saída Máxima" de 100% para $77,5\%$. Este valor foi obtido em testes realizados no horário de $12:00\text{h}$, com a irradiância média de $922,8 \text{ W/m}^2$, por meio da alteração manual do parâmetro até ser verificado o valor em que o CF estabilizava a tensão de saída em 220 V e a corrente do motor em $1,9 \text{ A}$.

Quanto aos ensaios 3 e 4, com o motor de 1 CV instalado no ralador de Mandioca da propriedade agrícola, verificou-se que a temperatura ambiente oscilou entre $24,6$

a 26,7 °C. Considerando a temperatura nos módulos fotovoltaicos em 35 °C, os dados anteriores inseridos no Crearray e as medições obtidas nos ensaios, tem-se as curvas de potência do gerador fotovoltaico e as potências consumidas pelo motor de 1 CV na Figura 36.

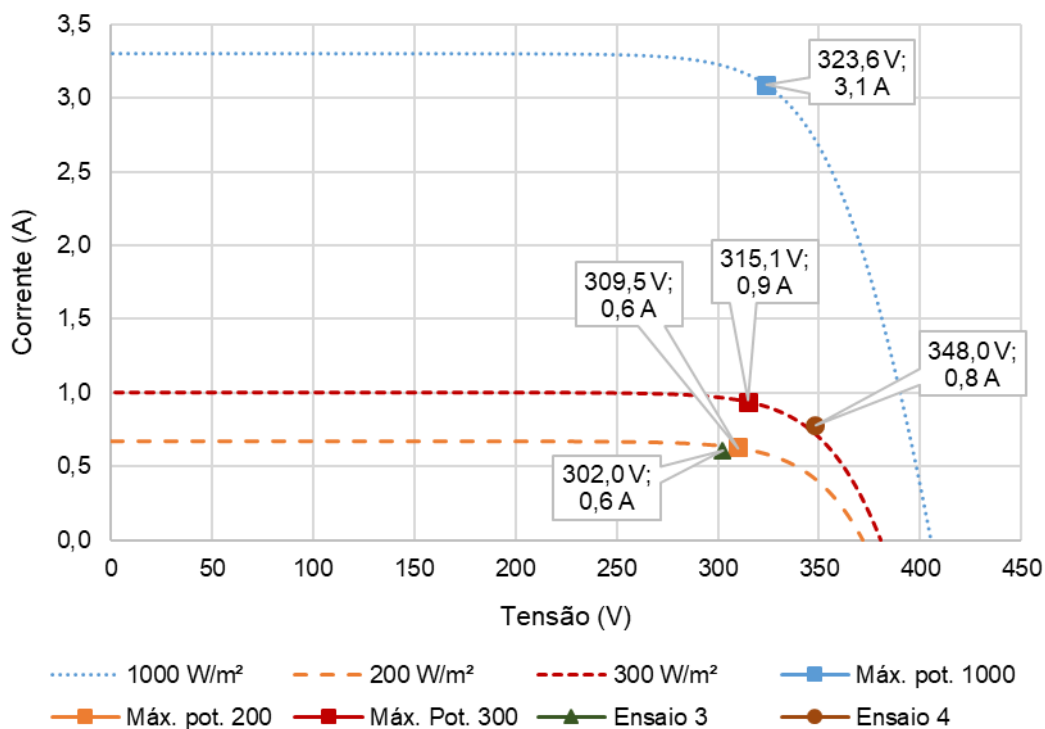


Figura 36 - Curva de potência do gerador fotovoltaico de 1.045 Wp em 35°C.

Devido ao fato de que os testes de desempenho foram realizados no período chuvoso, em que a irradiância média nos ensaios variou entre 239 W/m² e 334 W/m², não foi possível verificar experimentalmente o motor operando em sua potência nominal e, portanto, foi simulada a curva de potência do ralador de Mandioca na irradiância de 200 W/m² para o ensaio 3 e 300 W/m² para o ensaio 4.

Desse modo, é possível visualizar que, independente da irradiância aplicada, a tendência do controlador PID é fazer com que o sistema se aproxime do ponto de máxima potência e considerando que os parâmetros de sintonia do controlador foram modelados para uma motobomba de potência equivalente, estima-se que o funcionamento do sistema será satisfatório em cenários com melhores condições meteorológicas.

Quanto à operação em baixos níveis de irradiância, observa-se que para o nível de irradiância de 300 W/m^2 (ensaio 4), o ralador de mandioca demanda potência inferior a capacidade de produção do gerador fotovoltaico, ou seja, é possível inferir que este equipamento é compatível com a aplicação desejada.

5.2 Análise da integração do ralador de Mandioca ao SFB-CF

A proposta da integração do ralador de Mandioca ao SFB-CF e, portanto, de fazer o uso compartilhado da energia disponível na saída do conversor de frequência, consiste em utilizar este equipamento em períodos em que a irradiância disponível é insuficiente para o bombeamento de água, conforme foi exposto na Figura 7.

Para verificar a operação da motobomba no SFB-CF, foram efetuadas inspeções na data em que foi realizado o ensaio 3 e constatou-se que em frequências abaixo de 32 Hz, apesar da motobomba se encontrar em funcionamento, não há bombeamento de água. A coleta de dados, obtida a cada 10 minutos, está apresentada na Figura 37.

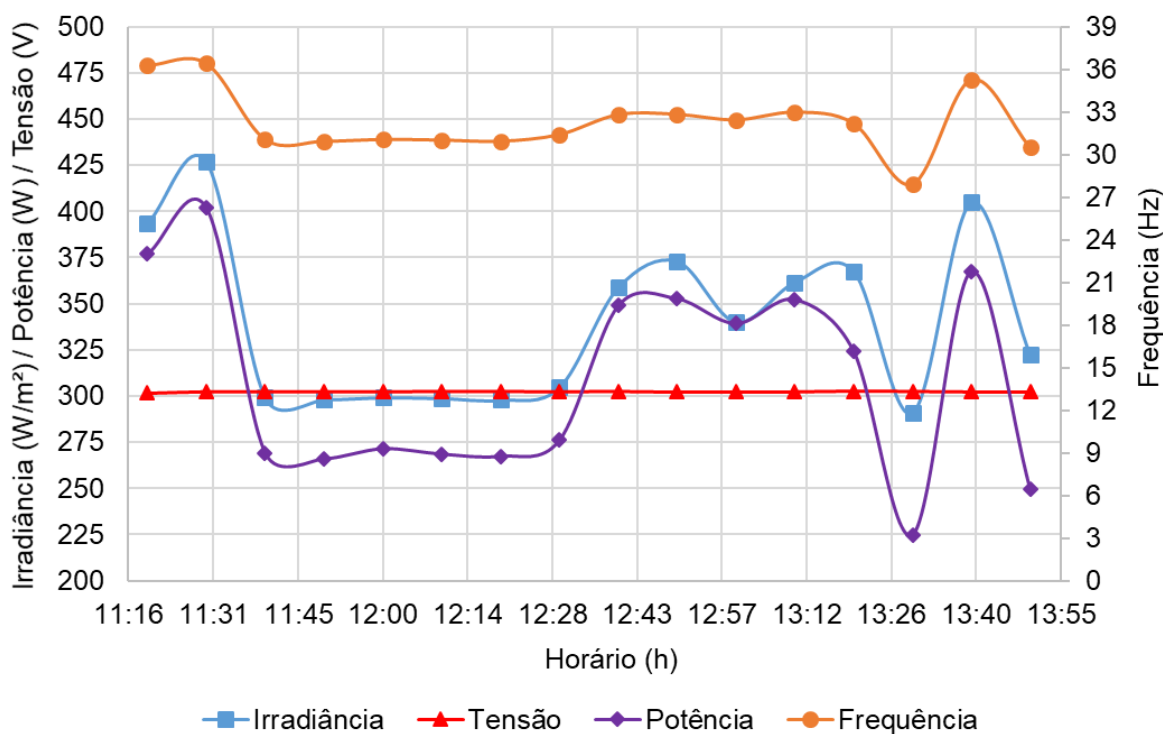


Figura 37 – Coleta de dados da motobomba no ensaio 3.

Considerando a temperatura em 35 °C, a irradiância mínima em 200 W/m², a irradiância máxima em 400 W/m² e as demais informações já inseridas no software Crearray, tem-se as curvas do gerador fotovoltaico em diferentes níveis de irradiância na Figura 38.

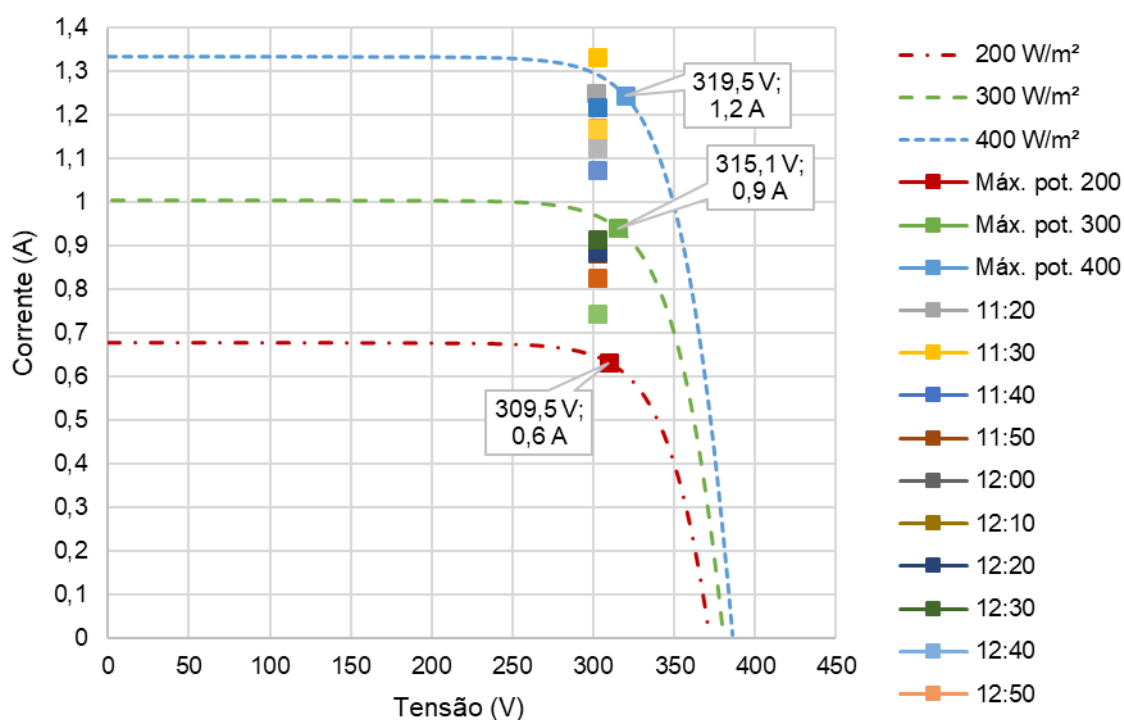


Figura 38 – Operação da motobomba em diferentes cenários de irradiância.

Analisando a Figura 37, percebe-se que a tensão no barramento c.c. se estabiliza em aproximadamente 300 V, em região próxima ao ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico, conforme apresentado na Figura 38. Enquanto isso, a potência consumida e a frequência na motobomba variam de acordo com irradiância, o que confirma a atuação do controlador PID no sistema. Quanto ao bombeamento de água, verificou-se que as frequências maiores que 32 Hz ocorrem apenas em cenários de irradiância igual ou superior a 375 W/m².

A relação entre a irradiância e a produção de mandioca ralada para o motor de ½ CV está apresentada na Figura 39.

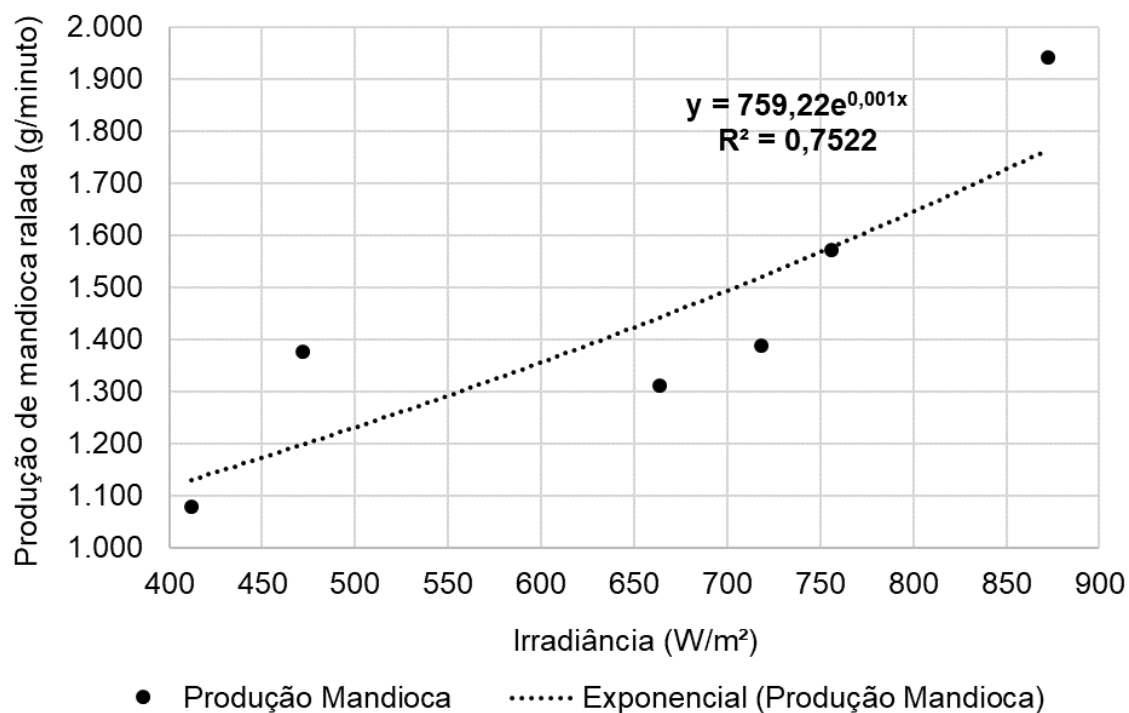


Figura 39 – Produção de mandioca ralada (g/min) estimada para o motor de ½ CV.

Reunindo os dados dos ensaios na propriedade do agricultor, tem-se a relação irradiância x produção de Mandioca ralada para o motor de 1 CV apresentada na Figura 40.

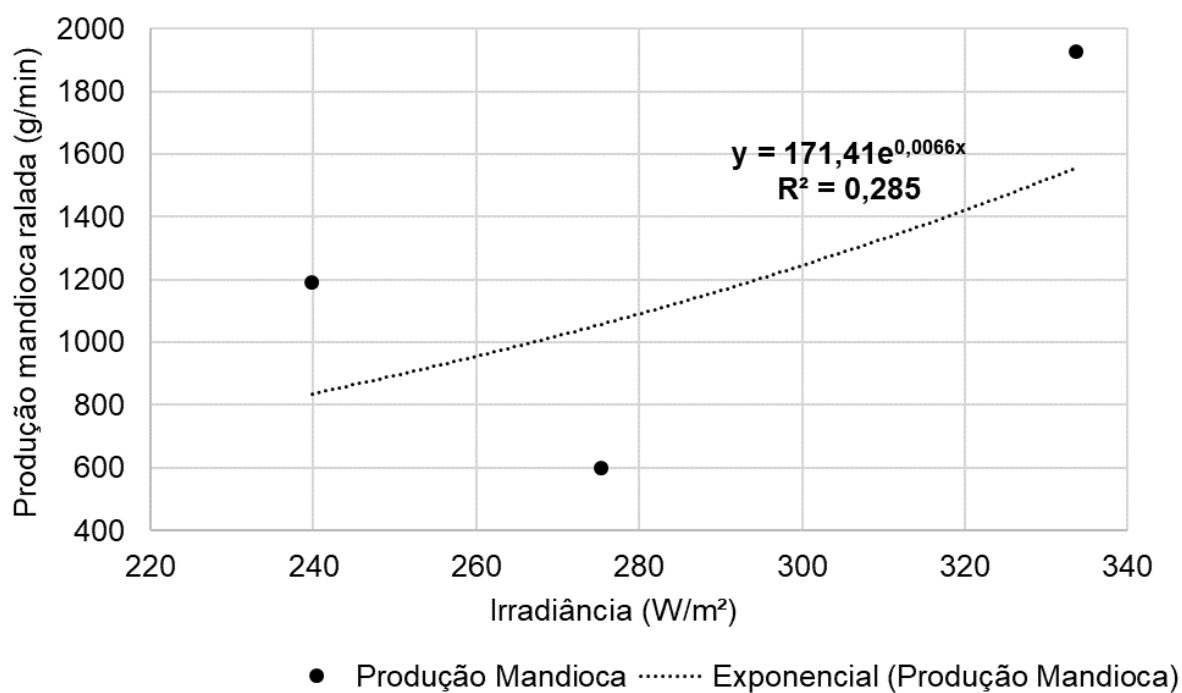


Figura 40 – Produção de mandioca ralada (g/min) estimada para o motor de 1 CV.

A diferença do valor de R^2 entre os ensaios pode ser atribuída aos desafios de recolher estes dados em campo, tais como: medição em dias e horários diferenciados, o uso de médias, a operação não uniforme do ralador por parte dos agricultores, a diversidade de tamanho e volume da Mandioca utilizada para a ralagem, reduzido número de testes, além das condições meteorológicas que oscilaram consideravelmente pelo fato de haver chuvas no local no momento de realização dos ensaios. Deste modo, recomenda-se maior amostragem em análises futuras para verificar se o valor de p é representativo, ou seja, se no motor de 1 CV é possível relacionar a irradiância com a produção de mandioca ralada.

Um comparativo entre a motobomba e o ralador de mandioca com motor de 1CV operando em vazio foi realizado durante o ensaio 4 e está apresentado na Figura 41.

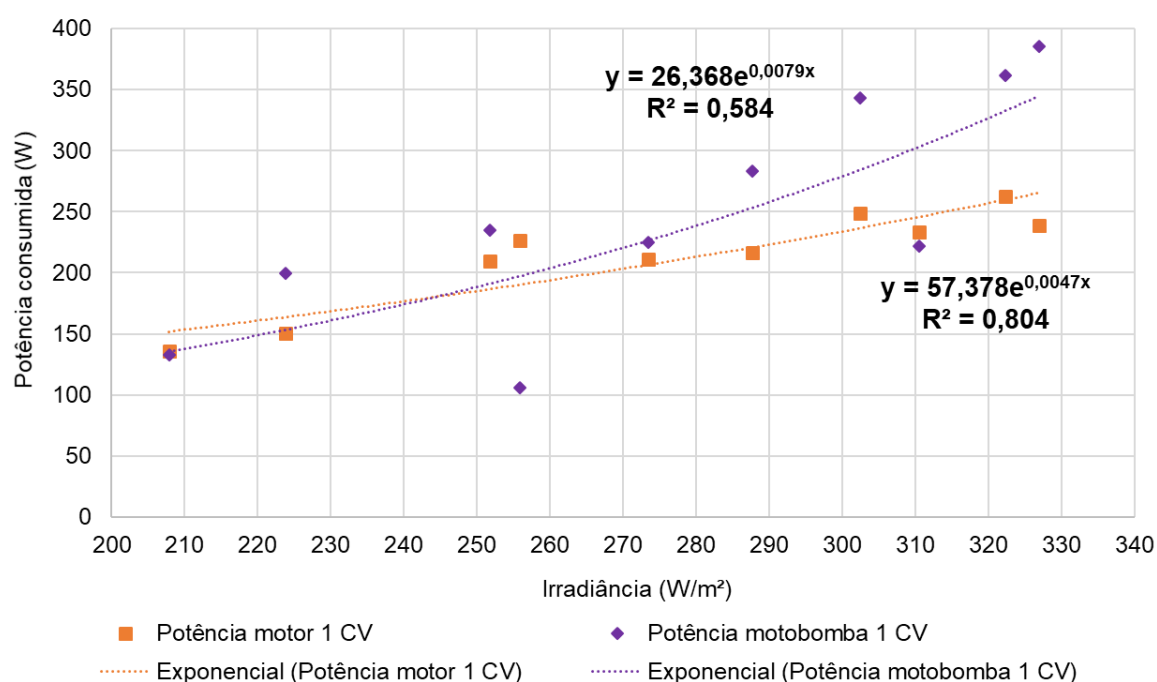


Figura 41 – Comparação entre a potência consumida da motobomba e do motor de 1 CV.

Verifica-se que em cenários de baixa irradiância (menor que 260 W/m²) o motor de 1 CV do ralador de Mandioca requer menos potência do que a motobomba para funcionar e, portanto, mostra-se adequado para integração ao SFB-CF e operação em cenários de não bombeamento de água. Para calcular a capacidade de produção do sistema, por meio dos dados de Brito et al. (2011) obtidos por uma estação meteorológica instalada no local durante o Projeto AERBOM, estima-se a

curva da irradiância diária para o mês de março no município de Itaubal – AP, estes dados estão expostos na Figura 42.

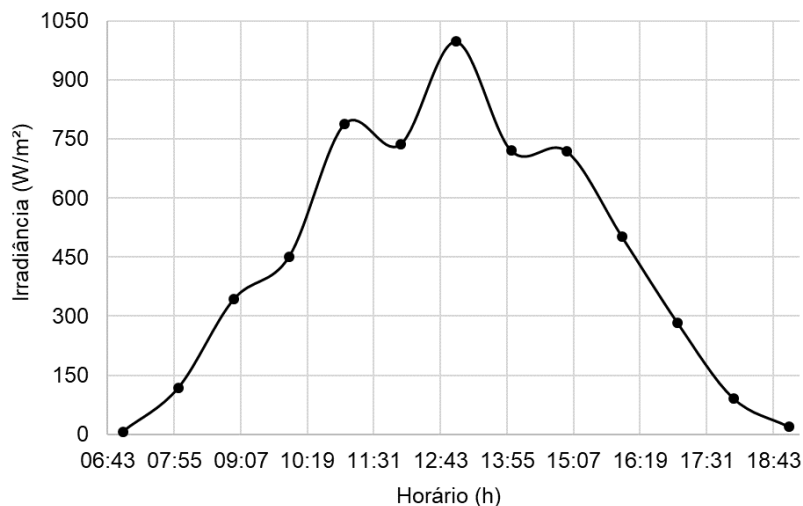


Figura 42 – Irradiância estimada para o mês de março no município de Itaubal-AP.

Verifica-se que os períodos em que a irradiância é menor ou igual a 400 W/m^2 é aproximadamente antes das 10:00 horas e depois das 16:00 horas. Portanto, considerar-se-á uma utilização média de 4 horas para o ralador de mandioca.

Considerando a produção para o pior cenário, em aproximadamente 800 g/min , e o sistema operando somente no período em que não há bombeamento de água, ou seja, apenas 4 horas por dia, estima-se uma capacidade de produção diária mínima de 192 Kg de Mandioca ralada.

5.3 Análise econômico-financeira

A análise econômica irá considerar um cenário em que já existe um SFB-CF no local e, portanto, para realizar a integração é necessário somente os materiais para instalar o ralador de mandioca. O Quadro 13 apresenta a lista de materiais utilizados e o custo de aquisição do sistema.

Quadro 13 – Materiais necessários para integrar o ralador de Mandioca ao SFB-CF.

Quant.	Itens	Valor Unit.	Valor Total	Data do orçamento
01	Motor trifásico 220 V 1 CV	R\$ 500,00	R\$ 500,00	01/02/2019
01	Polia e correia	R\$ 70,00	R\$ 70,00	01/02/2019
01	Estrutura em madeira	R\$ 200,00	R\$ 200,00	01/02/2019
100m	Cabo elétrico 2,5mm ²	R\$ 80,00	R\$ 80,00	01/02/2019
02	Plug e tomada 2P+T 20 A	R\$ 20,00	R\$ 40,00	01/02/2019
01	Parafusos, porcas e arruelas	R\$ 10,00	R\$ 10,00	01/02/2019
TOTAL			R\$ 900,00	

Deste modo, algumas considerações são realizadas para a análise econômica:

- O rendimento da produção de farinha varia entre 225 a 333 kg para cada tonelada de raiz processada (INSTITUTO DE INOVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL DE ALAGOAS, 2013). Sendo assim, será adotado o valor de 300 kg estes cálculos.
- A mão-de-obra será composta por 4 agricultores com o salário mínimo de R\$ 954,00.
- O sistema será utilizado em 23 dias por mês, durante 4 horas diárias.
- O preço da farinha de mandioca utilizado será de R\$ 4,00/kg, pois foi o menor preço encontrado na pesquisa realizada na Feira do Produtor de Macapá - AP em dezembro de 2018.
- O horizonte de investimento de 25 anos, correspondente a vida útil dos módulos fotovoltaicos, a qual é a maior dentre os equipamentos do sistema.
- Os custos de limpeza, embalagem e carvão para a torragem da farinha de mandioca foram estimados em R\$ 400,00.
- Os custos fixos para operação e manutenção do sistema (O&M) foram estimados em 2% do valor do investimento.
- A taxa de desconto foi de 12,25%, de acordo com a sugestão de Nakabayashi (2015) na nota técnica “Microgeração fotovoltaica no Brasil: Viabilidade econômica”.
- O consumo de um motor a gasolina para a mesma aplicação foi estimado em 1,5 litros por hora e o preço do combustível em R\$ 4,00 por litro.

Portanto, apresenta-se o memorial de cálculo da análise econômico-financeira no Quadro 14.

Quadro 14 – Análise econômico-financeira da integração do ralador de mandioca ao SFB-CF.

Dados	Valores	Unidade	Observações
Agricultores	954,00	R\$	Salário mínimo
Limpeza, embalagens e carvão	400,00	R\$	Despesas fixas
Rendimento ralador	48	Kg/h	Considerando a produção em 800g/min estimada nos ensaios
Processamento	192	Kg/dia	= Rendimento x 4h (pior cenário)
Produção farinha	64	Kg/dia	= Processamento/3 (1kg de mandioca p/ 300g de farinha)
Receita diária	256	R\$/dia	= Produção x 4 reais (preço da farinha)
Dias trabalhados	23	dias	Desconsidera-se sábados e domingos.
Economia de combustível (litros)	138	Litros	= 1,5 x 4h x dias trabalhados.
Economia de combustível (R\$)	552,00	R\$	= Economia de combustível (litros) x R\$ 4,00
Receita mensal	5.888,00	R\$	= Receita diária x dias trabalhados
Custo fixo total	4.216,00	R\$	= 4 agricultores + limpeza e embalagem.
Lucro mensal	1.672,00	R\$	= Receita mensal – Custo fixo total
Lucro anual	20.064,00	R\$	= Lucro mensal x 12
VPL	200.605,77	R\$	Valor Presente Líquido
VPLa	26.021,91	R\$	= VPL * FRC Lucro anual no presente considerando o tempo de vida útil total do sistema.
i=	12,25%	a.a.	Taxa de desconto sugerida de Nakabayashi (2015) na nota técnica “Microgeração fotovoltaica no Brasil: Viabilidade econômica”
FRC=	0,1297	-	Fator de recuperação de capital $FRC(i, N) = \frac{i}{[1 - (1 + i)^{-N}]}$

A demonstração do VPL pode ser verificada no Apêndice A deste trabalho. Portanto, verifica-se que o tempo de retorno do investimento, para o cenário simulado, é inferior a um mês de utilização do equipamento.

É importante destacar que esta é a renda obtida apenas com a produção da farinha de mandioca. Ainda pode-se aproveitar: a Manipueira, resíduo líquido proveniente da prensagem da mandioca ralada, para produzir tucupi e goma; a casca da mandioca e a crueira, resíduo da torragem da farinha, como ração animal; a folha da

Maniva moída, correspondente a parte superior da planta, como base para elaboração de um prato regional chamado Maniçoba. Assim, estes outros produtos podem tornar o sistema ainda mais rentável para o agricultor.

5.4 Análise da transferência de tecnologia

O sistema foi instalado na propriedade do agricultor em fevereiro de 2019, no ato da entrega foi realizada uma capacitação com os moradores, a fim de garantir a transferência de tecnologia, certificando-se da correta operação, alertando dos possíveis riscos de acidente de trabalho e das futuras manutenções que possam ser necessárias no equipamento. Paralelamente, foram realizados os ensaios 3 e 4 para confirmar o funcionamento do sistema e verificar se o agricultor tinha adquirido os conhecimentos transmitidos. Na terceira e última visita o agricultor afirmou que estava satisfeito com a tecnologia e que já conseguia operar o equipamento de forma autônoma. Em 03/04/2019 o proprietário foi questionado por telefone se já havia ralado bastante mandioca para produzir farinha e na oportunidade deu o seguinte depoimento “[...nós já serramos de 20 saca no dia aqui, rapidinha é bem maneiro... tudo com energia solar, direto, ela corta direto aí...]”.

5.5 Equipamentos agrícolas compatíveis com SFB-CF

Considerando a potência do sistema, calculada no tópico 5.1, realizou-se pesquisas em sites de fornecedores e lojas especializadas para encontrar equipamentos agrícolas com potência próxima a do SFB-CF analisado. Uma lista com sugestões de equipamentos agrícolas aptos a funcionar para esta aplicação é apresentada no Quadro 15.

Quadro 15 – Equipamentos agrícolas que podem ser integrados ao SFB-CF

Equipamento agrícola	Atividade que pode ser realizada	Potência do motor (CV)	Preço médio estimado	Data do orçamento
Moedor de Grãos - 8kg/h	Moagem de café, pimenta do reino, urucum e outros grãos secos que se aplica.	$\frac{1}{3}$	R\$ 529,63	12/01/2019
Ralador de Mandioca c/ cavalete – 50Kg/h (Caititu)	Beneficiamento de Tubérculos (Batata, mandioca, cenoura, etc.)	$\frac{1}{3}$	R\$ 676,00	12/01/2019
Engenho para Cana-de-açúcar - 80 L/h	Extrair caldo de Cana-de-açúcar	1	R\$ 689,00	12/01/2019
Triturador desintegrador - 50 a 450 kg/h (dependendo da peneira e do produto)	Moer milho seco em grãos, trituram milho em espiga, desintegram ou picam cana-de-açúcar, capim-elefante, mandioca, ramas e outros produtos verdes.	2	R\$ 948,90	12/01/2019
Debulhador de Milho Elétrico - 300 a 600 kg/h	Debulhar espigas de milho separando o cereal da palha e do sabugo.	2	R\$ 1.166,02	12/01/2019
Triturador Forrageiro - 60 a 500 kg/h (dependendo da peneira e do produto)	Cortar e triturar forragens, moer sementes e cascas de cereais, milho debulhado, cana-de-açúcar, ramas de mandioca, capim, entre outros.	2	R\$ 1.259,00	12/01/2019
Despoldadeira de frutas – 20L	Beneficiamento de frutas (Açaí, Cupuaçu, Bacaba, Cacau, Acerola, etc.)	$\frac{3}{4}$	R\$ 2.000,00	12/01/2019
Lavador e Descascador de Tubérculos – 10Kg	Beneficiamento de Tubérculos (Batata, mandioca, cenoura, etc.)	$\frac{1}{2}$	R\$ 2.330,00	12/01/2019
Classificador de sementes de cereais - 1,5 ton/h	Separa grãos de Soja, milho, trigo, arroz, aveia, entre outros em: Impurezas graúdas e pesadas; Quebrados e impurezas finas; Grãos padronizados Tipo 1 e Grãos padronizados Tipo 2.	$\frac{3}{4}$	R\$ 9.736,59	12/01/2019

6 DISCUSSÃO

O estudo teve por objetivo avaliar o uso compartilhado do gerador fotovoltaico de SFB-CF em uma aplicação multimotores. A motivação desta proposta advém do fato de que há cenários em que a energia produzida no gerador fotovoltaico não pode ser utilizada para bombeamento de água e, portanto, é desperdiçada.

Formulou-se a hipótese de que a otimização da energia produzida é possível por meio do compartilhamento da geração fotovoltaica com uma segunda carga motriz que, além do aproveitamento de energia, agregaria novas funcionalidades ao sistema por meio do uso de um equipamento agrícola.

Para a realização dos testes, foi construído um protótipo de ralador de Mandioca para os ensaios de laboratório e na propriedade agrícola foi realizada a substituição de um motor a gasolina por motor de 1 CV no ralador de Mandioca para os ensaios de campo. Em seguida, foi proposta uma nova configuração no conversor de frequência que funcionou nos dois motores testados e na motobomba do SFB-CF.

Devido à natureza dinâmica do sistema, foram necessários ajustes nos parâmetros de sintonia do controlador PID sugerido pela literatura. O melhor desempenho encontrado em campo foi com o ganho proporcional = 1, ganho integral = 0,43 e o set-point igual a 54,0%. A calibração foi realizada de forma manual e os valores encontrados são compatíveis com a motobomba e o motor de 1 CV utilizado no ralador de mandioca.

Quanto ao motor de $\frac{1}{2}$ CV, verificou-se que este funcionou na velocidade nominal em todos os períodos testados. Porém, a corrente e a tensão fornecidas pelo CF excederam as nominais quando a irradiância estava superior a 700 W/m^2 , o que resultou em aquecimento do motor. Para solucionar este problema foi necessário reduzir a tensão de saída do sistema em 77,5% no controle escalar do CF. Entretanto, observou-se que este ajuste pode comprometer o rendimento da motobomba, pois este motor demanda maior potência do sistema.

Desse modo, uma sugestão de proposta para integração de cargas motrizes ao SFB-CF é a utilização de motobombas e motores para o ralador que tenham potência próxima ou superior ao do gerador fotovoltaico, que, neste caso, seria de 1 CV para ambos os casos. Ressalta-se que, conforme exposto na Figura 41, apesar

da motobomba e do motor do ralador possuem potências nominais aproximadas, a eficiência do conjunto motor e ralador de mandioca mostrou-se superior ao conjunto motobomba em irradiâncias menores que 260 W/m^2 .

Além disso, verificou-se que para a motobomba realizar o bombeamento de água é necessário um valor de frequência acima de 32 Hz e que a irradiância esteja superior a 375 W/m^2 . Este cenário não é o mesmo para o equipamento agrícola, pois ensaios realizados para o ralador motor de 1 CV no período chuvoso, com irradiância máxima de $351,8 \text{ W/m}^2$, comprovaram o funcionamento satisfatório do motor mesmo em condições meteorológicas adversas, sendo que, no caso mais crítico, a produção mínima garantida pelo sistema foi de 600 g/min.

Os testes de desempenho para o ralador de $\frac{1}{2}$ CV apontaram uma média de produção de mandioca ralada de 1.472,6 g/min em ensaio de laboratório e em campo este valor reduziu para 1.312,5 g/min. A produção de mandioca ralada foi relacionada com a irradiância e obteve-se o $R^2 = 0,7522$ para o motor de $\frac{1}{2}$ CV e o valor de $R^2 = 0,285$ para o motor de 1 CV. Acredita-se que a queda do valor de R^2 deve-se as condições meteorológicas não favoráveis encontradas durante os ensaios e a metodologia que teve que ser alterada devido as dificuldades encontradas em campo.

Quanto a análise econômica, foi considerado um cenário de rendimento médio de 800 g/min do ralador de mandioca e 4 horas de utilização do equipamento, o que representa uma capacidade de produção diária mínima de 192 Kg de Mandioca ralada. Após a realização dos cálculos apresentados no Quadro 14, verifica-se que a melhoria proposta tem a capacidade de oferecer um tempo de retorno do investimento inferior a um mês de utilização do equipamento.

Quanto a transferência de tecnologia, houve uma capacitação com os moradores da propriedade agrícola e conclui-se que esta foi bem-sucedida, pois, quando questionado sobre o equipamento, o agricultor relatou que ficou bem satisfeito com o equipamento entregue.

7 CONCLUSÃO

Conclui-se, com a elaboração deste estudo, que é verdadeira a hipótese formulada neste trabalho, ou seja, que é possível otimizar o uso de energia em SFB-CF compartilhando o conversor de frequência com duas cargas motrizes distintas. A programação e o ajuste no controlador PID realizados mostram-se compatíveis com ambos os motores utilizados. Desse modo, a aplicação final torna-se de fácil operação e, portanto, adequada para o setor rural. Por fim, realizam-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Modelar a função de transferência do sistema de bombeamento e do ralador de mandioca instalados no local, para tornar a aplicação final ainda mais confiável.
- Utilizar conversores de frequência que possibilitem o uso de controlador PID externo com set-point variável.
- Realizar análise da programação do torque linear e quadrático do conversor de frequência, a fim de obter uma programação compatível com as duas cargas motrizes.
- Efetuar testes de compatibilidade do controle vetorial do CF em uma aplicação multimotores.
- Verificar o desempenho do sistema com o uso de novas tecnologias desenvolvidas especificamente para a aplicação. Como, por exemplo, o plugin Solar Drive que pode ser adicionado ao conversor CFW500 do fabricante WEG e adiciona a função de seguimento do ponto de máxima potência ao SFB-CF.
- Executar mais ensaios no ralador de mandioca para verificar se é possível atingir melhores valores de R^2 e, conseqüentemente, modelar a produção de mandioca ralada em função da irradiância.
- Realizar testes no ralador de mandioca no período do verão para verificar o rendimento do sistema com ambos os motores operando em sua potência nominal.
- Utilizar os equipamentos agrícolas listados no Quadro 15 para comprovar em campo o funcionamento de SFB-CF em outros casos de aplicação multimotores.

REFERÊNCIAS

- ACUMULADORES MOURA. **Manual técnico – Bateria Estacionária Clean Nano**. 2016. Disponível em: < https://moura-portal.s3.amazonaws.com/uploads/2017/07/MANUAL_CLEAN_NANO_V13_06_DEZ_16.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2019.
- ALIYU, M.; HASSAN, G.; SAID, S. A.; SIDDIQUI, M. U.; ALAWAMI, A. T.; ELAMIN, I. M. A review of solar-powered water pumping systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 87, p. 61-76, 2018.
- ALVES, E. Agricultura Familiar. **Revista de Política Agrícola**, v. 15, n. 4, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10899: Energia solar fotovoltaica — Terminologia**. Rio de Janeiro, p. 11, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11704: Sistemas fotovoltaicos – Classificação**. Rio de Janeiro, p. 2, 2008.
- BOTINI. **Manual do ralador de Mandioca B145A**. São Paulo, 2017. Disponível em: < <http://botimetal.com.br/galeria/manual/1af1874322.pdf> >. Acesso em: 13 jan. 2019
- BRASIL, Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006. Estabelece as diretrizes para a formulação da Política Nacional da Agricultura Familiar e Empreendimentos Familiares Rurais. **Diário Oficial da União**, Brasília, 25 jul. 2006. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2006/Lei/L11326.htm>. Acesso em: 13 jan. 2019.
- BRITO, A. U. (Coord.). **Relatório Final do Projeto: “Desenvolvimento de um Aerogerador e Otimização de seu Acoplamento à Motobombas Convencionais por meio de Inversores de Frequências” – AERBOM**. Macapá, 2011.
- BRITO, A. U. **Otimização do acoplamento de geradores fotovoltaicos a motores de corrente alternada através de conversores de frequência comerciais para acionar bombas centrífugas**. 2006, 84 p. Tese (Doutorado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) - EP/ FEA/ IEE/ IF da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- CAPELLI, A. Inversores de frequência, **Revista Mecatrônica Atual**, v. 1, n. 2, p. 7-15, 2002.
- CARACAS, J. V. M.; FARIAS, G. C.; TEIXEIRA, L. F. M.; RIBEIRO, L. A. S. Implementation of a High-Efficiency, High-Lifetime, and Low-Cost Converter for an Autonomous Photovoltaic Water Pumping System. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 50, n. 1, p. 631-641, 2014.
- DRIEMEIER, C.; ZILLES, R. Six-element circuit for maximum power point tracking in photovoltaic-motor systems with variable-frequency drives. **Progress in photovoltaics: Research and applications**, v. 18, n. 2, p. 107-114, 2010.

FEDRIZZI, M. C. **Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário: Lições aprendidas e procedimentos para potencializar sua difusão**. 2003, 174 p. Tese (Doutorado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) - EP/ FEA/ IEE/ IF da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FEDRIZZI, M. C.; RIBEIRO, F. S.; ZILLES, R. Lessons from field experiences with photovoltaic pumping systems in traditional communities. **Energy for Sustainable Development**, v. 13, p. 64-70, 2009.

FERNANDES, J. D.; DANTAS, E. R. B.; BARBOSA, J. N. Estudo de impactos ambientais em solos: o caso da reciclagem de baterias automotivas usadas, tipo chumbo-ácido. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 7, n. 1, p. 231-255, 2011.

FILOCREÃO, A. S. M.; SILVA, I. C. da. A política de assentamentos rurais no Estado do Amapá. **PRACS: Revista Eletrônica de Humanidades do Curso de Ciências Sociais da UNIFAP**, v. 9, n. 3, p. 145-171, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017 - Resultados Preliminares**. 2018. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ap/pesquisa/24/76693>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

INSTITUTO DE INOVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL DE ALAGOAS. **Tecnologias para a Cultura da Mandioca são apresentadas em Junqueiro**. 2013. Disponível em: <<http://www.emater.al.gov.br/sala-de-imprensa/noticias/2013/novembro/tecnologias-para-a-cultura-da-mandioca-sao-apresentadas-junqueiro>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Incra nos Estados - Informações gerais sobre os assentamentos da Reforma Agrária**. 2017. Disponível em: <<http://painel.incra.gov.br/sistemas/index.php>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

LIMA, V. F.; MERÇON, F. Metais Pesados no Ensino de Química. **Química Nova na Escola**, v. 33, n. 4, 2011.

MARANHÃO, G. N. A. **Controlador Fuzzy para uso em conversores de frequência aplicado à sistemas fotovoltaicos de bombeamento**. 2015, 113p. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Belém, 2015a.

MARANHÃO, G. N. A.; BRITO, A. U.; LEAL, A. M.; FONSECA, J. K. S.; MACÊDO, W. M. Using LDR as Sensing Element for an External Fuzzy Controller Applied in Photovoltaic Pumping Systems with Variable-Speed Drives. **Sensors**, v. 15, p. 24445-24457, 2015b.

MARANHÃO, G. N. A.; BRITO, A. U.; PINHO, J. T.; FONSECA, J. K. S.; LEAL, A. M.; MACÊDO, W. M. Experimental Results of a Fuzzy Controlled Variable-Speed

Drive for Photovoltaic Pumping Systems: A Review. **IEEE Sensors Council**, v. 16, n. 9, p. 2854-2864, 2016.

MELÉNDEZ, T. A. F.; FEDRIZZI, M. C.; ZILLES, R. Conversor de frequência com CLP para sistemas fotovoltaicos de bombeamento: Caracterização operacional. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 06., 2016. **Anais...** Belo Horizonte: Associação Brasileira de Energia Solar, 2016.

MENDES, B. D.; BRITO, A. U.; CUNHA, A. C. da; NASCIMENTO, M. A. S. do. Uso de inversores de frequência e motobombas nacionais em sistemas eólicos de bombeamento de água. In: OTERO, L. M.; COSTA, E. V. M. da; AMORAS, F. C. (Coords.). **Ciências Exatas: Resultados dos projetos de iniciação científica da Universidade Federal do Amapá (2009-2011)**. Macapá: UNIFAP, 2014. p. 57-67.

MENEZES, A. J. E. A. de. **Análise econômica da “produção invisível” nos estabelecimentos agrícolas familiares no Projeto de Assentamento Agroextrativista Praia Alta e Piranheira, Município de Nova Ipixuna, Pará**. Dissertação (Mestrado) – Curso em Agriculturas Familiares e Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2002.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO. **Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Pronaf)**. 2019a. Disponível em: < <http://www.mda.gov.br/sitemda/secretaria/saf-creditorural/sobre-o-programa>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO. **Pronaf Mais Alimentos**. 2019b. Disponível em: < <http://www.mda.gov.br/sitemda/secretaria/saf-mais/sobre-o-programa>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO. **Relatórios para Brasil e Semiárido, Regiões, Estados, Territórios e Municípios**. 2015. Disponível em: < [http://www.mda.gov.br/sitemda/sites/sitemda/files/anexos/Informacoes_do_MDAeIN CRA_uf_23122015.xls](http://www.mda.gov.br/sitemda/sites/sitemda/files/anexos/Informacoes_do_MDAeIN_CRA_uf_23122015.xls)>. Acesso em: 13 jan. 2019.

MUHSEN, D. H.; KHATIB, T.; NAGI, F. A review of photovoltaic water pumping system designing methods, control strategies and field performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 70-86, 2017.

NAKABAYASHI, R. **Microgeração fotovoltaica no Brasil: Viabilidade econômica** (Nota Técnica). São Paulo: Instituto de energia e ambiente da USP, 2015.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (Org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESEB, 2014.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590-601, 2017.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos 2016: Tabela Resumo de Informações e Indicadores por Estado**. 2018. Disponível em: <

http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2016/Planilhas_AE2016_Resumo_PorEstado.zip>. Acesso em: 13 jan. 2019.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Software CREARRAY**. 2018. Disponível em: < <http://www.solar.ufrgs.br/#crearray> >. Acesso em: 13 jan. 2019.

VALER, L. R.; MELENDEZ, T. A.; FEDRIZZI, M. C.; ZILLES, R.; MORAES, A. M. Variable-speed drives in photovoltaic pumping systems for irrigation in Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 15, p. 20-26, 2016.

WEG S/A. **Inversor de Frequência CFW08 – Manual do Usuário**. São Paulo: WEG automação, 2009. Disponível em: <

<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf7/hc8/WEG-cfw08-users-manual-0899.5242-manual-en.pdf> >. Acesso em: 13 jan. 2019.

WEG S/A. **Inversor de Frequência CFW500 – Manual do Usuário**. São Paulo: WEG automação, 2017. Disponível em:

<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h2e/h62/WEG-cfw500-users-manual-10001278006-manual-en.pdf> >. Acesso em: 13 jan. 2019.

WEG S/A. **Inversor de Frequência CFW500 V2.0X – Manual de Programação**. São Paulo: WEG automação, 2016. Disponível em: <

<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h16/haa/WEG-cfw500-manual-de-programacao-10001469555-2-0x-manual-pt.pdf> >. Acesso em: 13 jan. 2019.

WEG S/A. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**. São Paulo: 2010. Disponível em: <

<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h35/h10/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-50029351-brochure-portuguese-web.pdf> >. Acesso em: 13 jan. 2019.

YINGLI SOLAR S/A. **Datasheet do Módulo Fotovoltaico YL55P-17b 2/5**. 2013. Disponível em: <

<https://www.neosolar.com.br/loja/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FFile-1371588920.pdf> >. Acesso em: 13 jan. 2019.

APÊNDICE A – DEMONSTRAÇÃO DO VPL

Quadro 16 - Demonstração do cálculo do VPL.

Ano	Conversor de frequência	Ralador de mandioca	Motobomba centrífuga 1cv	Motor trifásico 1 cv	Acessórios para instalação	O&M (2% do investimento total)	Economia de combustível	Receita	Fluxo de caixa	VPL	TCR
0		- R\$ 200,00		- R\$ 300,00	- R\$ 400,00				- R\$ 900,00	- R\$ 900,00	
1						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 23.596,34	R\$ 22.696,34
2						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 21.021,24	R\$ 43.717,58
3						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 18.727,16	R\$ 62.444,74
4						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 16.683,44	R\$ 79.128,17
5		- R\$ 200,00	- R\$ 1.320,00	- R\$ 300,00		- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 24.666,89	R\$ 13.841,48	R\$ 92.969,66
6						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 13.240,76	R\$ 106.210,42
7						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 11.795,78	R\$ 118.006,19
8						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 10.508,49	R\$ 128.514,68
9						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 9.361,68	R\$ 137.876,36

Quadro 16 (continuação) - Demonstração do cálculo do VPL.

Ano	Conversor de frequência	Ralador de mandioca	Motobomba centrífuga 1cv	Motor trifásico 1 cv	Acessórios para instalação	O&M (2% do investimento total)	Economia de combustível	Receita	Fluxo de caixa	VPL	TCR
10	- R\$ 850,00	- R\$ 200,00	- R\$ 1.320,00	- R\$ 300,00	- R\$ 400,00	- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 23.416,89	R\$ 7.373,36	R\$ 145.249,72
11						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 7.429,87	R\$ 152.679,59
12						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 6.619,04	R\$ 159.298,63
13						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 5.896,69	R\$ 165.195,32
14						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 5.253,18	R\$ 170.448,50
15		- R\$ 200,00	- R\$ 1.320,00	- R\$ 300,00	- R\$ 400,00	- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 24.266,89	R\$ 4.287,65	R\$ 174.736,14
16						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 4.169,17	R\$ 178.905,31
17						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 3.714,18	R\$ 182.619,49
18						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 3.308,85	R\$ 185.928,34
19						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 2.947,75	R\$ 188.876,09

Quadro 16 (continuação) - Demonstração do cálculo do VPL.

Ano	Conversor de frequência	Ralador de mandioca	Motobomba centrífuga 1cv	Motor trifásico 1 cv	Acessórios para instalação	O&M (2% do investimento total)	Economia de combustível	Receita	Fluxo de caixa	VPL	TCR
20	- R\$ 850,00	- R\$ 200,00	- R\$ 1.320,00	- R\$ 300,00	- R\$ 400,00	- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 23.416,89	R\$ 2.321,68	R\$ 191.197,77
21						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 2.339,47	R\$ 193.537,24
22						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 2.084,16	R\$ 195.621,40
23						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 1.856,71	R\$ 197.478,11
24						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 1.654,09	R\$ 199.132,20
25						- R\$ 201,11	R\$ 6.624,00	R\$ 20.064,00	R\$ 26.486,89	R\$ 1.473,57	R\$ 200.605,77

PREMIAÇÃO OBTIDA DURANTE A DISSERTAÇÃO

O projeto elaborado durante a dissertação foi submetido aos Prêmios da Amazônia: “Professor Samuel Benchimol” e “Banco da Amazônia de Empreendedorismo Consciente” da edição de 2018.

As categorias do Prêmio Banco da Amazônia de Empreendedorismo Consciente foram: “Iniciativa de Desenvolvimento Local (IDL)”, “Empresa na Amazônia” e “Micro empreendimento na Amazônia (Prêmio Florescer)”. Realizou-se a inscrição na categoria “Iniciativa de Desenvolvimento Local (IDL)” e o projeto foi agraciado na terceira colocação recebendo como premiação o valor de R\$ 10.000,00, menos a dedução de tributos. A Figura 43 apresenta o certificado e a Figura 44 o troféu obtido.



Figura 43 – Certificado da premiação obtida.



Figura 44 – Troféu da premiação obtida.