

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA GOIANO. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE

MOTOR DE INDUÇÃO COM CONVERSOR DE  
FREQUÊNCIA CONVENCIONAL ACOPLADO EM  
SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA IRRIGAÇÃO

Autor: Leonardo Corcino Carvalho Campos  
Orientador: Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior

RIO VERDE - GO  
Agosto - 2020

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA GOIANO. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE

MOTOR DE INDUÇÃO COM CONVERTOR DE  
FREQUÊNCIA CONVENCIONAL ACOPLADO EM  
SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA IRRIGAÇÃO

Autor: Leonardo Corcino Carvalho Campos  
Orientador: Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

RIO VERDE - GO  
Agosto – 2020



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 42/2020 - NREPG-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/DG-RV/CMPRV/IFGOIANO

**MOTOR DE INDUÇÃO COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA CONVENCIONAL ACOPLADO EM SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA IRRIGAÇÃO**

Autor: Leonardo Corcino Carvalho Campos  
Orientador: Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - Área de Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

APROVADO em 31 de agosto de 2020.

Prof. Dr. Geraldo Andrade de  
Oliveira  
Avaliador interno  
IFG

Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira  
Avaliador externo  
IF Goiano / Rio Verde

Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior  
Presidente da Banca - IF Goiano / Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

- **Geraldo Andrade de Oliveira, Geraldo Andrade de Oliveira** - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Ifg (1), em 10/09/2020 19:32:03.
- **Marconi Batista Teixeira, COORDENADOR DE CURSO - FUC0001 - UCPG-RV**, em 03/09/2020 16:14:55.
- **Joao Areis Ferreira Barbosa Junior, GERENTE - CD0004 - GEXT-RV**, em 03/09/2020 16:09:35.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 02/09/2020. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 182707  
Código de Autenticação: e3655584a1



INSTITUTO FEDERAL GOIANO  
Campus Rio Verde  
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970  
(64) 3620-5600

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

CC198m Campos, Leonardo Corcino Carvalho  
MOTOR DE INDUÇÃO COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA  
CONVENCIONAL ACOPLADO EM SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-  
GRID PARA IRRIGAÇÃO / Leonardo Corcino Carvalho  
Campos; orientador João Areis Ferreira Barbosa  
Júnior; co-orientador Márcio da Silva Vilela. -- Rio  
Verde, 2020.  
131 p.

Dissertação (Mestrado em PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE) --  
Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2020.

1. Energia fotovoltaica. 2. Conversor de  
frequência convencional. 3. Irrigação. 4. Bombeamento  
de água. 5. Energia renovável. I. Barbosa Júnior,  
João Areis Ferreira, orient. II. Vilela, Márcio da  
Silva, co-orient. III. Título.

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese  | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação                      | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização                 | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação                             | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ |   |

Nome Completo do Autor: Leonardo Corcino Carvalho Campos  
Matrícula: 2018102331440047  
Título do Trabalho: MOTOR DE INDUÇÃO COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA CONVENCIONAL ACOPLADO EM SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA IRRIGAÇÃO.

**Restrições de Acesso ao Documento**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 31/08/2020

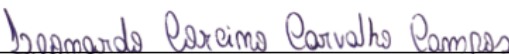
O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não  
O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

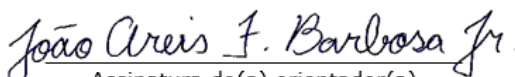
O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 31 de agosto de 2020.

  
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

  
Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 41/2020 - NREPG-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/DG-RV/CMPRV/IFGOIANO

## PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO

### ATA Nº/29

## BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 31 dias do mês de agosto do ano de dois mil e vinte, às 08h30min (oito horas e trinta minutos), reuniram-se os componentes da banca examinadora em sessão pública realizada por videoconferência, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de mestrado, de autoria de **Leonardo Corcino Carvalho Campos**, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A palavra, a seguir, foi concedida ao autor para, em 30 minutos, proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o examinado, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade**, na área de concentração em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60 (sessenta) dias** da sua ocorrência. A banca examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa dissertação em periódicos após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e para constar, foi lavrada a presente ata, que, após lida e achada conforme, será assinada eletronicamente pelos membros da banca examinadora.

Membros da banca examinadora:

Nome	Instituição	Situação no programa
Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior	IF Goiano – Campus Rio Verde	Presidente
Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira	IFG	Membro interno

Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira	IF Goiano - Campus Rio Verde	Membro externo
---------------------------------------	---------------------------------	----------------

Documento assinado eletronicamente por:

- **Geraldo Andrade de Oliveira, Geraldo Andrade de Oliveira - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Ifg (1)**, em 10/09/2020 19:32:29.
- **Marconi Batista Teixeira, COORDENADOR DE CURSO - FUC0001 - UCPG-RV**, em 03/09/2020 16:20:59.
- **Joao Areis Ferreira Barbosa Junior, GERENTE - CD0004 - GEXT-RV**, em 03/09/2020 16:13:21.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 02/09/2020. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 182705  
Código de Autenticação: a8205d320f



INSTITUTO FEDERAL GOIANO  
Campus Rio Verde  
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970  
(64) 3620-5600

## DEDICATÓRIA

*À minha mãe Vânia*



## AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre esteve comigo nessa caminhada, me guiando e me fortalecendo nos momentos de dúvidas e angústias.

À minha mãe, Vânia, minha força motriz, agradeço por todo esforço dedicado à minha criação, pela paciência e compreensão em meus momentos de dificuldades.

Aos meus familiares, que tanto contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.

Ao meu professor orientador, João Areis F. Barbosa Jr., pelos conhecimentos compartilhados.

À minha noiva, Milena Fonseca Ferreira, pelo apoio incondicional durante todo o período de estudos.

Aos meus amigos, que me fortaleceram nessa caminhada com palavras de apoio e com momentos de descontração. Sempre agradeço a Deus pela oportunidade de me permitir conhecer pessoas que me ensinam a ser uma pessoa melhor. Aos meus companheiros de coletas, amigos do trabalho, faculdade e mestrado, meus agradecimentos.

Agradecimento especial aos professores e coordenadores do PPGEAS, obrigado pela oportunidade oferecida e por todos os ensinamentos.

Agradeço à empresa Automasol, junto com seu proprietário, o senhor Gustavo, pelo apoio técnico durante toda a elaboração deste trabalho.

E por fim, um agradecimento à FAPEG, pelo incondicional incentivo à pesquisa, através da bolsa de mestrado, cuja ajuda foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

## BIOGRAFIA DO AUTOR

Leonardo Corcino Carvalho Campos, nascido em 04 de fevereiro de 1985 na cidade de Rio Verde, Goiás. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Uberaba em 2009. Pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade de Rio Verde em 2016. Ingressou no Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade (PPGEAS) em 2018/1, fazendo a defesa de sua dissertação em agosto de 2020.

## ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	xi
ÍNDICE DE APÊNDICE.....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	xiiv
2. OBJETIVOS.....	xx
2.1 Objetivo Geral.....	xx
2.2 Objetivos Específicos.....	xx
3. REFERÊNCIAS.....	xx
ARTIGO: UTILIZAÇÃO DE MOTOR DE INDUÇÃO COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA CONVENCIONAL EM SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA IRRIGAÇÃO.....	14
ABSTRACT.....	24
1 Introdução .....	25
1.1 Sistemas de Bombeamento de Água para Irrigação Utilizando Energia Fotovoltaica .....	27
1.2 A Energia Fotovoltaica .....	31
1.3 Tipos de Módulos Fotovoltaicos.....	33
1.4 Efeitos da Radiação e da Temperatura da Célula nos Módulos Fotovoltaicos...	34
1.5 Motores Elétricos .....	38
1.5.1 Motores de corrente alternada síncronos .....	38
1.5.2 Motores de corrente alternada assíncronos .....	39
1.5.3 Motores assíncronos operando em vazio .....	41
1.5.4 Motores assíncronos operando em carga .....	43
1.5.5 Motores de corrente alternada assíncrono tipo rotor curto-circuitado .....	45
1.5.6 Motores de corrente alternada assíncrono tipo rotor bobinado.....	47
1.5.7 Motores de corrente contínua.....	48
1.6 Bombas Hidráulicas de Aplicação Fotovoltaica .....	53
1.6.1 Bombas de Deslocamento Positivo.....	54
1.6.2 Bombas Centrífugas.....	55
1.7 Seleção do tipo de bomba em aplicações fotovoltaicas .....	55

1.8	Conversores de Frequência .....	57
1.9	Parametrização do Inversor de Frequência .....	60
2.	Considerações Finais .....	64
5	Referências.....	66
ARTIGO: MOTOR DE INDUÇÃO COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA CONVENCIONAL ACOPLADO A SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA IRRIGAÇÃO.....		68
1	INTRODUÇÃO .....	76
2	MATERIAIS E MÉTODOS .....	79
2.1	TIPO DE PESQUISA .....	79
2.2	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL EM ESTUDO .....	80
2.3	IRRADIAÇÃO SOLAR NO LOCAL DE ESTUDO .....	80
2.4	MONTAGEM DO ARRANJO EXPERIMENTAL .....	81
2.5	SELEÇÃO DO CONVERSOR DE FREQUÊNCIA COMERCIAL .....	85
2.6	SELEÇÃO DA BOMBA ELÉTRICA DE CORRENTE ALTERNADA .....	88
2.6	METODOLOGIA DO ENSAIO.....	92
2.8	GRANDEZAS MONITORADAS .....	96
2.8.1	ELÉTRICAS .....	96
2.8.2	SOFTWARE ABB DRIVE COMPOSER .....	97
2.8.3	MEDIDA DA IRRADIÂNCIA .....	97
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	99
3.1	LIMITES OPERACIONAIS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DE UM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA CONVENCIONAL ACIONANDO UMA MOTOBOMBA CENTRÍFUGA CONVENCIONAL.....	99
3.2	CONFIGURAÇÃO DO CONTROLE DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DE UM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA CONVENCIONAL ACIONANDO UMA MOTOBOMBA CENTRÍFUGA CONVENCIONAL.....	110
3.3	AVALIAÇÃO DE CUSTOS .....	117
3.4	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	122
4	CONCLUSÃO .....	123
5	REFERÊNCIAS.....	125
APÊNDICE.....		121

## ÍNDICE DE TABELAS

### **ARTIGO: ARTIGO MOTOR DE INDUÇÃO COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA CONVENCIONAL ACOPLADO A SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA IRRIGAÇÃO**

<b>Tabela 1-</b> Características dos módulos fotovoltaicos instalados.....	85
<b>Tabela 2 -</b> Características do conversor de frequência .....	87
<b>Tabela 3 -</b> Características da bomba centrífuga utilizada .....	89
<b>Tabela 4 -</b> Características hidráulicas da bomba utilizada na pesquisa .....	91
<b>Tabela 5 -</b> Características do medidor de irradiância utilizado.....	97
<b>Tabela 6-</b> Vazão estimada em comparação com a velocidade do motor .....	100
<b>Tabela 7 –</b> Condição climática nas datas das coletas dos dados.....	101
<b>Tabela 8 -</b> Ensaio da bomba para clima ensolarado.....	101
<b>Tabela 9 -</b> Ensaio da bomba para clima parcialmente nublado .....	103
<b>Tabela 10 -</b> Ensaio da bomba para clima nublado .....	105
<b>Tabela 11 -</b> Ensaio da bomba para clima chuvoso.....	106
<b>Tabela 12 -</b> Vazão total para a estratégia de <i>set-point</i> fixo.....	108
<b>Tabela 12 -</b> Ensaio para <i>set-point</i> variável para as condições climáticas ensolarado e parcialmente nublado .....	113
<b>Tabela 13 -</b> Ensaio para <i>set-point</i> variável para as condições climáticas nublado e chuvoso .....	114
<b>Tabela 14 -</b> Comparação estratégia <i>set-point</i> fixo e variável.....	115
<b>Tabela 15 –</b> Custo dos equipamentos.....	120
<b>Tabela 16 –</b> Comparação do custo do volume bombeado – velocidade fixa.....	121
<b>Tabela 17 –</b> Comparação do custo por volume diário bombeado – velocidade variável .....	121

## ÍNDICE DE FIGURAS

### ARTIGO: UTILIZAÇÃO DE MOTOR DE INDUÇÃO COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA CONVENCIONAL EM SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA IRRIGAÇÃO

<b>Figura 1</b> - Configuração de um sistema de bombeamento fotovoltaico para irrigação .	28
<b>Figura 2</b> – Imagem ilustrativa de alguns módulos fotovoltaicos de um sistema para irrigação .....	29
<b>Figura 3</b> – (a) Célula monocristalina, (b) Módulo Fotovoltaica monocristalina, (c) Célula policristalina, (d) Módulo fotovoltaica policristalina.....	34
<b>Figura 4</b> – Exemplo de célula, módulo, painel e matriz solar. ....	34
<b>Figura 5</b> – Curvas $I_{sc}$ , $I_{mp}$ , $V_{oc}$ e $I_{mp}$ características de um módulo fotovoltaico ..	36
<b>Figura 6</b> – Efeitos da variação da irradiação solar em relação à tensão e à corrente em um módulo de Silício cristalino. ....	37
<b>Figura 7</b> – Efeitos da diminuição da tensão de circuito aberto devidos ao aumento da temperatura em um módulo de silício cristalino.....	38
<b>Figura 8</b> – Motor síncrono .....	39
<b>Figura 9</b> – Principais componentes de um motor assíncrono CA.....	40
<b>Figura 10</b> – Circuito equivalente do motor em vazio .....	43
<b>Figura 11</b> – Circuito equivalente do motor em carga .....	43
<b>Figura 12</b> – Circuito equivalente do motor em carga .....	45
<b>Figura 13</b> – Principais componentes de um motor assíncrono rotor gaiola de esquilo ..	46
<b>Figura 14</b> – Motor assíncrono de rotor de anéis .....	47
<b>Figura 15</b> – Motor de corrente contínua .....	49
<b>Figura 16</b> – (a) Motor CC sem escovas; (b) Motor CC com escovas.....	51
<b>Figura 17</b> – (a) Torque x Velocidade de um motor CC.....	53
<b>Figura 18</b> – Tipos de bombas de deslocamento positivo: (a) engrenagem, (b) rolos, (c) helicoidal, (d) excêntrico, (e) palhetas, (f) pistão giratório.....	54
<b>Figura 19</b> – Imagem real de uma bomba de deslocamento positivo.....	54
<b>Figura 20</b> – Imagem de uma bomba centrífuga .....	55
<b>Figura 21</b> – Comparação entre bomba centrífuga e bomba de deslocamento positivo em relação à vazão e à altura manométrica .....	56

<b>Figura 22</b> – Comparação entre bomba centrífuga e bomba de deslocamento positivo em relação à vazão e à altura manométrica .....	56
<b>Figura 23</b> – Exemplo de instalação de bomba centrífuga submersível .....	57
<b>Figura 24</b> – Diagrama de blocos de um conversor de frequência.....	58
<b>Figura 25</b> – Diagrama de blocos de um conversor de frequência.....	59
<b>Figura 26</b> – Diagrama de blocos em malha fechada.....	60
<b>Figura 27</b> – Sinal de realimentação obtido diretamente da saída analógica do CF .....	62
<b>Figura 28</b> – (a) Curva característica do controle escalar do CF; (b) Curva característica do controle vetorial do CF .....	63

## **ARTIGO: ARTIGO MOTOR DE INDUÇÃO COM CONVERTOR DE FREQUÊNCIA CONVENCIONAL ACOPLADO A SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA IRRIGAÇÃO**

<b>Figura 1</b> - Esquema da instalação do sistema fotovoltaico para irrigação.....	81
<b>Figura 2</b> - Esquema do sistema de bombeamento de água fotovoltaico laboratorial ....	82
<b>Figura 3</b> - Arranjo fotovoltaico com 8 módulos ligados em série .....	83
<b>Figura 4</b> – Imagem dos módulos fotovoltaicos montados .....	84
<b>Figura 5</b> – Local de instalação das placas no IFGoiano .....	84
<b>Figura 6</b> – Imagem do inversor escolhido para a pesquisa (ACS880 ABB) .....	86
<b>Figura 7</b> – Imagem da bomba utilizada na pesquisa.....	88
<b>Figura 8</b> – Curva altura manométrica versus vazão da bomba utilizada na pesquisa....	90
<b>Figura 9</b> – Curva rendimento versus vazão da bomba utilizada na pesquisa .....	90
<b>Figura 10</b> – Montagem da tubulação de 2” .....	91
<b>Figura 11</b> – Imagem da bomba elétrica e da caixa d’água .....	92
<b>Figura 12</b> – Fluxograma dos ensaios com velocidade fixa e variável .....	93
<b>Figura 13</b> – Medição da irradiação solar .....	98
<b>Figura 14</b> – Esquema de ligação de alimentação do inversor.....	99
<b>Figura 15</b> – Vazão estimada em comparação com a velocidade do motor.....	100
<b>Figura 16</b> – Ensaio da bomba para clima ensolarado .....	102
<b>Figura 18</b> – Ensaio da bomba para clima nublado.....	105
<b>Figura 19</b> – Ensaio da bomba para clima chuvoso .....	107
<b>Figura 20</b> – Vazão total para a estratégia de set-point fixo .....	108
<b>Figura 22</b> – Vazão da bomba para a estratégia de set-point variável .....	114

<b>Figura 23</b> – Comparação entre estratégia set-point fixo e variável .....	116
<b>Figura 24</b> – Irradiação Solar versus Tensão do link DC do inversor.....	116
<b>Figura 25</b> – Kit do Sistema de bombeamento Solartronic – SA 1500.....	119
<b>Figura 26</b> – Exemplo de instalação Kit do Sistema de bombeamento Solartronic.....	119



## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Significado	Símbolo / Sigla	Unidade de medida
Vetor indução magnética	B	Wb/m <sup>2</sup>
Corrente elétrica no circuito do gerador fotovoltaico	C	A
Conversor de frequência convencional	CF	-
Altura de recalque	h	M
Nível crítico de irradiância	IC	W.m <sup>-2</sup>
Irradiância coletada	Icol	W.m <sup>-2</sup>
Valor médio máximo da irradiância local	Icol,max	W.m <sup>-2</sup>
Irradiância máxima extraterrestre	Ioeff,max	W.m <sup>-2</sup>
Potência hidráulica	Ph	W
Controle proporcional e integral	PI	-
Potência máxima do gerador fotovoltaico	Pmax	W
Vazão de água na tubulação de recalque	Q	m <sup>3</sup> /h
Resistência elétrica	R	Ω
Sistema de bombeamento fotovoltaico	SBFV	-
Tensão elétrica de saída do gerador fotovoltaico	U	V
Tensão contínua	VCC	V
Tensão alternada	VAC	V
Corrente alternada	CA/AC	A
Corrente contínua	CC/DC	A
Modulação por Largura de Pulso	PWM	-

## ÍNDICE DE APÊNDICE

	Página
Tabelas de apêndice .....	121

## RESUMO

CAMPOS, LEONARDO CORCINO CARVALHO. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, agosto de 2020. **Motor de Indução com Conversor de Frequência Convencional Acoplado em Sistema Fotovoltaico Off-Grid para Irrigação.** Orientador: João Areis F. Barbosa Jr.

Atualmente são empregadas bombas de corrente contínua, que podem ter elevado custo de manutenção, dificuldade na reposição de peças e barreiras em sua comercialização. Diante disso, torna-se prioritário o estudo da viabilidade técnica do uso de conversores de frequência convencionais, normalmente empregados em aplicações industriais, em sistemas de bombeamento de água com tecnologia fotovoltaica. Para tanto, este trabalho dedica atenção ao estudo de viabilidade técnica na utilização de conversores de frequência convencionais, normalmente empregados em aplicações industriais, em sistemas de bombeamento de água com tecnologia fotovoltaica. Atualmente são empregadas bombas de corrente contínua, que têm alto custo de manutenção, dificuldade na reposição de peças e barreiras em sua comercialização. Para tanto, a presente pesquisa utiliza um protótipo que permite simular um circuito fechado de bombeamento e armazenamento de água para irrigação, como uma possibilidade interessante, a substituição dos inversores especiais, usados especificamente em sistemas de bombeamento fotovoltaico, por conversores de frequência tradicionais. Estes são equipamentos convencionais fabricados em grande escala, diversidade de modelos, larga faixa de potência, baixo custo e com funções que permitem adaptá-los para seu uso em sistemas de bombeamento fotovoltaico. Adicionalmente, sua inserção nos sistemas fotovoltaicos possibilita a utilização de motobombas convencionais, alimentadas por rede CA, que existem em grande variedade no mercado. Tal arranjo confere ao sistema uma gama de possibilidades: instalação de sistemas com potências variadas, aplicação de diferentes tipos e fabricantes de bombas, facilidade de manutenção e reposição de peças. Diante do exposto, este projeto busca contribuir para a difusão dos sistemas de bombeamento a partir da energia solar fotovoltaica, pela redução do tempo de retorno de investimento, devido à substituição de sistemas de bombeamento específicos para utilização com energia fotovoltaica, por uma alternativa de menor custo, que utilize conversores de frequência e bombas elétricas comuns.

**PALAVRAS-CHAVE:** conversores de frequência, fotovoltaico, motores elétricos, bombeamento de água, limites operacionais.

## ABSTRACT

**CAMPOS, LEONARDO CORCINO CARVALHO.** Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, agosto de 2020. **Motor de Indução com Conversor de Frequência Convencional Acoplado em Sistema Fotovoltaico Off-Grid para Irrigação.** Orientador: João Areis F. Barbosa Jr.

Currently, direct current pumps are used, which can have high maintenance costs, difficulty in replacing parts and barriers in their commercialization. Given this, it becomes a priority, the study of the technical feasibility of using conventional frequency converters, normally used in industrial applications, in water pumping systems with photovoltaic technology. Therefore, the work pays attention to the technical feasibility of using conventional frequency converters, normally used in industrial applications, in water pumping systems with photovoltaic technology. Currently, DC pumps are used, but they have high maintenance costs, difficulty in replacing parts and barriers in their commercialization. Thus, the present research uses a prototype that allows simulating a closed circuit for pumping and storing water for irrigation, as an interesting possibility, the replacement of special inverters, used specifically in photovoltaic pumping systems, by traditional frequency converters. These are conventional equipment manufactured on a large scale, diversity of models, wide power range, low cost and with functions that allow them to be adapted for use in photovoltaic pumping systems. Additionally, its insertion in photovoltaic systems makes it possible to use conventional motor pumps that exist in great variety in the market. This arrangement gives the system a range of possibilities: installation of systems with high powers, different types and manufacturers of pumps, easy maintenance and replacement of parts. So, this project seeks to contribute to the diffusion of pumping systems from photovoltaic solar energy, by reducing the return on investment time, due to the replacement of specific pumping systems for use with photovoltaic energy, by an alternative of lower cost, using frequency converters and common electric pumps.

**KEYWORDS:** frequency converters, photovoltaic, electric motors, pumping water, operational limits.

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial tem se refletido diretamente no contínuo aumento do consumo de alimentos, contribuindo diretamente para a necessidade de ampliar sua produção. Nesta conjuntura, o Brasil se destaca como um dos maiores produtores de alimentos do mundo, em razão de suas condições geográficas e climáticas favoráveis. Além do desafio para a produção de alimentos, as iniciativas relacionadas a este estudo implicam diretamente a existência de terras cultiváveis, além da disponibilidade de água e de energia. No âmago das contingências mais notáveis da atualidade, reside uma lógica de interdependências que, historicamente, não vem sendo favorecida, uma vez que se mantém a tradição de planejamento e de ações setoriais, frequentemente exacerbando mecanismos custosos de compensações, externalidades e passivos (COCCO, 2014).

A geração de energia, por exemplo, acarreta elevada demanda por água ou mesmo sua poluição. A produção de alimentos em larga escala caracteriza análoga amplitude na alocação de insumos agrícolas e de recursos hídricos. A oferta de água para abastecimento público demanda energia para captação, tratamento e distribuição. A produção industrial decorre de modo intrínseco de distintas cadeias de provisão de materiais, energia e recursos hídricos, também acarretando produção de resíduos, efluentes e pressões generalizadas sobre os ecossistemas e seus serviços. As necessidades humanas e suas atividades, portanto, são constituídas muito mais por cadeias de elevadas interdependências e contingenciamentos intersetoriais do que pela desejável busca de sinergia e otimização de recursos (HOFF, 2011).

O aumento da dependência de água e energia para a produção de alimentos se mostra um grande desafio. À luz do reconhecimento dessas contingências e interdependências é que muito recentemente emerge uma proposta de abordagem diferenciada no campo da sustentabilidade, constituída pelo nexos água, energia e alimentos, demandando manejo integrado e governança através de diferentes setores e distintas escalas territoriais. A prerrogativa é de que água, alimentos e energia se constituem como elementos essenciais ao desenvolvimento humano, provenientes de cadeias interdependentes complexas onde ocorrem constantes compensações não

lineares. O nexos água, energia e alimentos se coloca como uma proposição de busca de eficiência sistêmica como uma reflexão e como um contraponto ao desempenho isolado de distintos setores (HOFF, 2011).

Nesse sentido, o uso da energia fotovoltaica em bombeamento de água para irrigação se mostra uma aplicação produtiva da energia, que pode servir para reduzir a limitante hídrica em localidades onde outras fontes de energia não estão disponíveis, ou seu fornecimento é difícil ou pouco confiável. O uso dessa solução acaba aumentando a produtividade, melhorando o acesso à água em quantidade e qualidade, para um grande contingente de pessoas de baixa renda e/ou onde os centros de distribuição de energia elétrica rural são distantes das reservas de água. Podem ser destacadas também as melhorias proporcionadas pelas condições econômicas da região, propiciando uma renda complementar pela irrigação de hortaliças e frutíferas (VILELA, 2018).

O fato de o sistema de bombeamento de água ser alimentado por placas fotovoltaicas e utilizar por esse motivo sistemas de bombeamento em corrente contínua tem as seguintes desvantagens: investimento inicial elevado, alto custo de manutenção, dificuldade na reposição de peças e barreiras em sua comercialização, menor produção em climas com baixa incidência solar, inversores e bombas produzidos por diferentes fabricantes, a potência dos sistemas não superar 4kW, apesar de muitas aplicações exigirem potências bem maiores. Trata-se de equipamentos importados, o que estabelece uma barreira entre o fabricante e o consumidor, sendo que alguns equipamentos têm características técnicas especiais, como, por exemplo, motores que operam com tensão de 68V, sendo, enfim, vendidos como um pacote tecnológico fechado (NASCIMENTO, 2015).

Assim, a busca por alternativas que tornem esta tecnologia mais versátil e acessível contribuiria diretamente para sua disseminação, principalmente pela redução do valor global do sistema, não obstante o atendimento também das necessidades técnicas para sua aplicação (SCHWEITZER, 2014).

Entretanto, deve-se ressaltar que informações técnicas sobre a utilização de conversores de frequência convencionais em sistemas de bombeamento com tecnologia fotovoltaica são escassas. Assim, destaca-se a necessidade de mais estudos para gerar dados de caráter experimental sobre o desempenho destes equipamentos - motor de indução e inversor de frequência convencional - que permitam fazer uma avaliação adequada do desempenho destes dispositivos, buscando destacar sua aplicabilidade,

vantagens e desvantagens. Uma importante característica a ser avaliada está na natureza da tensão de saída do arranjo fotovoltaico, que é dependente do tempo e também da natureza não linear da operação do módulo fotovoltaico, que varia diretamente com o nível de insolação e a temperatura da célula (QUEIROZ, 2019).

A continuidade da vida na terra depende, entre outros elementos básicos, da disponibilidade de água potável. Em extensas regiões da superfície terrestre, habitadas por importantes contingentes populacionais, este recurso é escasso ou de difícil acesso, seja pelo fato de se encontrar afastado dos locais onde residem as comunidades ou por se apresentar sob a forma de água subterrânea. No Nordeste do Brasil, os habitantes de pequenas vilas rurais ainda hoje fazem uso do esforço humano ou animal para extrair e transportar água de sua fonte até os locais de utilização (BRITO, 2007).

As bombas manuais constituem uma das opções mais utilizadas no abastecimento de água, especialmente para o consumo humano. Motores de combustão interna a diesel também são bastante utilizados para acionar sistemas de bombeamento. Quando se trata de pequenas comunidades, a potência dos sistemas diesel, ainda os de menor porte, resulta demasiado elevada para atender a demanda, devendo funcionar a nível parcial de potência, por conseguinte, de forma pouco eficiente. Por outro lado, as exigências de uma adequada manutenção dos sistemas diesel, em termos de custos e frequência de atendimento, fazem com que esses sistemas se encontrem, muitas vezes, além das possibilidades dessas comunidades (FRAIDENRAICH e VILELA, 2016). Avanços importantes têm sido experimentados pelos sistemas de bombeamento fotovoltaico nas últimas décadas, tanto no que diz respeito às potências e rendimento dos motores e bombas quanto aos dispositivos eletrônicos de controle (FRAIDENRAICH e VILELA, 2016).

Apesar de ainda pouco difundidos, os sistemas de bombeamento fotovoltaico apresentam muitas vantagens em relação aos sistemas convencionais. O fato de ser um equipamento modular, com módulos de potência bastante reduzida, por exemplo, 50 Wp, permite adequar melhor a demanda de água local ao porte do equipamento. Assim, uma apreciável fração dos sistemas de bombeamento fotovoltaico instalados no mundo tem se concentrado no intervalo de potências entre 500 e 1500 Wp, onde apresentam maior competitividade (BARLOW, 2016).

Os sistemas utilizados com maior frequência estão integrados por um arranjo fotovoltaico, conversor e uma motobomba. Habitualmente, ainda que não exclusivamente, são utilizadas bombas centrífugas.

Em razão do seu desenvolvimento ainda recente, existem poucos fabricantes de sistemas de bombeamento com tecnologia fotovoltaica, a variedade de produtos é pequena e os equipamentos mencionados não contam com ampla difusão no mercado. Trata-se de equipamentos especiais, vendidos em forma conjunta como um pacote tecnológico com a natural consequência de seus preços serem relativamente elevados (OLIVEIRA DE MELO, 2004).

Os argumentos que antecedem mostram que a tecnologia, tal como se apresenta na atualidade, exibe considerável rigidez em termos de opções para os usuários, preços elevados e barreiras na comercialização. É desejável, portanto, tornar esta tecnologia mais versátil e acessível, o que aumentaria sua difusão e, conseqüentemente, reduziria os preços dos equipamentos. No contexto dessa problemática, este estudo vai analisar a possibilidade da substituição dos inversores especiais usados em sistemas de bombeamento fotovoltaico por equipamentos conhecidos no mercado como conversores de frequência. São equipamentos convencionais fabricados em grande escala, diversidade de modelos, larga faixa de potência (0,74 – 45 kW) e com funções que permitem adaptá-los para seu uso em sistemas de bombeamento fotovoltaico. Adicionalmente, sua inserção nos sistemas fotovoltaicos permite utilizar motobombas convencionais, que existem em grande variedade no mercado (OLIVEIRA DE MELO, 2004).

Informações técnicas sobre a utilização de conversores de frequência convencionais em sistemas de bombeamento com tecnologia fotovoltaica são, entretanto, escassas. É desejável, portanto, gerar dados de caráter experimental, sobre o desempenho destes equipamentos, que permitam fazer uma avaliação adequada de suas possibilidades e limitações.

Assim, a justificativa deste trabalho é a abertura de toda uma gama de possibilidades, a partir da alternativa de substituição dos inversores especiais dos sistemas de bombeamento fotovoltaico por conversores de frequência, pela instalação de sistemas com potências elevadas, diferentes tipos e fabricantes de bombas, fácil manutenção e reposição de peças.



Em muitas regiões do Brasil, populações inteiras vivem com uma grande carência de água, impedindo seu desenvolvimento econômico, prejudicando as condições sanitárias e de salubridade em que vivem. Na época da seca, rios e córregos secam, as fontes de água ficam distantes, e essas populações têm que percorrer grandes distâncias para buscar água para o próprio consumo, muitas vezes água de baixa qualidade. Frequentemente, essas comunidades estão localizadas sobre reservatórios de água de alta qualidade, situados nos lençóis subterrâneos. A falta de conhecimentos e de recursos financeiros, aliada, muitas vezes, à falta de energia, dificulta seu acesso a essa água.

Diante da dificuldade na obtenção de água, uma forma muito utilizada é a escavação de poços artesianos, que fazem uso de sistemas de bombeamento, muitas vezes instalados em regiões remotas, sem acesso à eletricidade, o que se torna um outro obstáculo.

Diante do exposto, buscando contornar os desafios destacados, a presente dissertação apresenta os resultados de um projeto desenvolvido ao longo do Mestrado, estando organizado, na sequência, em dois artigos científicos:

- o primeiro traz o estado da arte a respeito das principais tecnologias comerciais disponíveis para utilização em sistemas de bombeamento de água para fins de irrigação, movidos a energia solar fotovoltaica, procurando destacar suas principais características, vantagens e desvantagens, além de particularidades operativas;
- o segundo artigo, que apresenta o sistema proposto por este trabalho, é composto basicamente por um conjunto de painéis solares que captam a energia incidente do sol, um conversor de frequência convencional de mercado, utilizado para converter a corrente contínua gerada pelas placas em corrente alternada, uma bomba elétrica de corrente alternada, cuja função é captar a água de uma fonte, um tanque de armazenamento e um sistema de irrigação propriamente dito. Para tal sistema, não é utilizada uma rede externa de alimentação elétrica convencional, já que o sistema proposto tem como única fonte de energia o sol, através da energia fotovoltaica. Logo, trata-se de uma solução off-grid.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Estudar os limites operacionais de um sistema de bombeamento de água a partir de energia solar fotovoltaica, composto por um motor de indução, acoplado diretamente a um conversor de frequência convencional, de fácil acesso no mercado.

### 2.2 Objetivos Específicos

- I. Montar experimentalmente um sistema equivalente de irrigação fotovoltaico *off-grid*;
- II. Estabelecer as limitações técnicas do conversor de frequência convencional pela sua aplicação para sistemas fotovoltaicos;
- III. Avaliar o desempenho do motor de indução através de ensaios, sob diferentes condições de radiação solar; e
- IV. Buscar uma configuração operacional que maximize o tempo que a bomba permanecerá ligada.

## 3. REFERÊNCIAS

BARLOW R.; MCNELIS B.; DERRICK A., Status and experience of solar PV pumping in developing countries. In: Proceedings of the 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Lisboa, Portugal, 2016.

BRITO, LT de L.; SILVA, A. de S.; PORTO, Everaldo R. Disponibilidade de água e a gestão dos recursos hídricos. Embrapa Semiárido-Capítulo em livro científico (ALICE), 2007.

COCCO, Carine. Produção e qualidade de mudas e frutas de morangueiro no Brasil e na Itália. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

FRAIDENRAICH, N. & VILELA O. C., Avanços em sistemas de abastecimento de água com bombeamento fotovoltaico para comunidades rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 4: 69-81, 2016.

HOFF, H. Understanding the Nexus, background paper for the Bonn 2011 Conference. In: The Water, Energy and Food Security Nexus - Solutions for the green Economy. 2011, Stockholm. Background paper: Stockholm: SEI, 2011. p.52.

NASCIMENTO, Rogério Luiz; HAUSMANN, Romeu. Sistema de bombeamento de água pluvial com estudo da viabilidade da utilização de energia solar fotovoltaica. Revista E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial-ISSN-1983-1838, v. 8, n. 2, p. 85-110, 2015.

OLIVEIRA DE MELO, Rinaldo. Condicionamento de potência de uma motobomba em um sistema de bombeamento fotovoltaico através de um conversor de frequência. 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

QUEIROZ, André Oliveira et al. Sistema fotovoltaico de conexão direta em aplicação multimotores para setores para o setor rural. 2019.

SCHWEITZER, Rômulo et al. Sistema de bombeamento de água empregando bomba vibratória submersa, alimentada por meio de módulos fotovoltaicos. 2014.

VILELA, Vera Lúcia Delmônico et al. Qualidade da água de mananciais empregados na irrigação e lavagem de hortaliças da região de Apucarana, Paraná. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

(Artigo 01 - Normas de acordo com a Revista “Engenharia Sanitária e Ambiental”)

- ISSN: 1809-4457
- QUALIS: B1
- LINK DA REVISTA: <http://abes-dn.org.br/?p=14788>

# USO DE MÁQUINAS DE INDUÇÃO E CONVERSORES DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

## USE OF INDUCTION MACHINES AND FREQUENCY CONVERTERS IN PHOTOVOLTAIC PUMPING SYSTEMS

Leonardo Corcino Carvalho Campos<sup>1</sup>

### Resumo

Este trabalho dedica atenção ao estudo de geradores fotovoltaicos ligados a motores de corrente alternada e a conversores de frequência convencionais de mercado, cuja aplicação é o bombeamento de água para sistemas de irrigação de pequeno porte. A proposta tem forte apelo humanitário em razão da escassez de água em comunidades isoladas, além do casamento perfeito entre o sol e a produção de alimentos. Foram feitas diversas pesquisas bibliográficas a respeito dos principais componentes do sistema, compreendendo gerador fotovoltaico, bombas trifásicas e conversores de frequência convencionais. A pesquisa descreveu os princípios de funcionamento de cada um dos principais componentes. Seu objetivo é avaliar a viabilidade técnica da utilização de um sistema cuja fonte de energia é de corrente contínua, mas o motor elétrico é de corrente alternada. Dessa forma, foram analisadas informações da literatura atual sobre o tema, sob o ponto de vista da aplicação em sistemas de irrigação, no intuito de diminuir os custos de instalação e manutenção, objetivando difundir este tipo de tecnologia nas reservas de água. A pesquisa revelou escasso conteúdo técnico sobre o tema, bem como a necessidade de gerar dados de caráter experimental sobre o desempenho destes equipamentos, que permitam fazer uma avaliação adequada de suas possibilidades e limitações. Por consequência, diante do entendimento sobre o tema que foi levantado na pesquisa, está a abertura de toda uma gama de possibilidades com base na alternativa de substituição dos inversores especiais dos sistemas de bombeamento fotovoltaico por conversores de frequência.

---

<sup>1</sup> Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade – IFGoiano. E-mail: leonardocarvalho\_campos@hotmail.com

Palavras-Chave: Inversores de Frequência, Fotovoltaico, Motores Elétricos, Bombeamento De Água, Irrigação.

#### ABSTRACT

The work pays attention to the study of photovoltaic generators connected to alternating current motors, and conventional frequency converters on the market, whose application is the pumping of water for small irrigation systems. The proposal has a strong humanitarian appeal due to water scarcity in isolated communities, in addition to the perfect marriage between sun and food production. Various bibliographic searches were carried out regarding the main components of the system: photovoltaic generator, three-phase pumps and conventional frequency converters. The research described the operating principles of each of the main components, the objective is to evaluate the technical feasibility on the use of a system whose energy source is direct current, but the electric motor is alternating current. Thus, information from the current literature on the subject was analyzed, from the point of view of application in irrigation systems, in order to reduce installation and maintenance costs, with the aim of spreading this type of technology in water reserves. The research revealed the scarce technical content on the subject, as well as the need to generate experimental data on the performance of this equipment, which allow an adequate assessment of its possibilities and limitations. However, in view of the understandings on the theme that was raised in the research, there is the opening of a whole range of possibilities, starting from the alternative of replacing the special inverters of the photovoltaic pumping systems by frequency converters.

Keywords: Frequency Converters, Photovoltaic, Electric Motors, Pumping Water, Irrigation.

## 1 Introdução

A Conferência do Milênio, promovida pelas Nações Unidas em 2000, determinou que fosse reduzido à metade o número de pessoas sem acesso à água potável até o ano de 2030 (AGNU, 2000). Para viabilizar este acesso, é imprescindível promover soluções energéticas que facilitem a difusão do acesso à água, pois grande parte da população com deficiência no abastecimento de água carece de energia para sua captação e transporte. Neste contexto, pode-se destacar a utilização dos sistemas de bombeamento de água para irrigação, que têm fortes apelos humanitários e econômicos, além de dispensarem o uso de acumuladores de energia elétrica, que provocam queda acentuada do rendimento do sistema.

Uma das maneiras de aumentar a produção de alimentos, considerando que a expansão de terras agricultáveis não se mostra tão viável ambientalmente, está relacionada ao aumento da produtividade no mesmo espaço cultivável. Alguns avanços que aparecem no horizonte, já colocados em prática, mostram grandes perspectivas para aumentar a produtividade das culturas e aumentar a eficiência agrícola, incluem o sensoriamento remoto, constituído de fotografias infravermelhas tomadas de grandes altitudes; a aplicação de adubos orgânicos ou de origem mineral; a utilização de técnicas de irrigação que tanto preservam o uso da água quanto evitam a ocorrência da salinização do solo em regiões com alto índice de evaporação; a aplicação de técnicas de correção de acidez; o emprego da técnica de minhocultura; a realização de análise do tipo de solo para utilizar máquinas agrícolas específicas para cada tipo; a contenção da erosão; a rotação de cultura, afolhamento; e o plantio direto (CAIRNS, 2016).

Em muitas áreas, nos mais diversos países, grandes extensões de terra que eram consideradas marginais para a produção das culturas por causa da falta de água estão hoje com altas produtividades em decorrência do desenvolvimento de sistemas de irrigação com pivôs centrais. Poços são perfurados no centro desses campos, a água é aspergida sobre as lavouras por aspersores conectados a uma estrutura metálica do pivô central, que se move em círculo sobre a área (CAIRNS, 2016).

Centenas de hectares podem ser irrigados com maiores sistemas. Fertilizantes fluidos e pesticidas podem também ser distribuídos por esses sistemas. O sistema do tipo pivô central se ajusta aos mais variados tipos de solo e declividades do terreno (até 15%), permitindo irrigar centenas de hectares com adequada uniformidade de aplicação de água e distribuição de nutrientes via fertirrigação, desde que sejam feitos o controle periódico da lâmina de irrigação para atender a demanda de água pela cultura e o balanço nutricional, o que acarreta maior eficiência no uso da água e dos fertilizantes, com conseqüente redução de custos de produção. Para que essas fontes de

água de alto custo sejam utilizadas do modo mais eficiente pelas culturas, o suprimento de nutrientes deve ser otimizado (CAIRNS, 2016).

Em muitas regiões semiáridas do mundo, existem desenvolvimentos promissores na captação de água e uso mais eficiente da umidade para a produção das culturas. Sistemas de produção das culturas envolvendo esses métodos de manejo da umidade do solo, em conjunto com outros fatores para a obtenção de altas produtividades, tais como adubação, variedades e híbridos e época de plantio, precisam ser continuamente estudados. A eficiência da irrigação é um tema importante em várias áreas do mundo que apresentam limitado suprimento de água para uso agrícola. Irrigação por gotejamento pode reduzir em 50 % a água atualmente em uso nos sistemas convencionais de irrigação (CAIRNS, 2016).

É sabido que Brasil e Israel têm realidades antagônicas em relação à disponibilidade hídrica. Enquanto o primeiro é conhecido por ser um dos maiores detentores de água doce disponível no planeta, o segundo tem um território majoritariamente desértico e apresenta um cenário de extrema escassez hídrica. Em meio à adversidade, Israel consegue manter a regularidade dos serviços de água prestados e detém uma das gestões de recursos hídricos mais bem-sucedidas já implantadas no mundo (ARAUJO, 2018).

A escassez hídrica afeta diversas regiões do planeta como os países do sul da Europa, do Oriente Médio, do norte da África, maior parte da Oceania, sul da Ásia, México, Chile, Peru, África do Sul, entre outros. Sabe-se que o Brasil responde por aproximadamente 12% da água doce disponível no mundo, mas seu potencial hídrico não é distribuído de forma homogênea. O Sudeste brasileiro concentra grandes metrópoles e apresenta maior densidade demográfica e, conseqüentemente, maior demanda por água, porém é a região Norte que detém as grandes reservas de água, sendo justamente a região menos habitada. Assim, embora o país tenha uma posição mais confortável em comparação a outros países, é necessário gerir e preservar seus corpos de água e, para isso, absorver as inovações e lições aprendidas pelos países que têm uma gestão de água já consolidada (ARAUJO, 2018).

Em contrapartida, Israel apresenta um dos cenários de maior estresse hídrico em relação ao restante das regiões do globo terrestre. O país apresenta clima semiárido, aproximadamente 70% das chuvas são perdidas por evapotranspiração, apenas 25% se infiltram para as águas subterrâneas ou permanecem no solo e 5% fluem como águas superficiais (MARIN et al., 2017).

Deve-se ressaltar que a irrigação está diretamente relacionada com o consumo de energia elétrica. A falta de energia elétrica convencional na cidade forçou os produtores a utilizar geradores a diesel no fornecimento de energia elétrica para grande parte da área irrigada. A cidade tem 152 produtores que irrigam por pivô central, havendo, em contrapartida, o quádruplo desse número



referente aos que querem irrigar. Esses produtores têm técnicas bem-sucedidas de armazenamento da água das chuvas, contudo precisam bombear esta água para o ponto mais alto. O Estado de Goiás irriga cerca 233 mil hectares, 70% por pivô central. Entre os municípios goianos que mais irrigam, estão Cristalina, Paraúna, Campo Alegre, Água Fria, Jussara, Rio Verde, Luziânia, Morrinhos, Cabeceiras, Ipameri e Formosa (ANA, 2020).

A utilização de placas solares como fonte de energia elétrica é uma alternativa promissora para o abastecimento de água em áreas rurais sem acesso à rede elétrica convencional, localizadas em zonas remotas. Um problema comum em comunidades rurais é a falta de acesso a quantidades suficientes de água para abastecer a demanda das culturas agrícolas, sendo este um fator limitante para a produção agrícola.

Este projeto irá trazer melhorias ambientais no aspecto de ampliar o acesso à água e à energia elétrica, que são recursos indispensáveis para o desenvolvimento da sociedade, principalmente em regiões que apresentam situações climáticas desfavoráveis. A tecnologia fotovoltaica tem evoluído e ganhado a confiança de diversos setores, tornando-se, assim, uma alternativa real para a solução de problemas enfrentados pelo meio rural, região que ainda dispõe de baixo índice de atendimento elétrico, geralmente com péssima qualidade no fornecimento da energia elétrica necessária para atender as necessidades básicas de moradia e agricultura. Nesse contexto, surge a aplicação da tecnologia fotovoltaica como alternativa para o acesso à água e à energia elétrica, principalmente em comunidades rurais dispersas. A escolha por utilizar energia fotovoltaica vem se mostrando cada vez mais sólida pelo seu elevado grau de confiabilidade, aliada a uma abundante fonte de energia.

### **1.1 Sistemas de Bombeamento de Água para Irrigação Utilizando Energia Fotovoltaica**

Em muitas regiões do Brasil, populações inteiras vivem com uma grande carência de água, impedindo seu desenvolvimento econômico e prejudicando as condições sanitárias e de salubridade em que elas vivem. Na época de seca, rios e córregos secam, as fontes de água ficam distantes e essas populações têm que percorrer grandes distâncias para buscar água para o próprio consumo, muitas vezes água de baixa qualidade. Frequentemente, essas comunidades estão localizadas sobre reservatórios de água de alta qualidade, situados nos lençóis subterrâneos. A falta de conhecimentos e de recursos financeiros, aliada, muitas vezes, à falta de energia, dificulta seu acesso a essa água.

Diante da dificuldade na obtenção de água, uma forma muito utilizada é a escavação de poços artesianos, que fazem uso de sistemas de bombeamento, mas, muitas vezes, estes sistemas são instalados em regiões remotas, sem acesso à eletricidade, o que se torna um outro obstáculo.

O esquema de uma instalação típica de um sistema de bombeamento de água para irrigação utilizando energia fotovoltaica pode ser visto na Figura 1, havendo outras configurações possíveis de acordo com as características locais e os recursos disponíveis. O sistema proposto neste trabalho é composto basicamente por um conjunto de painéis solares que captam a energia incidente do sol, um conversor de frequência convencional de mercado, utilizado para converter a corrente contínua gerada pelas placas em corrente alternada, uma bomba elétrica de corrente alternada, cuja função é captar a água de uma fonte, um tanque de armazenamento e o sistema de irrigação propriamente dito. Para tal sistema, não é utilizada uma rede externa de alimentação elétrica convencional, já que o sistema proposto tem como única fonte de energia o sol, através da energia fotovoltaica. Logo, trata-se de uma solução off-grid.



**Figura 1** - Configuração de um sistema de bombeamento fotovoltaico para irrigação  
**Fonte:** Adaptado do site Elétrica & Cia (2020).

A Figura 2 ilustra um exemplo de módulos fotovoltaicos utilizados como fonte de energia elétrica para o sistema de bombeamento de água para irrigação de uma pequena horta comunitária.



**Figura 2** – Imagem ilustrativa de alguns módulos fotovoltaicos de um sistema para irrigação  
**Fonte:** Adaptado do site Elétrica & Cia (2020).

Sistemas de bombeamento de água para irrigação estão entre as aplicações mais importantes da energia solar. Tanto a água como a eletricidade são indicadores de saúde e de progresso para as comunidades, principalmente aquelas situadas em locais remotos. É um dos fatores que permitem a fixação do homem no campo, evitando seu deslocamento para as cidades com todos os problemas daí decorrentes. Entre as vantagens da utilização de sistemas de irrigação, podem-se destacar: manutenção da umidade do solo dentro da faixa disponível para as plantas, de forma a atender a demanda evapotranspirométrica das culturas, elevada eficiência de aplicação, adaptação a diferentes tipos de solo e utilização da fertirrigação.

Uma das limitações do uso de sistemas fotovoltaicos está relacionada à dependência da radiação, já que essa geração intermitente de energia se deve ao fato de não haver produção de energia elétrica durante a noite, além do fato de a radiação solar ao longo de um dia ensolarado variar conforme a posição do sol, o clima, a inclinação das placas, a quantidade de nuvens no céu, a temperatura, entre outros fatores. Outra desvantagem está relacionada com o custo inicial de implementação das placas e do conversor, já que o investimento inicial é considerado alto, por exemplo, sistemas de 1.500 Watts não saem por menos de US\$ 3.000. Outra desvantagem é a dificuldade de armazenamento da energia, visto a tecnologia atual das baterias comercializadas no Brasil (estacionárias de níquel cádmio) não ter grande vida útil quando comparada com a do sistema fotovoltaico (7 anos contra 25, aproximadamente), além de serem caras e ainda exigirem manutenções frequentes.

Entretanto, deve-se destacar o casamento perfeito entre a fonte energética, a radiação solar e a necessidade de água, pois regiões mais secas e carentes de água são as mais

favoráveis em termos de insolação. Em épocas de menor radiação solar, a necessidade de água para irrigação, normalmente, é menor. A aplicação de energia solar fotovoltaica (PV) para irrigações ganhou popularidade nos últimos anos em razão da drástica diminuição do preço do painel fotovoltaico (REZA, 2015).

O bombeamento de água utilizando sistema fotovoltaico é um meio para mitigar a crise de energia para a irrigação (GALI, 2016). Khan (2014) concluiu em seu estudo que a utilização de energia fotovoltaica para irrigação pode avançar nos próximos anos em razão de sua viabilidade econômica. Mahmoud (2007) comparou a confiabilidade e a viabilidade econômica de métodos de bombeamento a diesel com sistemas fotovoltaicos e afirmou que os resultados comparativos são muito encorajadores.

Levantamento sobre sistemas de bombeamento instalados em diversas localidades (BARLOW et al., 2015) mostrou opção preferencial por sistemas de corrente alternada com uso de inversor, por se mostrarem mais confiáveis do ponto de vista operacional. Adicionalmente, sistemas de corrente contínua têm limitações no que diz respeito ao tamanho do motor, especialmente seu diâmetro, e sua compatibilidade com as dimensões dos poços de água que, habitualmente, não superam seis polegadas.

Alguns aspectos gerais dos projetos de demonstração do Programa Solar Regional (*Programme Regionale*), iniciado pelo CILSS, Comitê Interestadual de Controle de Secas no Sahel (*Comité Inter-Etats de lutte contre la Sécheresse dans le Sahel*), foram relacionados por A. Hanel et al. (2015). Dez sistemas de bombeamento fotovoltaico, instalados em quatro países do oeste africano, foram monitorados durante o período de um ano, podendo ser verificados, entre outras informações, valores de eficiência compreendidos entre 23,7 e 36,9 %, medidos para o conjunto inversor motobomba, que operava em pequenas, médias e altas potências. A eficiência é medida, neste caso, como a relação entre potência elétrica na saída do arranjo fotovoltaico e a potência hidráulica.

A utilização de um conversor de frequência convencional, acionando uma motobomba centrífuga com motor assíncrono trifásico em 220 V, em sistemas de bombeamento de água, com tecnologia fotovoltaica (ALONSO ABELLA et al., 2018), foi experimentada na prática e apresentou bom desempenho em comparação com sistemas de bombeamento fotovoltaico tradicionais, resultando, dessa forma, na possibilidade concreta de substituí-los em situações reais.

Uma proposta para diminuir a dependência de equipamentos importados destinados ao bombeamento fotovoltaico foi feita por Zilles e Brito (2014). Conversores de frequência normalmente utilizados em aplicações industriais foram utilizados para esta finalidade. Foi feito um levantamento de marcas e modelos disponíveis no mercado nacional que ofereciam possibilidades de operar alimentados por geradores fotovoltaicos, entretanto, não foram mencionados pelos autores as possibilidades de programação desses equipamentos. Em um dos modelos citados, é impossível parametrizar uma parte da etapa de controle do CF para operar adequadamente em um sistema de bombeamento fotovoltaico.

## 1.2 A Energia Fotovoltaica

Alguns conceitos são importantes para poder entender o processo de formação da energia fotovoltaica, entre eles, a irradiação solar, que é a irradiância integrada em um intervalo de tempo especificado, geralmente uma hora ou um dia, e é dada em watt hora por metro quadrado ( $\text{Wh.m}^{-2}$ ). Irradiação solar nada mais é que uma determinada quantidade de radiação solar por unidade de área. Radiação solar é a designação dada à energia radiante emitida pelo Sol, em particular aquela transmitida sob a forma de radiação eletromagnética. Cerca de metade desta energia é emitida como luz visível na parte de frequência mais alta do espectro eletromagnético e o restante na do infravermelho próximo como radiação ultravioleta. A radiação solar fornece anualmente para a atmosfera terrestre  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia. A densidade média do fluxo energético proveniente da radiação solar é de  $1367 \text{ W.m}^{-2}$ , quando medida num plano perpendicular à direção da propagação dos raios solares no topo da atmosfera terrestre (FAHRENBRUCH, 2012).

Embora os efeitos fotoelétricos e fotovoltaicos sejam fenômenos físicos distintos, foi a partir da observação e entendimento do primeiro que foram formadas, juntamente com toda a teoria da física quântica, as bases para a construção dos módulos solares hoje existentes (FAHRENBRUCH, 2012).

A conversão se dá pela absorção da energia dos fótons pelo material semicondutor, gerando pares elétron-lacuna. Em razão da diferença de concentração de portadores minoritários (elétrons no material p e lacunas no material tipo n), ocorre sua difusão em direção à região de depleção. Partes destes portadores são novamente capturados pela estrutura cristalina, através do fenômeno conhecido como recombinação, e o restante que

consegue atingir a região de depleção é acelerado pelo seu campo elétrico, gerando corrente elétrica líquida e, conseqüentemente, potência (ALONSO-ABELLA et al., 2013).

Mandal (2018) afirma que os avanços na tecnologia fotovoltaica (PV) permitiram que muitas aplicações solares fotovoltaicas florescessem na última década. No entanto, em razão da baixa eficiência do painel solar fotovoltaico e das poucas horas de operação ao longo do dia, esta tecnologia ainda está em fase de desenvolvimento. As aplicações *off-grid* fotovoltaicas são comprovadamente valiosas em áreas rurais e remotas de muitos países.

O gerador fotovoltaico consiste em um conjunto de módulos fotovoltaicos que, por sua vez, são compostos de células de material semicondutor (normalmente é utilizado o silício), chamadas células solares. Estas células são responsáveis pela conversão da radiação solar em energia elétrica através do fenômeno físico denominado “efeito fotovoltaico”. Uma célula solar comercial é capaz de proporcionar uma tensão de circuito aberto da ordem de meio volt para células de silício e um valor de corrente elétrica, de curto circuito, entre 1,5 e 4,5 ampères, de acordo com a radiação solar incidente sobre a sua superfície. Em virtude disso, é necessário associá-las em série ou em paralelo para produzirem, respectivamente, tensões ou correntes de intensidades adequadas às aplicações elétricas. Uma vez tendo a configuração desejada, o conjunto é encapsulado com material especial que o protege de possíveis danos externos.

A potência máxima para uma célula de silício de 10 cm<sup>2</sup> é de cerca de 1,25 W, potência demasiado baixa para a maior parte das utilizações domésticas ou industriais. Desta forma, os sistemas fotovoltaicos são feitos pelas associações série e/ou em paralelo de um grande número de células fotovoltaicas (ALONSO-ABELLA et al., 2013).

A associação em série de várias células aumenta a tensão em seus terminais, mantendo a corrente, enquanto a associação em paralelo aumenta a corrente nos terminais da associação, mantendo a tensão (ALONSO-ABELLA et al., 2013).

Numa associação em série, as células são atravessadas pela mesma corrente e a característica resultante deste agrupamento é obtida pela adição das tensões aos terminais das células para um mesmo valor de corrente (ALONSO-ABELLA et al., 2013).

### 1.3 Tipos de Módulos Fotovoltaicos

Os módulos solares podem ser divididos em três categorias, cada uma com suas vantagens e desvantagens. São elas: silício (mono ou poli) cristalino, células de filme-fino e células multi-junção de alta concentração (GREEN, 2000).

Cerca de 80% dos painéis fotovoltaicos no mundo hoje têm por base alguma variação de silício. Em 2015, aproximadamente 85% de todos os sistemas de energia solar fotovoltaica instalados em casas e empresas no mundo utilizavam alguma tecnologia baseada em silício (Si). A tecnologia monocristalina é a mais antiga e tem a mais alta eficiência. Comercialmente, a eficiência dos painéis varia entre 15% e 22%. No caso de células policristalinas, os cristais de silício são fundidos em um bloco, preservando, assim, a formação de múltiplos cristais, com sua eficiência variando entre 14% e 20% (NOGUEIRA, 2015).

Outro aspecto construtivo que tem sido bastante estudado nas últimas décadas é a produção de células fotovoltaicas em superfícies finas e flexíveis. Depositar uma ou várias camadas finas de material fotovoltaico sobre um substrato é a essência básica de como os painéis fotovoltaicos de filme fino são fabricados. Eles também são conhecidos como células fotovoltaicas de película fina (TFPV). Dependendo da tecnologia de célula fotovoltaica de filme fino utilizada, os painéis de filme fino terão eficiências médias entre 7-13% (GREEN, 2000).

Outra tecnologia que tem sido utilizada são as células de alta concentração, cujos módulos usam pequenas pastilhas com várias junções entre diferentes materiais (heterojunção ou multijunção) com o objetivo de aumentar o espectro absorvido da luz solar e o rendimento do módulo. A eficiência deste tipo de módulo fotovoltaico comercialmente produzido pode chegar a 26% sob condições normais de irradiância ( $1.000 \text{ W.m}^{-2}$ ). (GREEN, 2000).

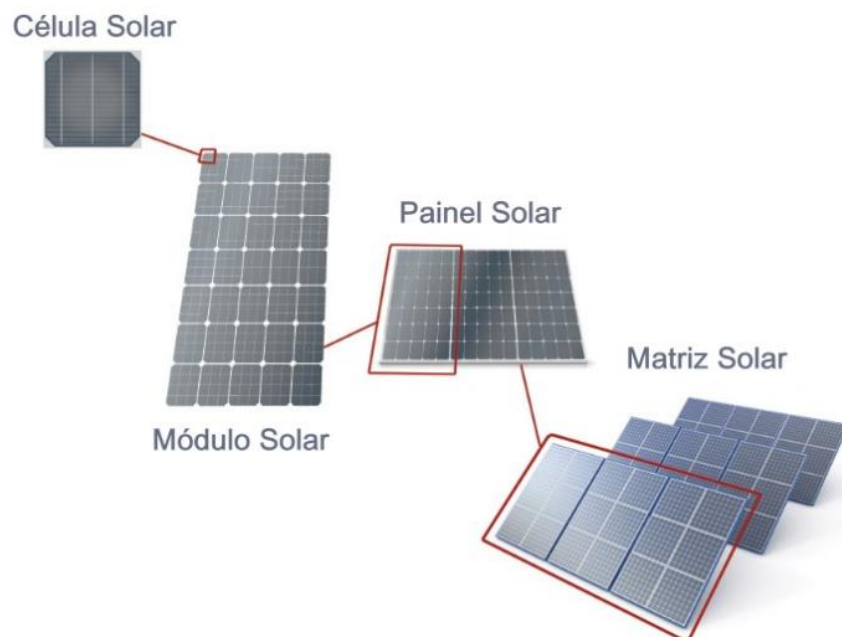
Com relação à forma de arranjo das células e módulos fotovoltaicos, eles podem ser dispostos em arranjos com associações em série ou em paralelo, ou ainda de forma mista, de modo que a corrente e a tensão do gerador estejam corretamente adaptadas às características da motobomba. Na associação em paralelo, são somados os valores de corrente elétrica de cada módulo, enquanto na associação em série, são somados os valores de tensão. A Figura 3 apresenta os dois tipos de módulos fotovoltaicos disponíveis no comércio, além de uma célula típica.



**Figura 3** – (a) Célula monocristalina, (b) Módulo Fotovoltaica monocristalina, (c) Célula policristalina, (d) Módulo fotovoltaica policristalina.

**Fonte:** O autor (2019).

A Figura 4 mostra a diferença entre célula solar, módulo solar, painel solar e matriz solar.



**Figura 4** – Exemplo de célula, módulo, painel e matriz solar.

**Fonte:** Gasparin (2009).

#### 1.4 Efeitos da Radiação e da Temperatura da Célula nos Módulos Fotovoltaicos

O processo de conversão de energia em células fotovoltaicas é tal que, para uma determinada condição de irradiância solar e temperatura do painel, existe um ponto de operação em que a eficiência de conversão é máxima (CORRÊA, 2012).

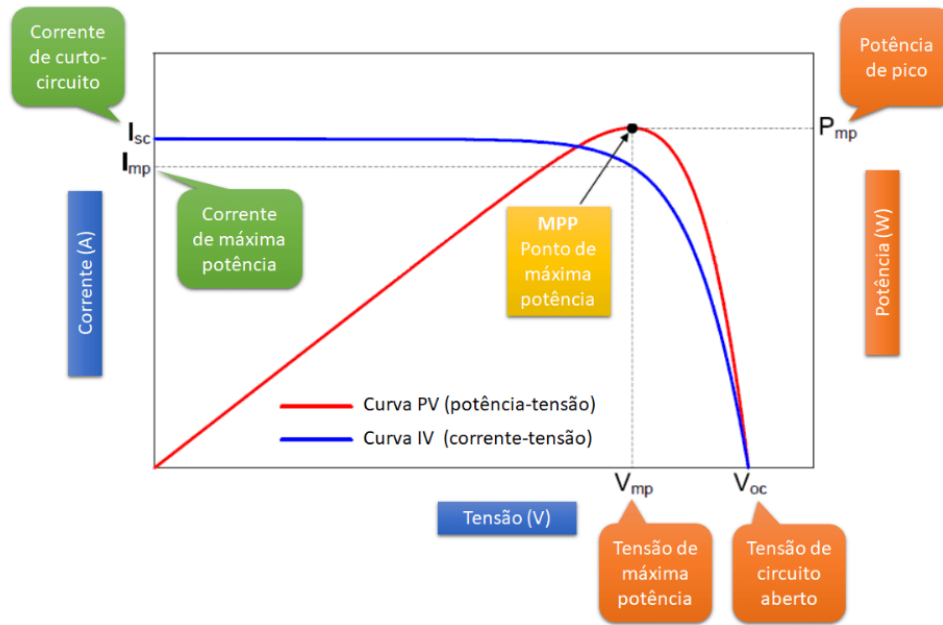


O efeito da variação da irradiância é causado basicamente pela dependência direta do módulo da corrente fotogerada, pois a quantidade de fótons que incide nos painéis varia diretamente com a irradiância, havendo diminuição na geração de pares elétron-lacuna com sua redução. A potência de saída sofre grande redução com diminuição da irradiância. A tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) é afetada indiretamente pelo nível de irradiância, já que nesta condição praticamente toda a corrente fotogerada passa pelo diodo e a tensão nele depende desta corrente. (NOGUEIRA, 2015).

A Figura 5 mostra as características dos módulos fotovoltaicos através das curvas IV e PV em que:

- Curva IV é o gráfico que relaciona a corrente ( $I$ ) com a tensão de saída ( $V$ ) do módulo fotovoltaico;
- Curva PV é o gráfico que relaciona a potência ( $P$ ) com a tensão ( $V$ ) de saída do módulo;
- $I_{sc}$  - Corrente de curto-circuito (*short circuit*), é a máxima corrente elétrica que o módulo pode fornecer;
- $V_{oc}$  - Tensão de circuito aberto (*open circuit*), é a máxima tensão que o módulo pode fornecer;
- $I_{mp}$  - Corrente de máxima potência (*maximum power*), é a corrente que o módulo fornece quando opera no seu ponto de máxima potência;
- $V_{mp}$  - Tensão de máxima potência, é a tensão que o módulo apresenta nos seus terminais quando opera no seu ponto de máxima potência;
- $P_{mp}$  - Potência de máxima potência, o nome é um pouco redundante e quer dizer exatamente isso. Em outras palavras, esta é a potência de pico do módulo fotovoltaico;
- MPP - É o ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico (*maximum power point*), encontrado no joelho da curva IV e no pico da curva PV.

Os valores de  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{mp}$ ,  $V_{mp}$ ,  $P_{mp}$  são especificados nas folhas de dados dos painéis fotovoltaicos para uma irradiância de  $1000 \text{ W.m}^{-2}$  e uma temperatura operacional de 25 graus Celsius (NOGUEIRA, 2015).

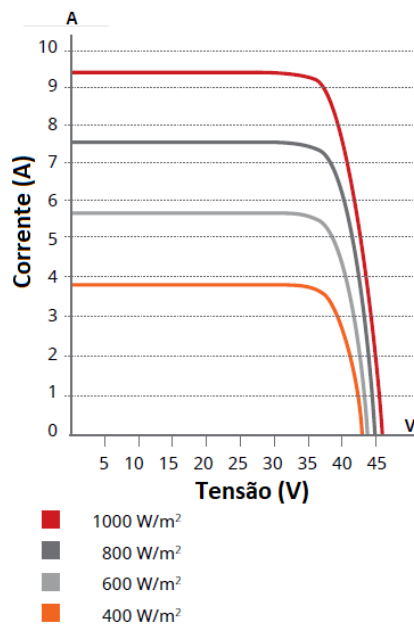


**Figura 5** – Curvas  $I_{sc}$ ,  $I_{mp}$ ,  $V_{oc}$  e  $I_{mp}$  característicos de um módulo fotovoltaico  
**Fonte:** O autor (2019).

Já a variação da temperatura tem efeitos principalmente na corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) e na tensão de circuito aberto. As variações em  $I_{sc}$  se devem principalmente ao termo que relaciona temperatura com a profundidade média de difusão dos portadores minoritários. Além deste efeito, que causa um pequeno aumento em  $I_{sc}$ , há também uma contribuição devida à mudança na energia limite de absorção do material que diminui (NOGUEIRA, 2015).

Um típico módulo fotovoltaico apresenta curvas características de tensão versus corrente, que se diferenciam conforme a intensidade da radiação solar incidente sobre sua superfície, similares às mostradas na Figura 6. Os pontos de máxima potência ( $P_{max}$ ) correspondem aos valores cujos produtos de tensão pela intensidade de corrente elétrica, referentes a cada uma das curvas apresentadas (níveis de radiação incidente iguais a 1000, 800, 600 e 400 ( $W.m^{-2}$ )), apresentam valores máximos. Qualquer receptor elétrico que opere em um desses pontos, ou nas proximidades, receberá do gerador a potência elétrica máxima (correspondente ao nível de radiação incidente). Este valor é conhecido, na prática, por “ponto de operação em potência máxima do gerador”.

Com o aumento da radiação solar na célula, a potência de saída da célula aumenta, a tensão em vazio quase não varia (desprezível), a corrente de curto-circuito varia linearmente e a corrente inversa de saturação varia, conforme pode ser observado na Figura 6.



**Figura 6** – Efeitos da variação da irradiação solar em relação à tensão e à corrente em um módulo de silício cristalino.

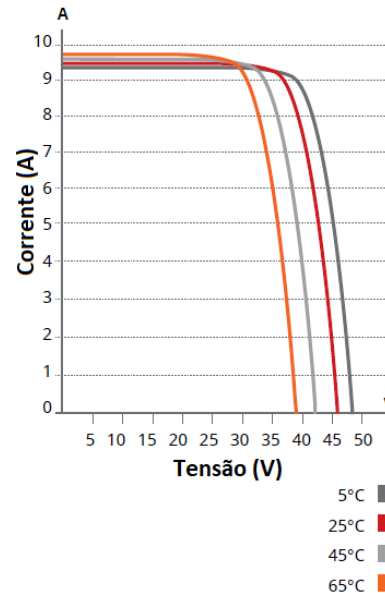
Fonte: O autor (2019).

As curvas características dos módulos fotovoltaicos também sofrem alterações com a variação de temperatura das células. A Figura 7 mostra o efeito da variação da temperatura sobre a curva característica de um típico módulo fotovoltaico. Verifica-se que a tensão de circuito aberto diminui com o aumento da temperatura e a corrente de curto-circuito, ainda que não visível na figura, tem o seu valor aumentado.

Visto que a potência nominal de uma célula fotovoltaica é definida pela multiplicação entre a corrente de curto circuito, a tensão de circuito aberto e o fator de preenchimento e que, conforme observado por Dubey et al. (2013), o aumento de temperatura contribui para a diminuição desses dois últimos fatores em razão da excitação térmica dos elétrons, que afeta as propriedades térmicas do semicondutor, assim, a eficiência do módulo fotovoltaico diminui à medida que a temperatura do módulo aumenta (KUI-QING e SHUIT-TONG, 2011).

Muitos modelos já foram propostos para descrever essa relação (DUBEY et al., 2013). Em geral, considera-se uma temperatura de referência conhecida como Temperatura Nominal de Operação da Célula (NBR 10899, 2013), a partir da qual a eficiência varia com a variação da temperatura. Por exemplo, Fouad et al. (2017) estabelecem que, para um acréscimo de  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a eficiência cai por volta de 1,5%. Radziemska (2003) investigou experimentalmente o efeito da temperatura e encontrou diminuição de cerca de 0,65% de potência de saída e de 0,08% de eficiência de conversão do módulo PV por cada aumento de 1 K na temperatura da célula, ou seja, observa-se uma relação linear entre as duas variáveis.

Com o aumento da temperatura da célula, a potência de saída da célula decresce, a tensão em vazio decresce, a corrente de curto-circuito varia pouco (desprezível) e a corrente inversa de saturação varia. A corrente de curto-circuito praticamente não varia com a temperatura da célula, apresentando uma variação linear com a radiação solar incidente. O efeito da diminuição da tensão de circuito aberto no módulo é apresentado na Figura 7.



**Figura 7** – Efeitos da diminuição da tensão de circuito aberto devidos ao aumento da temperatura em um módulo de silício cristalino  
**Fonte:** O autor (2019).

## 1.5 Motores Elétricos

Existem basicamente dois tipos de motores elétricos: motores de corrente alternada (CA) e motores de corrente contínua (CC). Os motores de corrente alternada podem ser subdivididos basicamente em motores síncronos e assíncronos.

### 1.5.1 Motores de corrente alternada síncronos

Os motores síncronos são motores de velocidade constante, proporcional à frequência da rede. Os polos do rotor seguem o campo girante imposto ao estator pela rede de alimentação monofásica ou trifásica. Sendo assim, a velocidade do motor tende de ser a mesma do campo girante.

O motor síncrono, figura 8, é composto por um enrolamento estatórico trifásico, que produz o que chamamos de campo girante, e de um rotor bobinado (de polos salientes ou de polos lisos), que é excitado por uma tensão CC. E esta tensão CC de excitação gera um campo

estacionário no rotor que, interagindo com o campo girante produzido pelo enrolamento estatórico, produz torque no eixo do motor com uma rotação igual ao próprio campo girante. O maior conjugado que este tipo de motor pode fornecer está limitado pela máxima potência que pode ser cedida antes do sincronismo, ou seja, quando a velocidade do rotor se torna diferente (e maior) da velocidade do campo girante, ocasionando o tombamento do motor. E a excitação determina as porcentagens de potência ativa e reativa que o motor consome da rede, pela carga solicitada. Este tipo de motor tem sua aplicação restrita a acionamentos especiais que dependem de velocidades invariáveis em função da carga (até o limite máximo de torque do motor).

Quando se necessita de uma variação de velocidade com certa precisão de velocidade, ele é utilizado com conversores de frequência. A rotação do eixo do motor (rotação síncrona) é expressa por:

$$N_s = \frac{120 \times f}{p} \quad (1)$$

Em que:

$N_s$  = rotação síncrona (campo) (rpm);

$f$  = frequência (Hz); e

$p$  = números de polos (un.).



**Figura 8** – Motor síncrono

**Fonte:** Weg (2020).

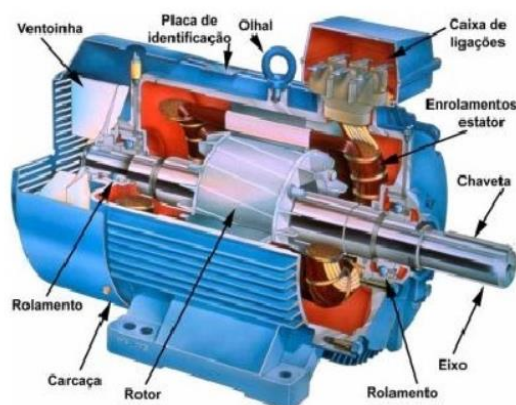
### 1.5.2 Motores de corrente alternada assíncronos

Os motores assíncronos ou de indução, Figura 9, por serem robustos e mais baratos, são os mais utilizados na indústria. Nestes motores, o campo girante tem a velocidade síncrona, como nas máquinas síncronas.

Eles são alimentados por um sistema trifásico, em que as tensões estão defasadas em  $120^\circ$  elétricos. Representam a grande maioria dos motores empregados nas instalações industriais. Estes motores são constituídos de duas partes básicas, Estator e Rotor, e os demais componentes auxiliares. O motor de indução opera normalmente a uma velocidade constante, variando ligeiramente com a aplicação da carga mecânica no eixo.

Teoricamente, este motor girando em vazio e sem perdas, seu rotor teria também uma velocidade síncrona, como nas máquinas síncronas. Porém, ao ser aplicado o conjugado externo ao motor, seu rotor diminuirá a velocidade na justa proporção necessária para que a corrente induzida pela diferença de rotação entre o campo girante (síncrono) e o rotor passe a produzir um conjugado eletromagnético igual e oposto ao conjugado externamente aplicado.

Este tipo de motor tem várias características próprias, que são definidas e demonstradas em várias obras exclusivas deste assunto. Este trabalho final de engenharia elétrica tem como objetivo mostrar os princípios e equações básicas e necessárias para o desenvolvimento do tema voltado à aplicação de conversores de frequência para a variação da velocidade.



**Figura 9** – Principais componentes de um motor assíncrono CA  
**Fonte:** Weg (2020).

O estator é formado por três elementos: carcaça, núcleo de chapas e enrolamentos:

- Carcaça: construída por uma estrutura robusta, fabricada em ferro fundido, com aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e com superfície aletada, que tem como principal função suportar todas as partes fixas e móveis do motor.
- Núcleo de chapas: constituído de chapas magnéticas adequadamente fixadas ao estator.

- Enrolamentos: dimensionados em material condutor isolado, dispostos sobre o núcleo e ligados à rede de energia elétrica de alimentação.

O rotor é formado também por três elementos básicos: eixo, núcleo de chapas, barras e anéis de curto circuito (para o motor de gaiola) ou enrolamentos (para o motor com rotor bobinado):

- Eixo: responsável pela transmissão da potência mecânica gerada pelo motor.
- Núcleo de chapas: constituído de chapas magnéticas adequadamente fixadas sobre o eixo.
- Barra e anéis de curto-circuito (para o motor de gaiola): constituídos de alumínio injetado sob pressão.
- Enrolamentos (para o motor com rotor bobinado): constituídos de material condutor e dispostos sobre o núcleo.

### 1.5.3 Motores assíncronos operando em vazio

Diz-se que um motor está girando “em vazio” quando não tem nenhuma carga mecânica aplicada ao seu eixo, externamente. Destaca-se que essa expressão “externamente” é utilizada visto que todo motor, ao girar, tem que vencer o conjugado resistente interno que se origina do atrito de seu eixo nos mancais e da resistência do ar ao movimento, “perda de atrito e ventilação” (PETRUZELLA, 2013).

Assim, o motor, para girar em vazio, necessita de conjugado motor muito pequeno, permitindo, assim, que se assuma a hipótese puramente teórica de que o conjugado resistente seja nulo e que o motor opere, em vazio, com velocidade síncrona. Aplicando ao estator um sistema de tensões trifásicas simétricas, tal como nos transformadores, ter-se-á a circulação de uma corrente de magnetização  $i_{01}$ , que será responsável pelo aparecimento do campo girante que induzirá nas bobinas do estator f.e.m., dada por:

$$E_1 = 4,44fN_1\phi_{M\dot{a}x}K_E \quad (2)$$

Em que:

$E_1$  = Força eletromotriz do estator (V);

$f$  = Frequência da tensão aplicada ao enrolamento do estator (Hz);

$N_1$  = Números de espiras do enrolamento no estator (un.);

$\phi_{Máx}$  = Fluxo magnético do estator (V.s.); e

$K_e$  = Fator de enrolamento (adimensional).

Acerca do fator  $K_e$ , “fator de enrolamento”, destaca-se que o enrolamento do estator é constituído, por fase, por um conjunto de bobinas em série, e a f.e.m. é dada pela soma das tensões em cada bobina. Estando as bobinas defasadas no espaço, a soma de seus valores eficazes não coincide com o valor eficaz da soma das senoides, compensando o fator de enrolamento tal diferença (PETRUZELLA, 2013).

Segundo Petruzella (2013), considerando seu caráter elementar, omitir-se-á, em tudo quanto se segue, o fator de enrolamento, que será considerado unitário. Considerando a resistência ôhmica dos enrolamentos do estator e ainda que parte do fluxo produzido se concatena somente com as cabeças das bobinas do estator e não se concatena com o rotor, deve-se considerar uma dispersão de fluxo. Em outras palavras, em cada fase considerar-se-á que a tensão aplicada deve ser igual à soma da queda de tensão na impedância do estator com a f.e.m. Isto é:

$$\dot{V}_1 = (R_1 + jX_1)\dot{I}_{01} + \dot{E}_1 \quad (3)$$

Em que:

$\dot{V}_1$  - Fator representativo da tensão de fase aplicada ao estator (V);

$R_1$  - Resistência ôhmica do estator por fase ( $\Omega$ );

$X_1$  - Reatância de dispersão do estator por fase ( $\Omega$ );

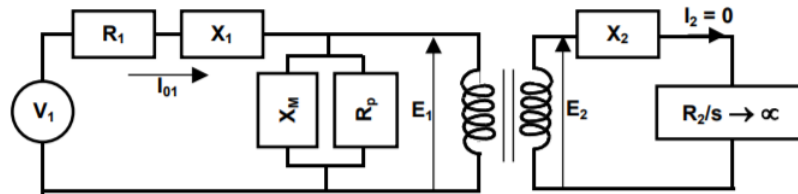
$\dot{I}_1$  – Fator representativo da corrente no estator (A); e

$\dot{E}_1$  – Fator representativo da força eletromotriz do estator (V).

Além disso, observa-se que o núcleo de ferro do estator está submetido a um campo magnético variável, sendo, por consequência, sede de perdas de Foucault e de histerese, “perdas no ferro”. Assim, a corrente  $I_{01}$  contará com duas componentes, uma reativa de



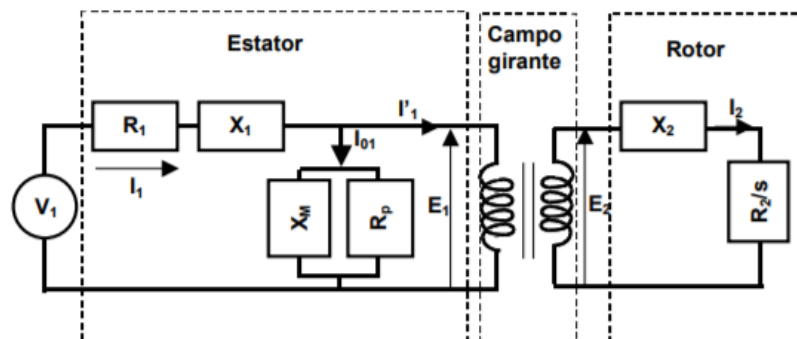
magnetização do núcleo e a outra em quadratura, que leva em conta as perdas no ferro. Na Figura 10 é apresentado o circuito equivalente para o motor operando em vazio (PETRUZELLA, 2013).



**Figura 10** – Circuito equivalente do motor em vazio  
Fonte: Weg (2020).

#### 1.5.4 Motores assíncronos operando em carga

Aplicando carga ao motor, ocorrerá uma diminuição de sua velocidade até que o conjugado motor iguale o resistente, isto é, haverá circulação de uma corrente  $I_2$  no rotor, que criará um campo girante que mantém sua posição inalterada em relação ao campo girante do estator. Nessas condições, como ocorria nos transformadores, surge no entreferro do motor um fluxo desmagnetizante que ocasiona uma redução do fluxo  $\varphi_{Máx}$ . Na Equação 4, observa-se que haverá uma redução em  $E_2$  e, por consequência, para que a Equação 3 seja satisfeita, deverá surgir no estator uma corrente adicional  $I'_1$  que produza um fluxo que anule o fluxo desmagnetizante. A situação atual poderá ser visualizada no circuito equivalente do motor, figura 11, em que a relação entre as f.e.m.  $E_1$  e  $E_2$  é dada pela relação entre o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário (PETRUZELLA, 2013).



**Figura 11** – Circuito equivalente de um motor em carga  
Fonte: Weg (2020).

Sendo  $N_1$  e  $N_2$  o número de espiras dos enrolamentos do estator e do rotor, têm-se as relações a seguir:

$$E_2 = \left( \frac{R_2}{s} + jX_2 \right) I_2 \quad (4)$$

$$E_1 = \left( \frac{N_1}{N_2} E_2 \right) = \frac{N_1}{N_2} \left( \frac{R_2}{s} + jX_2 \right) I_2 \quad (5)$$

$$I_2 = \left( \frac{N_1}{N_2} I_1 \right) \quad (6)$$

Logo:

$$E_1 = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \left( \frac{R_2}{s} + jX_2 \right) I_1 = \left( \frac{K R_2}{s} + jKX_2 \right) I_1 \quad (7)$$

Em que:

$E_1$  = Força eletromotriz do estator (V);

$N_1$  - Números de espiras do enrolamento do estator (un.);

$N_2$  - Números de espiras do enrolamento do rotor (un.);

$R_2$  - Resistência ôhmica do estator por fase ( $\Omega$ );

$s$  = escorregamento (adimensional);

$X_2$  - Reatância de dispersão do rotor por fase ( $\Omega$ );

$I_1$  - Corrente no estator (A); e

$K$  = Fator de enrolamento (adimensional).

A Equação 5 permite a exclusão, no circuito equivalente do motor, do transformador ideal, desde que sejam representadas a reatância e a resistência do rotor por seus valores, multiplicados pelo quadrado da relação de espiras, Figura 12, em que  $K = (N_1/N_2)^2$ ,  $X'_2 = KX_2$  e  $R'_2 = R_2$ .

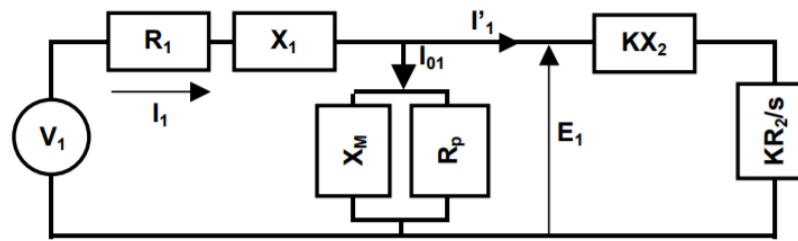


Figura 12– Circuito equivalente de um motor em carga  
Fonte: Weg (2020).

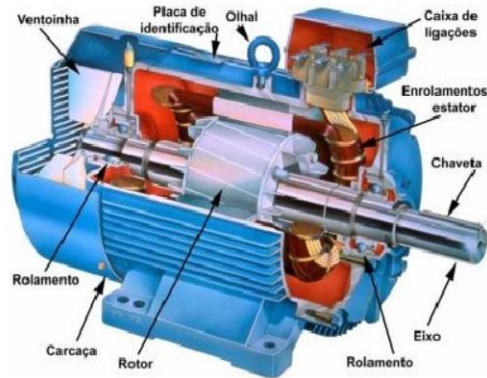
Para alcançar equações simplificadas, desprezam-se a dispersão de fluxo nas cabeças das bobinas,  $X_1 = 0$ , a resistência ôhmica do enrolamento do estator,  $R_1 = 0$ , e o ramo de magnetização,  $I_{01} = 0$ , resultando:

$$I_1 = \frac{1}{K} \frac{V_1}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \quad (8)$$

$$|I_1| = \frac{1}{K} \frac{V_1}{\sqrt{\frac{R_2^2}{s^2} + X_2^2}} \quad (9)$$

### 1.5.5 Motores de corrente alternada assíncrono tipo rotor curto-circuitado

O motor de indução trifásico, rotor curto-circuitado (tipo gaiola de esquilo), no qual o rotor é composto de barras de material condutor que se localizam em volta do conjunto de chapas do rotor, curto-circuitadas por anéis metálicos nas extremidades (Figura 13). São chamados de Gaiola de Esquilo, porque as barras rotóricas têm a característica de serem curto-circuitadas, com semelhança à de um esquilo (PETRUZELLA, 2013).



**Figura 13** – Principais componentes de um motor assíncrono rotor gaiola de esquilo  
**Fonte:** Weg (2020).

O rotor, em nenhuma hipótese, atinge a velocidade do campo rotativo, porque se isto acontecesse, não haveria geração de correntes induzidas e seria eliminado o fenômeno rotórico responsável pelo trabalho mecânico do rotor (PETRUZELLA, 2013).

Quando o motor está girando sem a presença de carga mecânica no eixo, comumente chamado de “motor a vazio”, o rotor desenvolve uma velocidade angular de valor praticamente igual à velocidade síncrona do campo girante do estator. Adicionando carga mecânica ao eixo, o rotor diminui sua velocidade. A diferença existente entre as velocidades síncronas e a do rotor é denominada “escorregamento”, que representa a fração de rotação que o rotor perde a cada rotação do campo rotórico. A rotação do eixo do motor (rotação síncrona) é expressa por:

$$N_s = \frac{(120 \times f)(1 - S)}{p} \quad (10)$$

Em que:

$N_s$  = rotação ou velocidade síncrona (rpm);

$f$  = frequência (Hz);

$p$  = número de polos; e

$S$  = escorregamento.

O escorregamento, em termos percentuais, é dado por:

$$S = \frac{(N_s - N)}{N_s} \times 100[\%] \quad (11)$$

Em que:

$N$ : é a velocidade angular do rotor.

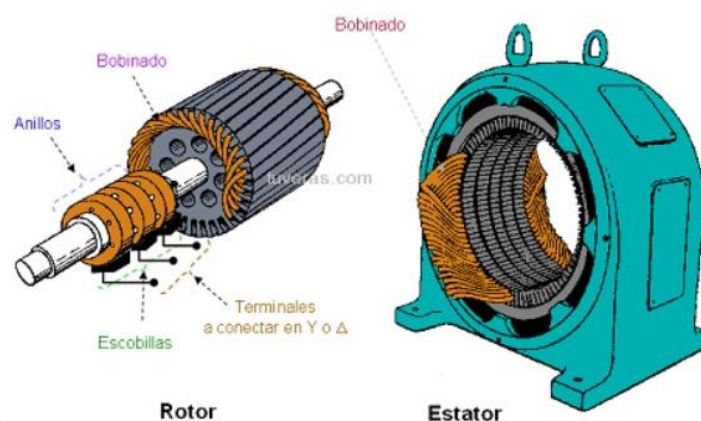
### 1.5.6 Motores de corrente alternada assíncrono tipo rotor bobinado

O motor de indução trifásico do tipo rotor bobinado, Figura 14, é um equipamento em que o rotor é composto por enrolamentos distribuídos em torno do conjunto de chapas do rotor (FILIPPO, 2013).

O motor de anéis tem a mesma característica construtiva do motor de indução com relação ao estator, mas seu rotor é bobinado com um enrolamento trifásico, acessível através de três anéis com escovas coletoras no eixo (FILIPPO, 2013).

Esses terminais conectados eletricamente aos anéis são isolados eletricamente e ligados por meio de escovas condutoras a uma resistência trifásica provida de um cursor rotativo. Assim, as resistências colocadas em série com o circuito de enrolamento do rotor e a quantidade utilizada dependerão do número de estágios de partida adotado, que será dimensionado em função do valor máximo de corrente admissível para acionamento da carga (FILIPPO, 2013).

Esses motores são utilizados nos acionamentos de sistemas de elevada inércia em razão da sua característica do ajuste da curva de conjugado x rotação em função do aumento da resistência rotórica (pela inclusão de resistores externos), e nos casos em que o conjugado resistente em baixas rotações seja alto, comparado ao conjugado nominal (FILIPPO, 2013).



**Figura 14** – Motor assíncrono de rotor de anéis

Fonte: Weg (2020).

Os motores de anéis são particularmente empregados em frenagem elétrica, controlando adequadamente a movimentação de cargas verticais em baixas velocidades. Para isso, usa-se um sistema combinado de frenagem sobressíncrona ou subsíncrona com inversão das fases de alimentação (FILIPPO, 2013).

Exemplo desta aplicação seria o acionamento de guindastes. Na etapa de levantamento, o motor é acionado com a ligação normal, sendo que tanto a força necessária para vencer a carga resistente, quanto a velocidade de levantamento são ajustadas pela inserção ou retirada dos resistores do circuito do rotor. Para o abaixamento da carga, basta inverter duas fases de alimentação, e o motor se comporta como gerador em regime sobressíncrono, fornecendo energia à rede de alimentação e girando no sentido contrário ao funcionamento anterior. Outros exemplos são correias transportadoras e compressores a pistão (FILIPPO, 2013).

### **1.5.7 Motores de corrente contínua**

Estas máquinas operam alimentadas por fonte de energia em corrente contínua. A rede de energia elétrica que supre as residências, as indústrias e o comércio opera em corrente alternada, logo, deve-se contar entre a rede e a máquina com um retificador que converta energia elétrica de corrente alternada em corrente contínua. Hoje em dia, graças ao grande desenvolvimento da eletrônica de potência, tal exigência não é sobremodo restritiva (FILIPPO, 2013).

Estes motores, por apresentarem, entre outras características, grande facilidade no controle de sua velocidade e obtenção de grandes conjugados a baixas rotações, são praticamente insubstituíveis quando se necessita de acionamentos com controle de velocidade ou de grandes conjugados. Assim, são soberanos em várias aplicações específicas tais como tração elétrica (trens, bondes), em siderúrgicas no acionamento de laminadores de lingotes e acionamentos para transporte de cargas mecânicas, pontes rolantes e guindastes. Uma aplicação típica destas máquinas é como motor de partida de veículos acionados por motores térmicos de combustão, em que já se dispõe de uma fonte de corrente contínua, bateria, e se requer alto torque a baixa rotação (FILIPPO, 2013).

Nas máquinas de corrente contínua, o enrolamento fixo é responsável pela criação do campo magnético que irá interagir com a corrente que flui pelo enrolamento do rotor e que irá produzir o conjugado. Assim, os motores de corrente contínua podem ser classificados em função do modo como os dois enrolamentos são supridos, isto é:

- Motores de corrente contínua com excitação independente, quando o enrolamento fixo é excitado por uma fonte independente, permitindo variar a excitação de modo a alcançar as características desejadas;
- Motores de corrente contínua em série, quando o enrolamento do estator é ligado em série com o do rotor;
- Motores de corrente contínua em paralelo, quando os enrolamentos do rotor e do estator são ligados em paralelo; e
- Motores de corrente contínua com enrolamento composto, quando parte do enrolamento do estator está ligado em série com o rotor e parte está ligada em paralelo.

Os motores de corrente contínua, Figura 15, são bastante adequados para uso fotovoltaico em função da sua compatibilidade com o gerador fotovoltaico (que gera energia elétrica em corrente contínua), sendo também mais eficientes do que os motores CA. No entanto, sua curva de carga apenas está bem adaptada às características do gerador fotovoltaico em uma faixa limitada de irradiância, escolhida habitualmente na região dos maiores níveis de radiação solar. Seu custo, porém, é mais elevado, necessitando de manutenção periódica (FILIPPO, 2013).



**Figura 15**– Motor de corrente contínua  
**Fonte:** Transtecno (2020).

Este tipo de motor, de aplicações exclusivas, é muitas vezes fabricado sob encomenda em razão de suas características definidas para o acionamento (FILIPPO, 2013).

O sistema de acionamento por corrente contínua é um sistema largamente utilizado em aplicações, que necessita ter uma ótima precisão de velocidade (até 0.01%), principalmente nas aplicações de sincronismo entre motores. A maioria dos acionamentos CC é realimentada por um tacogerador acoplado ao eixo do motor CC, que fornece informação da velocidade do motor, com o objetivo de melhorar sua regulação de velocidade (FILIPPO, 2013).

Algumas vantagens dos motores de corrente contínua são: ampla faixa de variação de velocidade, baixa relação peso / potência, alta eficiência, baixo nível de ruído, baixo momento de inércia e alta capacidade a cargas dinâmicas.

A rotação do motor de corrente contínua é expressa por:

$$N = \frac{[V_a - (R_a \times I_a)]}{K \Phi_m} \quad (12)$$

Em que:

$V_a$  = tensão de armadura (V);

$I_a$  = corrente de armadura (A);

$R_a$  = Resistência de armadura ( $\Omega$ );

$K$  = constante;

$\Phi_m$  = fluxo magnetizante (Wb); e

$N$  = rotação (rpm).

A comutação do motor de CC pode ser com ou sem escovas (*brushless*), sendo que cada tipo oferece vantagens específicas.

Os motores sem escovas ou *Brushless*, Figura 16a, usam um ímã permanente incorporado ao conjunto do rotor. Eles podem usar um ou mais dispositivos de Efeito Hall para detectar a posição do rotor, e uma eletrônica de acionamento associada a ele controla a rotação do eixo (velocidade). Os motores *Brushless* são similares aos motores CA, mas são comutados eletronicamente (ESM) de modo a poder serem alimentados em CC (FILIPPO, 2013).

A comutação sem escovas (*Brushless*) é mais eficiente, requer menos manutenção, gera menos ruído e tem uma maior densidade de potência e faixa de velocidade em comparação com o motor de comutação escovada. No entanto, a eletrônica dos motores *brushless* geralmente contribui para seu custo de aquisição, tendo também maior complexidade e maiores limitações ambientais (FILIPPO, 2013).

Motores de corrente contínua sem escovas, além de apresentarem maior eficiência do que os motores CA, não necessitam de manutenção periódica na troca de escovas, apresentando maior comodidade e menor custo de manutenção. Entretanto, seu mecanismo eletrônico extra (conversor) faz com que os custos e riscos de falha aumentem (FILIPPO, 2013).



Os motores elétricos escovados, Figura 16b, usam escovas de contato, que se conectam com o comutador para alimentar o rotor. A construção escovada é menos onerosa do que o motor sem escovas e o controle é mais simples e barato. Outra característica é que o escovado pode operar em ambientes extremos pela ausência interna de componentes eletrônicos. Por outro lado, motores escovados exigem manutenção periódica para substituição das escovas desgastadas (FILIPPO, 2013).

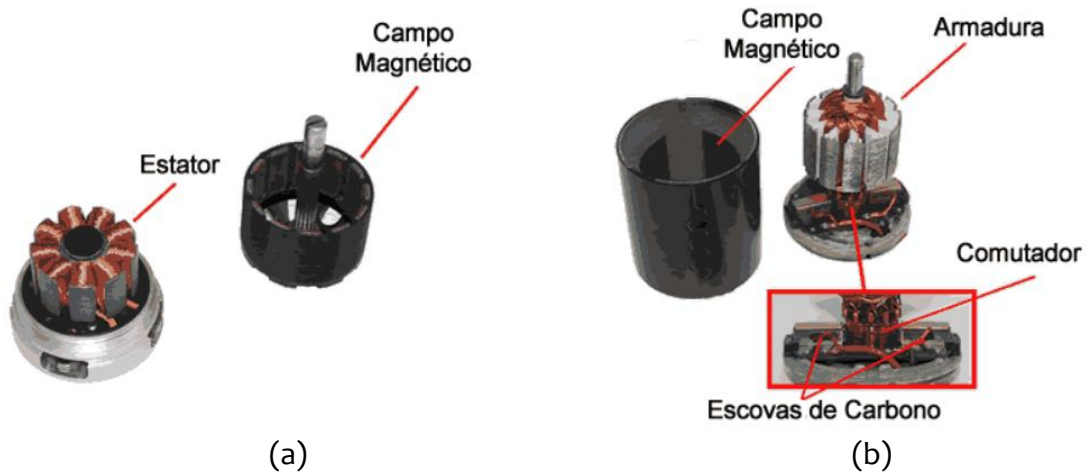


Figura 16 – (a) Motor CC sem escovas; (b) Motor CC com escovas  
Fonte: Fedrizzi (2007).

Existem três fatores principais que você precisa levar em consideração quando for selecionar um Motor CC: a velocidade, o torque e a tensão. Conhecendo estas três especificações, você será capaz de saber qual o motor e o fabricante atenderão suas necessidades (FILIPPO, 2013).

Velocidade do eixo: Um motor CC aplica uma tensão (V) para rodar um eixo a uma velocidade de rotação proporcional ( $\omega$ ). As especificações de velocidade do eixo geralmente se referem à velocidade sem carga, que é a velocidade máxima que o motor pode alcançar quando não há torque aplicado. Tipicamente, a velocidade do eixo é dada em rotações ou rotações por minuto (RPM). Estas rotações ou revoluções também podem ser representadas em radianos por segundo (rad/s), sendo que para cálculos numéricos, o valor em radianos pode ser mais conveniente. A seguinte fórmula descreve a relação entre radianos por segundo e rotações ou rotações por minuto (FILIPPO, 2013).

$$\omega_{\frac{rad}{s}} = \omega_{rpm} \cdot \left(\frac{2\pi}{60}\right) \quad (13)$$

Em que:

$\omega_{\frac{rad}{s}}$  = velocidade de rotação do motor (rad/s);

$\omega_{rpm}$  = velocidade de rotação do motor (rpm);

Para um motor CC ideal (que não tem perdas), a velocidade rotacional é proporcional à tensão fornecida, sendo:

$$\omega = j \cdot V \quad (14)$$

Em que:

$\omega_{rpm}$  = velocidade de rotação do motor (rpm);

$j$  = constante de proporcionalidade [rad/(s.V)]; e

$V$  = Tensão aplicada (V).

Torque de saída: A rotação do eixo gera uma força de rotação chamada torque ( $\tau$ ). O torque é dado em unidades de força-distância (N.m), podendo ser de dois tipos: torque de partida ou torque contínuo. O torque de partida é o  $\tau$  no qual a velocidade do eixo é zero ou o motor está parado. Já o torque contínuo é o máximo  $\tau$  em condições normais de funcionamento. Observe abaixo pela fórmula que o torque ( $\tau$ ) de um motor CC é proporcional à corrente de indução ( $I$ ), sendo que, neste caso, temos a constante de torque ( $k$ ). A seguinte equação descreve as relações entre torque e corrente.

$$\tau = k \cdot I \quad (15)$$

$$I = \tau / k \quad (16)$$

A importância da constante de torque é evidenciada na equação acima. Para um dado torque, um valor alto de  $k$  limita a corrente a um valor baixo. Esta é uma medida de eficiência, uma vez que menor consumo de corrente significa menor dissipação de energia (calor). Conhecendo a constante de torque e o torque produzido, podemos calcular a corrente pela armadura, que é utilizada para sabermos a classificação de temperatura, como será mostrado

mais adiante. Como o torque é proporcional à velocidade, podemos traçar um gráfico de torque x velocidade (Figura 17).

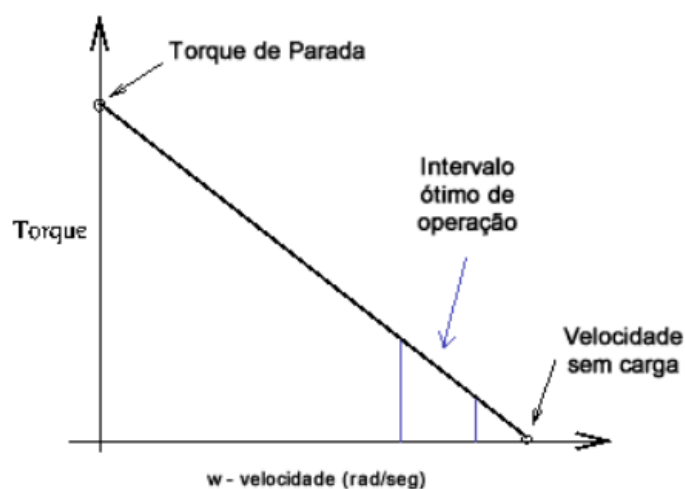


Figura 17– (a) Torque x Velocidade de um motor CC  
Fonte: Fedrizzi (2007).

**Tensão disponível:** Os motores de corrente contínua podem ser projetados para operar a uma tensão específica, caso haja necessidade. No entanto, sempre devemos observar a disponibilidade de fonte de alimentação adequada para cada aplicação. As fontes de alimentação mais comuns no mercado são 12Vcc e 24Vcc, mas é comum conversores que realizam a retificação de tensões em 110V e 220V a fim de fornecer qualquer nível de tensão necessário para sua aplicação. A velocidade depende da tensão, a alimentação poderá ser um limitante caso não for feita uma especificação adequada do motor CC (FILIPPO, 2013).

## 1.6 Bombas Hidráulicas de Aplicação Fotovoltaica

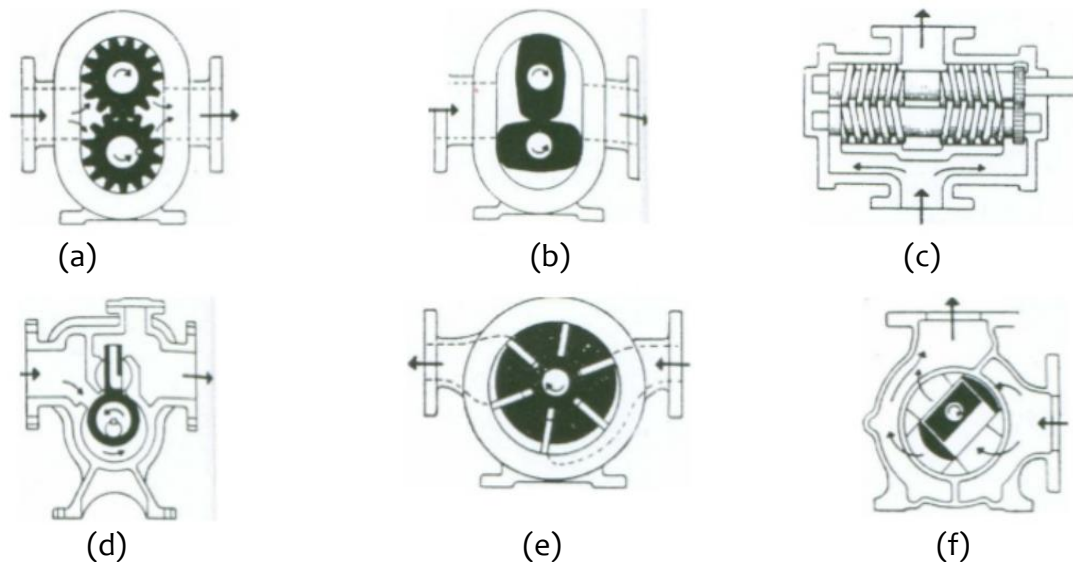
Meiqin (2008) afirmou que a quantidade de placas fotovoltaicas e as características da bomba devem ser otimizados segundo a distribuição da insolação e as características do sistema para que o custo do volume de água possa ser minimizado.

O universo das bombas hidráulicas pode ser dividido em dois subgrupos: bombas cinéticas (centrífugas) e bombas de deslocamento positivo. A principal diferença entre as bombas de deslocamento positivo e as bombas centrífugas está no percurso do fluido no interior da bomba.

### 1.6.1 Bombas de Deslocamento Positivo

Bombas de deslocamento positivo são um termo genérico para caracterizar bombas em que o fluido na entrada do sistema tem aproximadamente a mesma direção no seu ponto de saída. As bombas de deslocamento positivo podem ser de vários tipos: helicoidal, diafragma e pistão. Em decorrência do elevado torque resistente exercido no motor por esses tipos de bombas, elas requerem maior potência de partida do motor, implicando um gerador fotovoltaico de maior dimensão. Elas têm uma ou mais câmaras, em cujo interior o movimento de um órgão propulsor comunica energia de pressão ao líquido, provocando seu escoamento (MELQIN, 2008).

As Figuras 18 e 19 mostram alguns exemplos de bombas de deslocamento positivo.



**Figura 18** – Tipos de bombas de deslocamento positivo: (a) engrenagem, (b) rolos, (c) helicoidal, (d) excêntrico, (e) palhetas, (f) pistão giratório

**Fonte:** Schneider (2020).



**Figura 19** – Imagem real de uma bomba de deslocamento positivo

**Fonte:** Imbil (2014).

### 1.6.2 Bombas Centrífugas

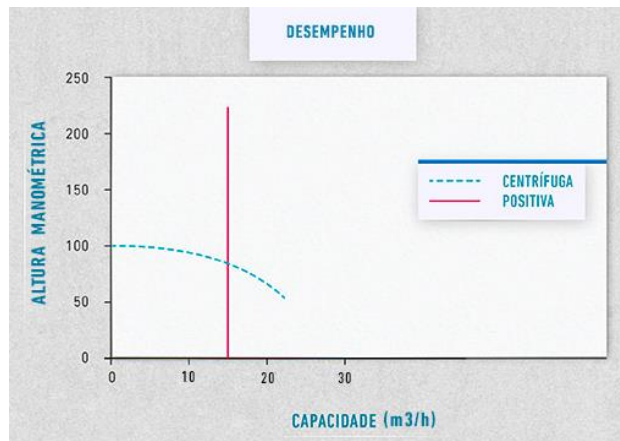
As bombas centrífugas, conforme mostrado na Figura 20, pertencem ao grupo de bombas cinéticas. Têm um dispositivo rotatório (rotor) que exerce força sobre o líquido a ser bombeado. A ação centrífuga resultante do movimento circular do rotor cria uma zona de maior pressão na sua periferia e, como consequência, ocorre uma zona de baixa pressão na sua parte central (entrada do fluido), produzindo deslocamento do líquido em direção à saída dos canais do rotor. As bombas centrífugas têm um dispositivo rotatório dotado de pás, chamado rotor, o qual transfere movimento de rotação para a massa de água contida na carcaça; desta forma, a água é forçada para fora da carcaça através das aberturas de saída em decorrência da força centrífuga. O vácuo criado, em consequência, possibilita à pressão atmosférica forçar mais água para dentro da carcaça através da abertura de entrada. Esse processo continua enquanto perdurar o movimento do rotor e enquanto for possível a alimentação de água. Essas bombas podem conter diferentes números de estágios, os quais são empilhados sequencialmente para obter aumento de pressão, ou seja, quanto maior o número de estágios maior a altura manométrica de operação dessas bombas.



**Figura 20**– Imagem de uma bomba centrífuga  
**Fonte:** Schneider (2020).

## 1.7 Seleção do tipo de bomba em aplicações fotovoltaicas

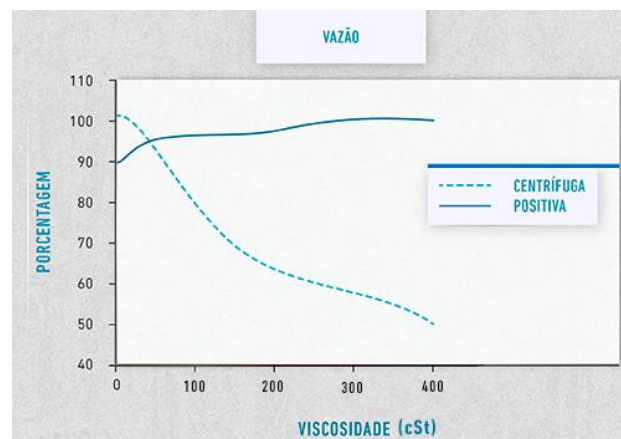
Neste projeto de pesquisa, considerando que a altura manométrica é de apenas 1 metro, devido à disposição do protótipo adotado, assim foi escolhida uma bomba do tipo centrífuga. Este modelo de bomba é mais indicado para grandes vazões e menores alturas manométricas, já que, conforme pode ser visto na Figura 21, para alturas manométricas elevadas, o gráfico mostra um viés de queda no desempenho. A Figura 7 também mostra que as bombas centrífugas têm sensível variação de fluxo dependendo da coluna de pressão na saída da bomba, ao passo que a bomba de deslocamento positivo mantém basicamente a mesma vazão independentemente da pressão.



**Figura 21**– Comparação entre bomba centrífuga e bomba de deslocamento positivo em relação à vazão e à altura manométrica

**Fonte:** Fedrizzi (2007).

Pela análise da Figura 22, nota-se uma clara diferença nos dois tipos de bombas, as bombas centrífugas perdem vazão na medida em que a viscosidade do produto aumenta, ao passo que as bombas de deslocamento positivo aumentam o seu fluxo. Este foi um outro motivo para a escolha da bomba centrífuga, pois foi utilizada neste projeto de pesquisa a água como fluido, sendo ela possuidora de uma baixa viscosidade.



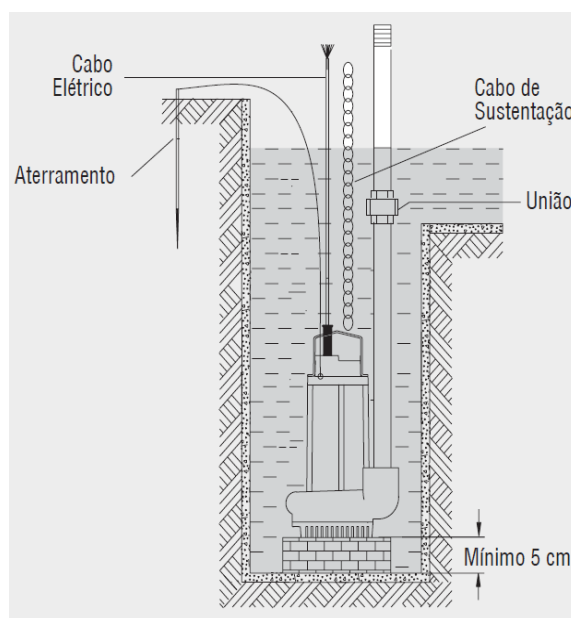
**Figura 22** – Comparação entre bomba centrífuga e bomba de deslocamento positivo em relação à vazão e à altura manométrica

**Fonte:** Fedrizzi (2007).

Em resumo, utiliza-se uma bomba centrífuga para produtos pouco viscosos e serviços com baixas pressões de descarga (transferência). Para vencer maiores alturas manométricas, utilizam-se bombas centrífugas multiestágios. As bombas de deslocamento positivo são usadas para produtos de médias a altas viscosidades, serviços de recalque com baixa vazão e alta

pressão, serviços nos quais é necessário um fluxo constante independentemente de variações de pressão e viscosidade e serviços de pressurização, recalque e atomização.

A Figura 23 mostra um exemplo de instalação de uma bomba centrífuga, que foi o tipo escolhido de bomba para este projeto de pesquisa.



**Figura 23** – Exemplo de instalação de bomba centrífuga submersível

**Fonte:** Schneider (2018).

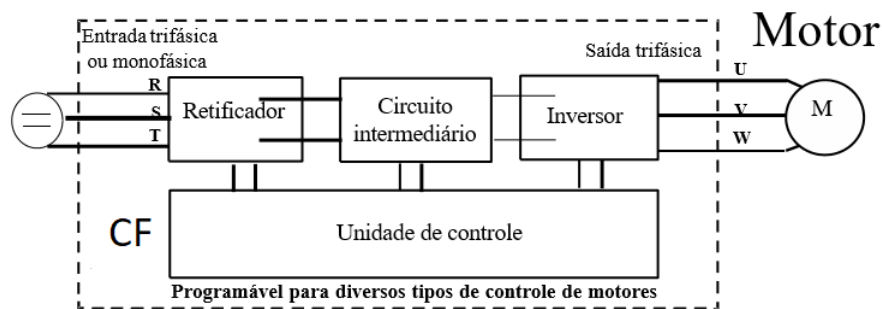
### 1.8 Conversores de Frequência

Conversores de frequência são equipamentos empregados para acionamento de motores com velocidade constante ou variável, a maioria deles, em aplicações industriais. Eles são fabricados para operar com tensão de alimentação alternada, de valor eficaz constante, da rede elétrica local. Há duas técnicas possíveis utilizadas por esses dispositivos para controle da velocidade de rotação de um motor: controle escalar e controle vetorial.

No controle escalar, os valores da tensão ( $V$ ) e frequência ( $f$ ), que são entregues ao motor, devem satisfazer a condição de manter a relação ( $V/f$ ) constante (nas aplicações que requerem torque constante), ou variá-la de forma controlada nas aplicações de torque variável (motobombas centrífugas, por exemplo). Este sistema é eficaz para o controle de frequências normalmente acima de 10 Hz pelo fato de se poder desprezar o efeito das perdas causadas pela resistência elétrica do enrolamento do estator. No controle de velocidade vetorial, a corrente do motor é decomposta em componentes responsáveis pelo torque e fluxo de magnetização do motor, sendo controladas de forma independente. É possível, dessa forma, um controle mais preciso em baixas rotações quando comparado ao método escalar.

Os conversores de frequência podem ser subdivididos internamente, de forma geral, em quatro etapas: retificadora; circuito intermediário, também referido na literatura por “link DC”; etapa inversora; e unidade de controle (Figura 24).

Em situações convencionais de operação, o CF receberá em sua etapa retificadora a tensão alternada da rede e a converterá em contínua (com módulo variável), filtrada na sequência pelo circuito intermediário, por ação de capacitores, assumindo, dessa forma, um valor constante.



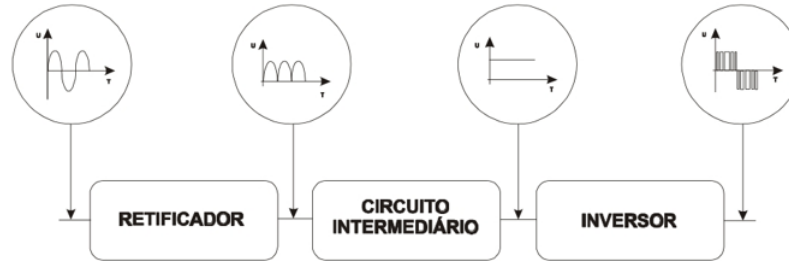
**Figura 24** – Diagrama de blocos de um conversor de frequência

**Fonte:** O autor (2019).

Na forma de aplicação abordada neste trabalho, o CF acionará, com controle de velocidade vetorial, uma motobomba centrífuga, e será alimentado por um gerador elétrico do tipo fotovoltaico, que fornecerá, ao dispositivo de carga, valores de tensão e de corrente elétrica de natureza contínua, tornando, dessa forma, completamente desnecessária a etapa retificadora do conversor. Este inversor de frequência não está preparado para ser alimentado diretamente por corrente contínua, pois ele veio de fábrica preparado para receber apenas corrente alternada, dessa forma, será desenvolvida a pesquisa de modo a poder apontar quais os limites operacionais de um inversor CA sendo alimentado por corrente CC. A tensão elétrica, de valor constante, deverá ser entregue à etapa inversora, que a converterá novamente em alternada na saída do conversor, com características elétricas diferentes da tensão de entrada na etapa retificadora (Figura 25). Poderá apresentar amplitude e frequência variáveis. A tensão de saída, por sua vez, será fornecida sob a forma de pulsos de largura variável, obtida por um processo conhecido na prática por “modulação por largura de pulsos” ou ainda pela sigla em língua inglesa “PWM”. Todo este processo é gerenciado por uma unidade de controle que atuará principalmente sobre a etapa inversora conforme pré-programação feita pelo usuário,



através de uma modalidade de interação homem-máquina, de forma a obter o acionamento adequado do motor de indução à sua aplicação.



**Figura 25** – Diagrama de blocos de um conversor de frequência

**Fonte:** O autor (2019).

Conforme vimos na equação 7, a velocidade de rotação de um motor CA depende da frequência da rede de alimentação. Quanto maior a frequência, maior a rotação e vice-versa. Assumindo que o número de polos de um motor CA seja fixo (determinado na sua construção), ao variarmos a frequência de alimentação, variamos, na mesma proporção, sua velocidade de rotação.

A função do inversor de frequência, entretanto, não é apenas controlar a velocidade de um motor CA. Ele precisa manter o torque (conjugado) constante para não provocar alterações na rotação quando o motor estiver com carga. Para que esse torque realmente fique constante, por sua vez, o inversor deve manter a razão  $V/f$  constante. Isto é, caso haja mudança de frequência, ele deve mudar (na mesma proporção) a tensão. O valor de  $V/f$  pode ser programado (parametrizado) em um inversor e dependerá da aplicação.

Quando o inversor necessita de um grande torque, mas não atinge velocidade muito alta, atribuímos a ele o maior  $V/f$  que o equipamento puder fornecer, desse modo, ele terá um melhor rendimento em baixas velocidades e alto torque. Já no caso em que o inversor deva operar com altas rotações e com torques não tão altos, parametrizamos um  $V/f$  menor e encontraremos o melhor rendimento para essa outra situação.

O inversor altera a tensão  $V$ , oriunda do barramento DC, pela modulação por largura de pulso (PWM). A unidade lógica, além de distribuir os pulsos aos IGBTs do modo já estudado, também controla o tempo em que cada IGBT permanece ligado (ciclo de trabalho).

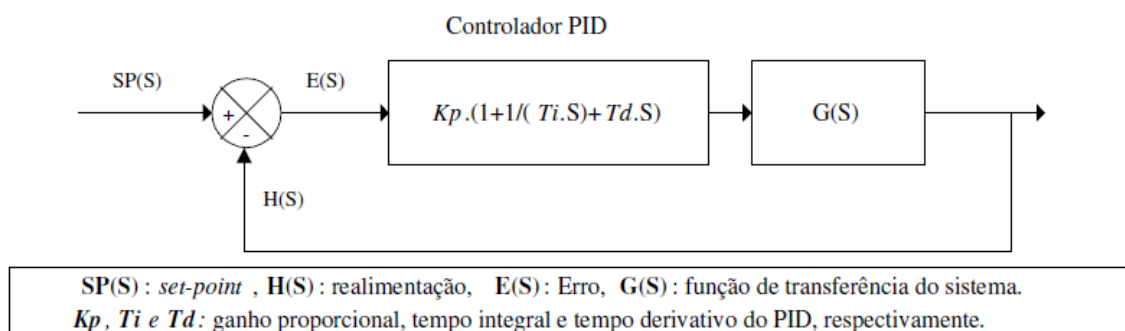
Quando  $V$  tem que aumentar, os pulsos são “alargados” (maior tempo em ON), quando  $V$  tem que diminuir, os pulsos são “estritados”. Dessa forma, a tensão eficaz entregue ao motor poderá ser controlada.

A frequência de PWM também pode ser parametrizada e geralmente encontra-se entre 2,5 kHz e 16 kHz. Na medida do possível, deve-se deixá-la próxima do limite inferior, pois assim diminuimos as interferências eletromagnéticas geradas pelo sistema (EMI).

### 1.9 Parametrização do Inversor de Frequência

Apresentar um processo de parametrização que sirva para todos os CF não é possível, pois o endereço dos parâmetros e sua lógica de programação mudam de fabricante para fabricante, assim como para uma nova versão do mesmo produto. Dada esta especificidade, é apresentado aqui apenas o procedimento lógico de como deve ser parametrizado cada CF, pois estando isto assimilado, o técnico, dispondo do manual de operação do produto, será capaz de fazer sua parametrização.

O procedimento consiste em fazer o CF operar em malha fechada, Figura 26, ou seja, ter um *set-point* programado pelo usuário, receber um sinal de realimentação do sensor de medição da variável do processo e ter um sistema de controle de modo a manter a variável do processo no valor desejado. Este controle é feito pelo controlador PID, que deve estar habilitado por um dos parâmetros do CF. O PID atua sobre o erro do sistema (diferença entre os sinais de *set-point* e realimentação), de forma a mantê-lo próximo de zero, o que se efetiva indiretamente pela variação da frequência de operação do CF.



**Figura 26** – Diagrama de blocos em malha fechada  
**Fonte:** O autor (2020).

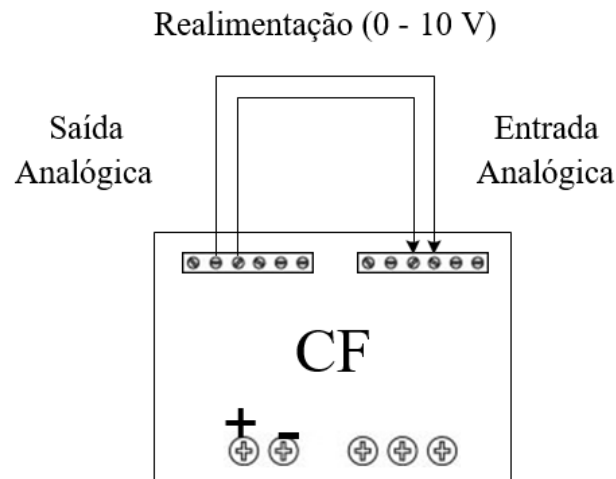
Para esta aplicação, a variável de processo a ser controlada deve ser a tensão do barramento CC, que, por sua vez, é a mesma tensão de alimentação do CF. Esta variável foi escolhida porque o CF é programado para fornecer à motobomba sua frequência nominal de operação. Ou seja, se a potência que o gerador fotovoltaico estiver entregando não for suficiente para a motobomba operar nessa frequência, isto ocasionará uma queda de tensão no barramento CC, que resultará no desarme do equipamento por erro de subtensão.

No entanto, tendo a tensão do barramento CC como variável de processo, este fato não acontece, pois à medida que o CF for aumentando sua frequência de operação, que, por sua vez, ocasiona diminuição da tensão do barramento CC, o controlador PID atua reduzindo a frequência de operação do CF sempre que a tensão no barramento CC ficar abaixo do valor de set-point especificado. Porém, para que o PID atue desta forma, o parâmetro referente à sua ação de controle deve ser selecionado para a opção reverso.

Os valores dos sinais de set-point e realimentação são fornecidos para o CF em forma de percentagem (%) da variável de controle. Assim sendo, se a faixa de valores escolhida para esses sinais for de 0 a 100 %, o % corresponderá a uma tensão de 0V e 100%, à máxima tensão programada no CF, permitida para o barramento CC. Para a aplicação em estudo, esse deve ser um valor maior que a tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico ( $V_{oc}$ ). Em geral, recomenda-se um valor em torno de  $1,25V_{oc}$  nas condições de teste padrão (STC) (ALONSO-ABELLA et al., 2003).

Diferentemente do sinal de set-point, onde existe um parâmetro para selecionar o seu valor, o sinal de realimentação é proveniente de um sensor que monitora o comportamento do sistema, o qual fornece um sinal analógico de tensão entre 0 a 10 V em CC, que, para o CF, equivale à faixa de 0 a 100%. Este sinal de realimentação deve ser conectado a uma das entradas analógicas do CF, que deverá estar habilitado para receber esse nível de tensão.

Contudo, em alguns CF, este sinal de realimentação pode ser obtido diretamente de uma de suas saídas analógicas, assim como indicado na Figura 27, a qual deve ser programada para fornecer o referido nível de tensão (0 a 10 V em CC), sendo este proporcional à tensão do barramento CC.



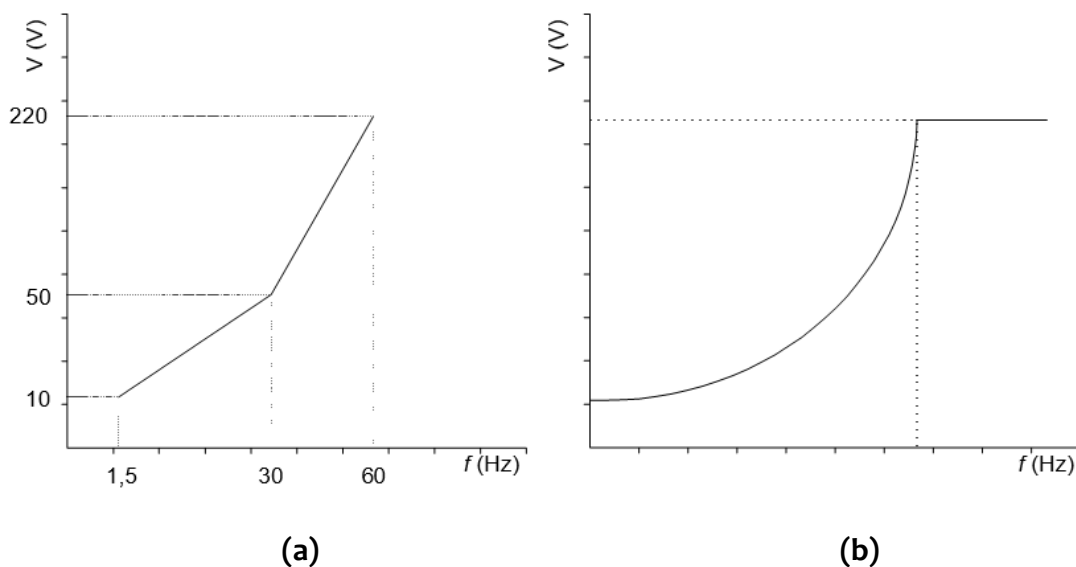
**Figura 27** – Sinal de realimentação obtido diretamente da saída analógica do CF  
**Fonte:** O autor (2020).

A próxima etapa consiste em selecionar a opção de controle vetorial, que é própria para aplicações com bombas centrífugas. Em seguida, devem ser ajustados os tempos da rampa de aceleração e desaceleração no menor valor possível (0,1 s, por exemplo).

A tecnologia do inversor com controle vetorial, por outro lado, é uma solução mais abrangente para o controle de velocidade e torque de motor indução trifásico. Resposta dinâmica rápida, precisão de velocidade e possibilidade de torque elevado para mínimas rotações são algumas das características desta estratégia (OLIVEIRA, MORAIS & PIRES, 2012). Tais características do controle vetorial deixam essa tecnologia muito mais atraente em algumas aplicações. Dessa forma, o controle vetorial apresenta-se mais preciso para uma ampla variação de velocidade e de cargas no eixo (QUEIROZ, 2008).

Para este projeto de pesquisa, foi adotado o controle vetorial, pois este tipo de controle proporciona melhor precisão na regulação de velocidade, visto que em baixas velocidades a operação do torque é linear, suave e com menor oscilação, elevada performance dinâmica, em baixa velocidade, a operação do torque é suave e não oscila. A ideia central de um inversor vetorial é promover o desacoplamento entre o controle do fluxo e o controle da velocidade por meio de transformações de variáveis. Com esta técnica de controle, os inversores podem ser empregados em tarefas complexas que exijam grande precisão e dinâmicas rápidas do ponto de vista de controle. Enfim, a principal diferença entre os inversores escalares e os vetoriais deve-se à capacidade de os inversores vetoriais imporem torque necessário ao motor de forma precisa e rápida, permitindo uma elevada velocidade de resposta dinâmica a variações bruscas de carga.

Na Figura 28a, pode-se notar que o inversor do tipo escalar apresenta uma resposta dinâmica bem mais lenta, demorando mais para reagir a qualquer alteração de velocidade ocorrida ou solicitada. A Figura 28b mostra o comportamento da tensão e da frequência do inversor do tipo vetorial. Este tipo de inversor é complexo e tem algoritmos no software de controle que alteram a tensão e a frequência de modo que o torque se ajuste de acordo com a necessidade, ou seja, ele impõe o torque necessário ao motor de forma precisa e rápida, permitindo elevada velocidade de resposta dinâmica a variações bruscas de carga.



**Figura 28** – (a) Curva característica do controle escalar do CF; (b) Curva característica do controle vetorial do CF

**Fonte:** O autor (2020).

A parametrização é finalizada com a sintonia do controlador PID. Esta sintonia se refere aos valores que devem ser atribuídos a cada um de seus parâmetros. Nesta etapa, é importante a correta escolha da sintonia, que permite que o sistema opere estável e no valor de *set-point* especificado.

A ação PID tem como principal característica a existência de um erro residual permanente sempre que ocorrer uma alteração de carga. O erro estacionário é dependente do ganho proporcional ( $K_p$ ) e da carga, podendo ser minimizado com o aumento de  $K_p$ . Neste tipo de controlador, o modo integral é usado para eliminar o erro estacionário causado por grandes variações de carga. O modo derivativo, com o seu efeito estabilizador, permite um aumento do ganho e reduz a tendência para as oscilações.

## 2. Considerações Finais

A continuidade da vida na terra depende, entre outros elementos básicos, da disponibilidade de água potável. Em extensas regiões da superfície terrestre, habitadas por importantes contingentes populacionais, este recurso é escasso ou de difícil acesso, seja devido ao fato de se encontrar afastado dos locais onde residem as comunidades ou por se apresentar em forma de água subterrânea. No Nordeste do Brasil, os habitantes de pequenas vilas rurais ainda hoje fazem uso do esforço humano ou animal para extrair e transportar água de sua fonte até os locais de utilização.

As bombas manuais são uma das opções mais utilizadas no abastecimento de água, especialmente para o consumo humano. Motores de combustão interna a diesel também são bastante utilizados para acionar sistemas de bombeamento. Quando se trata de pequenas comunidades, a potência dos sistemas diesel, ainda os de menor porte, resulta demasiado elevada para atender a demanda, devendo funcionar a nível parcial de potência e, por conseguinte, de forma pouco eficiente. Por outro lado, as exigências de uma adequada manutenção dos sistemas diesel, em termos de custos e frequência de atendimento, fazem com que esses sistemas se encontrem, muitas vezes, além das possibilidades dessas comunidades (FRAIDENRAICH e VILELA, 2016). Avanços importantes têm sido experimentados pelos sistemas de bombeamento fotovoltaico nas últimas décadas, tanto no que diz respeito às potências e ao rendimento dos motores e bombas quanto aos dispositivos eletrônicos de controle (FRAIDENRAICH e VILELA, 2016).

Apesar de ainda pouco difundidos, os sistemas de bombeamento fotovoltaico apresentam muitas vantagens sobre os sistemas convencionais. O fato de ser um equipamento modular, com módulos de potência bastante reduzida, por exemplo, 50 Wp, permite adequar melhor a demanda de água local ao porte do equipamento. Assim, uma apreciável fração dos sistemas de bombeamento fotovoltaico instalados no mundo têm se concentrado no intervalo de potências de 500 a 1500 Wp, no qual apresentam maior competitividade (BARLOW, 2016).

Os sistemas utilizados com maior frequência estão integrados por um arranjo fotovoltaico, conversor e uma motobomba. Habitualmente, ainda que não exclusivamente, são utilizadas bombas centrífugas.

Devido ao seu desenvolvimento ainda recente, existem poucos fabricantes de sistemas de bombeamento com tecnologia fotovoltaica, a variedade de produtos é pequena e os equipamentos mencionados não contam com ampla difusão no mercado. Trata-se de equipamentos especiais, vendidos em forma conjunta como um pacote tecnológico, com a natural consequência de seus preços serem relativamente elevados.

Os argumentos que antecederam mostram que a tecnologia, tal como se apresenta na atualidade, exibe considerável rigidez em termos de opções para os usuários, preços elevados e barreiras na comercialização. É desejável, portanto, tornar esta tecnologia mais versátil e acessível, o que aumentaria sua difusão e, conseqüentemente, reduziria os preços dos equipamentos. No contexto dessa problemática, este estudo vai analisar a possibilidade da substituição dos inversores especiais usados em sistemas de bombeamento fotovoltaico por equipamentos conhecidos no mercado como conversores de frequência. São equipamentos convencionais fabricados em grande escala, diversidade de modelos, larga faixa de potência (0,74 – 45 kW) e com funções que permitem adaptá-los para seu uso em sistemas de bombeamento fotovoltaico. Adicionalmente, sua inserção nos sistemas fotovoltaicos permite utilizar motobombas convencionais, que existem em grande variedade no mercado.

Informações técnicas sobre a utilização de conversores de frequência convencionais em sistemas de bombeamento com tecnologia fotovoltaica são, entretanto, escassas. É desejável, portanto, gerar dados de caráter experimental, sobre o desempenho destes equipamentos, que permitam fazer uma avaliação adequada de suas possibilidades e limitações.

A conclusão, portanto, deste trabalho é a abertura de toda uma gama de possibilidades, a partir da alternativa de substituição dos inversores especiais dos sistemas de bombeamento fotovoltaico por conversores de frequência, instalação de sistemas com potências elevadas, diferentes tipos e fabricantes de bombas, fácil manutenção e reposição de peças.

## 5 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. Indicadores de qualidade. Disponível em: < <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/qualidade-da-agua/indicadores-de-qualidade> >. Acesso em 08 de jun. 2020.

AGnU (2000). Declaração do Milénio. Resolução A/RES/55/2 8 de setembro de 2000. Lisboa: United nations Information Centre.

ALONSO-ABELLA, M. E CHENLO, F., Utilización de convertidores de frecuencia en sistemas de bombeo fotovoltaico. In: Proyecto PIP VI.5. Anais do Seminário sobre bombeio fotovoltaico, Universidade de Tarapacá, Arica, Chile, Programa CYTED, 2018, p. 83-130.

ALONSO-ABELLA, M.; LORENZO E. E CHENLO, F., PV water pumping systems based on standard frequency converters. Progress in photovoltaics, 11: 179-191, 2013.

ALVARENGA, C. A. Bombeamento de água com energia solar fotovoltaica. Belo Horizonte: Solenerg Engenharia, 2019.

ARAÚJO, BM de et al. Aspectos econômicos para o reuso na agricultura na Bacia do Rio Paraíba do Sul e comparação com o modelo da gestão de cobrança em Israel. SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS–PARAÍBA DO SUL, v. 3, p. 206-215, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10899: Energia solar fotovoltaica – Terminologia. 2013. 16 p.

BARLOW R.; MCNELIS B.; DERRICK A., Solar pumping. An introduction and update on the technology, performance, costs and economics. World Bank, Relatório Técnico No.168, 2015.

BARLOW R.; MCNELIS B.; DERRICK A., Status and experience of solar PV pumping in developing countries. In: Proceedings of the 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Lisboa, Portugal, 2016.



BRITO A. U. & ZILLES R., Conversores de frequência, uma solução para diminuir a dependência aos equipamentos importados em aplicações de bombeamento fotovoltaico. In: Anais do IV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Universidade Federal de Itajubá, Minas gerais, 2014.

CAIRNS R.; KRZYWOSZYNSKA A. Anatomy of a buzzword: The emergence of 'the water-energy-food nexus' in UK natural resource debates. *Environmental Science & Policy*, v.64, p.164-70, 2016. [ Links ]

COELHO, E. F. et al. Sistemas e manejo de irrigação de baixo custo para agricultura familiar. Brasília, DF: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2014, 47 p. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/133043/1/Cartilha-Manejo-Irrigacao-03-09-2015.pdf>. Acesso em 10 jun. 2020.HN

COLLARES PEREIRA, M & RABL, A., Simple procedure long term average performance of non concentrating solar collectors. *Solar Energy*, 23: 235-253, 1979.

CORRÊA, Tomás Perpétuo; SELEME JR, Seleme Isaac; SILVA, Selênio Rocha. Efficiency optimization in stand-alone photovoltaic pumping system. *Renewable Energy*, v. 41, p. 220-226, 2012.

DAS, Madhumita; MANDAL, Ratan. A comparative performance analysis of direct, with battery, supercapacitor, and battery-supercapacitor enabled photovoltaic water pumping systems using centrifugal pump. *Solar Energy*, v. 171, p. 302-309, 2018.

DUBEY, Swapnil; Sarvaiya, Jatin Narotam; Seshadri, Bharath. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review. *Energy Procedia*, v. 33, p. 311-321, 2013. Elsevier BV

FEDRIZZI, M. C. Fornecimento de Água com Sistemas de Bombeamento Fotovoltaicos. São Paulo, 2007. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo.

FEUERMANN, D. e Gordon, J. M. (2001). High-concentration photovoltaic designs based on miniature parabolic dishes. *Solar Energy*, 70(5):423–430.

FILIPPO FILHO, Guilherme; DIAS, Rubens Alves. Comandos Elétricos–Componentes Discretos, Elementos de Manobra e Aplicações. Saraiva Educação SA.

FOUAD, M. M.; SHIHATA, Lamia A.; MORGAN, ElSayed I. An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, p. 1499-1511, 2017.

FRAIDENRAICH N. & COSTA H. S., Procedure for the determination of the maximum surface which can be irrigated by a photovoltaic pumping system. *Solar and wind technology*, 2: 121-126, 2016.

FRAIDENRAICH, N. & VILELA O. C., Avanços em sistemas de abastecimento de água com bombeamento fotovoltaico para comunidades rurais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 4: 69-81, 2016.

FRAIDENRAICH, N. & VILELA O. C., Performance of solar systems with non linear behavior calculated by the utilizability method. Application to PV solar pumps. *Solar Energy*, 69: 131-137, 2017 – a.

FRIEDMAN, Dan. National solar technology roadmap: concentrator PV. EERE Publication and Product Library, Washington, DC (United States), 2007.

GALI, Vijayakumar; AMRUTHA, P. B. Fast dynamic response of SEPIC converter based photovoltaic DC motor drive for water pumping system. In: *Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 2016 International Conference on. IEEE, 2016. p. 1-5.

GASPARIN, Fabiano Perin. Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos. 2009.

GOETZBERGER, Adolf; HOFFMANN, Volker Uwe. Photovoltaic solar energy generation. Springer Science & Business Media, 2005.

GREEN, M. A. Silicon Solar Cells: Advanced Principles and Practice (Bridge Printery, Sydney). Available from author, 1995.

GREEN, Martin A. Silicon solar cells: advanced principles & practice. Centre for photovoltaic devices and systems, University of New South Wales, 1995.

HAHN, A., Technical Maturity and Reliability of Photovoltaic Pumping Systems. In: 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Nice, France, 1995.

HAHN, H. Technical maturity and manual reliability of Photovoltaic pumping systems. In: Proceedings of the 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1995. 1995. p. 1783-1786.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. Física 3. 4ª edição. Rio de Janeiro. Editora LTC, 1996.

HANEL, A. & KABORÉ F., The Performance of PV Pumping Systems in the CILSS – Regional Solar Programme: One Year of Monitoring Results on 10 Systems. In: 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Nice, France, 2015.

HOFF, H. Understanding the Nexus, background paper for the Bonn 2011 Conference. In: The Water, Energy and Food Security Nexus - Solutions for the green Economy. 2011, Stockholm. Background paper: Stockholm: SEI, 2011. p.52.

HOFFMANN, Winfried. PV solar electricity industry: Market growth and perspective. *Solar energy materials and solar cells*, v. 90, n. 18-19, p. 3285-3311, 2006.

HOLLANDS, K. G. T.; & HUGET, R.G., A probability density function for the clearness index with applications. *Solar Energy*, 30: 235-253, 1982.

HOPWOOD, David. PV: where are we now? *Renewable Energy Focus*, v. 8, n. 4, p. 54-59, 2007.

INMET, In. Instituto Nacional de Meteorologia. Available in: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php>, 2020.

KHAN, Md Tareek-Al-Islam et al. The feasibility study of solar irrigation: Economical comparison between diesel and photovoltaic water pumping systems for different crops. In: *Electrical Information and Communication Technology (EICT), 2013 International Conference on*. IEEE, 2014. p. 1-5.

KLEIN, S. A. Calculation of flat-plate collector utilizability. *Solar energy*, v. 21, n. 5, p. 393-402, 1978.

PENG, Kui-Qing; LEE, Shuit-Tong. Silicon nanowires for photovoltaic solar energy conversion. *Advanced Materials*, v. 23, n. 2, p. 198-215, 2011.

KUMAR, Amritesh; VERMA, Vishal. Photovoltaic-grid hybrid power fed pump drive operation for curbing the intermittency in PV power generation with grid side limited power conditioning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 82, p. 409-419, 2016.

LIU, B. Y. H.; & JORDAN, R. C., The long term average performance of flat plate solar heat collectors. *Solar energy*, 7: 53, 1963.

LOURENÇO, T. G. M. et al. SIGEE–Uma Ferramenta Computacional para a Gestão de Medição de Qualidade de Energia Elétrica.

LOXSON, F. & DURANGKAVEROG, P., Estimating the performance of a photovoltaic pumping system. *Solar energy*, 52: 215-219, 1994.

MAHMOUD, M. Experience results and techno-economic feasibility of using photovoltaic generators instead of diesel motors for water pumping from rural desert wells in Jordan. In: *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution*. IET, 2007. p. 391-394.

MARAFÃO, Fernando Pinhabel et al. A influência da referência de tensão na avaliação de indicadores de qualidade de energia. *IEEE Latin America Transactions*, p. 81-88, 2008.

MARIN, P., TAL, S., YERES, J., KLAS, R. *Water Management in Israel*. Banco Mundial, 2017. Disponível em: Acesso em 11 de julho. 2020.

MEIQIN, Mao et al. Research on the performance of induction-motor-based residential photovoltaic water pump system. In: *Electrical and Computer Engineering*, 2008. CCECE 2008. Canadian Conference on. IEEE, 2008. p. 001867-001870.

MONEGÓN; *Engineering Desing handbook for Stand Alone Photovoltaic Systems*, report no. M108 (1980).

NOGUEIRA, Carlos Eduardo Camargo et al. Performance of monocrystalline and polycrystalline solar panels in a water pumping system in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 51, p. 1610-1616, 2015.

OLIVEIRA, A. L., MORAIS, M. S., & PIRES, I. A. (2012). Estudo de Interferências na Alimentação Elétrica de Motores de Indução por Inversores de Frequência. *E-xata, UniBH*, 159-173.

PETRUZELLA, Frank. *Motores Elétricos e Acionamentos: Série Tekne*. Bookman Editora, 2013.

QUEIROZ, F. C. (2008). Controle vetorial de velocidade de um motor de indução trifásico com estimação neural de fluxo. Dissertação, 87. Natal: Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

RADZIEMSKA E. The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. *Renew Energy* 2003; 28(1):1– 12

RECA, J. et al. Feasibility analysis of a standalone direct pumping photovoltaic system for irrigation in Mediterranean greenhouses. *Renewable Energy*, v. 85, p. 1143-1154, 2016.

SIDRA, IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema IBGE de Recuperação Automática. 2014.

SOUSA, Florindo da Cunha Barreiro de et al. Análise operacional de uma microrrede elétrica com produção de energia fotovoltaica. 2010.

TORREIRA, R. P., Manual Básico de Motores Elétricos. Madrid, Paraninfo, 1990.

VILELA, O. C., Caracterização, simulação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água. Recife, 2001. 131p. (Doutorado – Departamento de Energia Nuclear / UFPE).

YASKAWA, Custom Application Software Environment (CASE): Development of Custom Software for the V7 inverter. Brasil, 1ª edição: Yaskawa Electric America, 2000.

ZARMI, Y., Fluctuations in long term performance of solar devices: The single-pass open-loop hot water system example. *Solar energy*. 38: 323-326, 1987.

Artigo 02 - Normas de acordo com a Revista “Energia na Agricultura”)

- ISSN: 2359-6562
- QUALIS: B2
- LINK DA REVISTA: <http://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/index>

## **MOTOR DE INDUÇÃO COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA CONVENCIONAL ACOPLADO A SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA IRRIGAÇÃO**

### **RESUMO**

O uso de sistemas de irrigação movidos a energia solar tem viés dentro da sustentabilidade por permitir o cultivo em regiões com escassez de água e deficitárias quanto ao acesso à energia elétrica, o que o difere dos sistemas tradicionais, já que dispensa a utilização de combustíveis ou energia elétrica, bastando o uso de painéis solares que captam a energia da luz do sol. Este trabalho dedica atenção à realização de ensaios com um inversor de frequência convencional adquirido no comércio local, energizado por geradores fotovoltaicos, que têm a função de acionar bombas centrífugas convencionais para fins de bombeamento de água. O objetivo é avaliar a possibilidade técnica deste acoplamento, avaliando sua viabilidade técnica e seu desempenho para quatro diferentes condições climáticas: ensolarado, parcialmente nublado, nublado e chuvoso. Foram propostas duas estratégias de controle, uma com velocidade fixa e outra com velocidade variável. Houve uma melhora de até 132,7% no volume de água bombeada após a otimização do sistema com a estratégia de velocidade variável. Para tanto, um arranjo experimental equivalente foi desenvolvido para este propósito. Os resultados da pesquisa comprovam que este novo tipo de configuração é confiável e tecnicamente viável.

Palavras-Chave: conversores de frequência, gerador fotovoltaico, bombas elétricas, energia renovável, bombeamento de água.



## **INDUCTION MOTOR WITH CONVENTIONAL FREQUENCY CONVERTER CONNECTED IN OFF-GRID PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR IRRIGATION**

### **ABSTRACT**

The use of irrigation systems powered by solar energy has a bias within sustainability as it allows cultivation in regions with water scarcity and deficits in terms of access to electricity, which differs from traditional systems, since it does not require the use of fuels or electricity, just using solar panels that capture the energy of sunlight. The work pays attention to the performance of tests with a conventional frequency inverter acquired in local stores, powered by photovoltaic generators, which has the function of activating conventional centrifugal pumps for the purpose of pumping water. The objective is to evaluate the technical possibility of this coupling, evaluating its technical viability and its performance for four different climatic conditions: sunny, partially cloudy, cloudy and rainy. Two control strategies have been proposed, one with fixed speed and the other with variable speed. There was an improvement of up to 132.7% in the volume of water pumped after the optimization of the system with the variable speed strategy. For this, an equivalent experimental arrangement was developed for this purpose. The research results prove that this new type of configuration is reliable and technically feasible.

Keywords: frequency converters, photovoltaic generator, electric pumps, renewable energy, pumping water.

## 1 INTRODUÇÃO

A sociedade mundial atual exige uma necessidade crescente de energia. No relatório divulgado recentemente por REN21 (2019), a média da demanda por energia cresceu 2% nos últimos dez anos. As principais fontes de geração de energia ainda são as originárias de combustíveis fósseis e da energia nuclear que, juntas, contribuíram com 80,7% do consumo total de energia estimada para o ano de 2018. Em contrapartida, observa-se tendência de expansão das fontes renováveis, que são fontes inesgotáveis e não poluentes. Comparando os dados do relatório com o trabalho de 2012, que mostra os dados referentes a 2011, o uso de fontes renováveis cresceu de 19% para 19,3%, sendo que a fatia das fontes como hidroeletricidade, energia solar e eólica representaram 10,2%, contra uma estimativa de apenas 6% em 2011.

Assim, o uso de fontes de energia renováveis torna-se uma opção confiável e vem apresentando crescimento superior ao da demanda da última década. Isso demonstra o esforço mundial em buscar alternativas para geração de energia, visando a substituir a de origem fóssil.

Um exemplo é a energia solar fotovoltaica, que teve forte crescimento nesta última década, sendo um meio para que o acesso à energia possa atingir pequenas comunidades como uma alternativa à rede de energia convencional. Além disso, com a queda dos custos de fabricação, Brito e Zilles (2018) esclarecem que esta solução tem se tornado economicamente viável em aplicações de geração distribuída, na qual ocorre geração de energia elétrica monofásica em pequena escala, injetada entre a rede elétrica e as cargas no chamado ponto de acoplamento comum (PCC, do inglês *point of common coupling*). Esse modelo de geração distribuída auxilia o suprimento da demanda local pela injeção de potência no sistema elétrico, caso haja excedente de geração. Para tanto, basta que nesta configuração exista um medidor de energia elétrica bidirecional para registrar tanto o consumo como a geração.

Os módulos fotovoltaicos são responsáveis pela conversão da energia solar em energia elétrica. Eles são constituídos de várias células fotovoltaicas interligadas para fornecer um valor de tensão e de corrente elétrica que tenha utilização prática. Segundo Fahrenbruch (2014), a eficiência na conversão de energia das melhores células solares fabricadas em laboratório feitas de silício monocristalino é da ordem de 25%. Isso representa um valor baixo para eficiência do sistema quando comparada a outras formas de geração de energia utilizadas atualmente. Outro ponto importante a ser considerado é que a tensão e a corrente de saída dos módulos fotovoltaicos também variam de acordo com fatores externos. Um deles se refere a condições ambientais como temperatura e incidência da radiação solar.

Quando se pensa nos atuais desafios para atender a atual crescente demanda de alimentos no mundo, é impossível dissociar a questão de produção de alimentos da discussão levantada por Thomas Malthus em 1798, considerando o crescimento populacional e a capacidade de produzir alimentos suficientes sem prejudicar o desenvolvimento econômico dos países (MALTHUS, 1798). Thomas Malthus não poderia ter previsto o crescimento populacional estável nos países desenvolvidos, bem como novas técnicas de cultivo. No entanto, mesmo que o setor do agronegócio seja capaz de fornecer alimentos suficientes, as preocupações com os impactos ambientais dos métodos de produção ganharam atenção por causa das ameaças para a sociedade (NUNES, BENNET e MARQUES JUNIOR, 2014).

Uma das formas de garantir o suprimento de energia elétrica nas propriedades de comunidades rurais isoladas seria a implantação de sistemas energéticos que tivessem como base fontes alternativas e renováveis de energia. Entre as fontes de energia renovável, há uma ampla gama de tipos de energia, tais como eólica, marinha, geotérmica, solar etc. Entre todas as fontes renováveis de energia, a que se destaca é a solar, que se caracteriza pela conversão direta da radiação solar em energia elétrica a partir das células fotovoltaicas (BORGES; SERA, 2010). A energia solar fotovoltaica vem se tornando uma importante fonte de eletricidade, especialmente para atender às áreas distantes dos centros distribuidores de energia elétrica, como, por exemplo, as áreas

rurais. Trata-se de uma modalidade já empregada há mais de 20 anos, sobretudo em áreas mais isoladas do país, onde a rede elétrica não chega (ALVARENGA et al., 2014).

O Ministério de Minas e Energia reconhece que a tecnologia fotovoltaica se mostra bastante promissora em decorrência tanto da autonomia quanto da abundância do recurso energético solar no Brasil, por isso, coordena programas para usufruir de fontes renováveis, como a solar, para levar o acesso à energia elétrica gratuitamente para a população rural nas localidades de menor índice de desenvolvimento humano (MME, 2020).

A tecnologia fotovoltaica se encontra tecnicamente consolidada e vem sendo adotada para eletrificação rural, tendo como uma das principais aplicações o bombeamento de água (ABINEE, 2012). Uma vez que é imprescindível o contínuo fornecimento de energia elétrica para os sistemas de irrigação que atendam as unidades agrícolas, pois a agricultura familiar hoje é responsável por 75% dos alimentos que vão para mesa do brasileiro (MME, 2020).

Os sistemas de bombeamento usam vários tipos de bombas, que, na irrigação, são fundamentais para transportar a água da fonte até a plantação, que pode ser extraída de reservatórios subterrâneos de água (cacimba ou poço amazonas). Portanto, o sistema fotovoltaico para o bombeamento do volume de água apresenta-se como uma alternativa bastante promissora, largamente adotada e acessível em termos de custo, pois se trata de sistemas duráveis que apresentam benefícios econômicos no longo prazo (BORGES; SERA, 2010). Por isso, é possível a instalação de sistema de bombeamento fotovoltaico para irrigação da agricultura familiar como alternativa para atender as necessidades domésticas e de produção de uma comunidade agrícola. Contudo percebe-se que uma das limitações para uma maior expansão do mercado de energia fotovoltaica para irrigação é o seu elevado custo. Assim, a redução no tempo de retorno de investimento tem um papel relevante. Outras dificuldades encontradas pelos produtores rurais na implementação de placas solares para irrigação é a dificuldade de manutenção dos equipamentos solares, apropriação da tecnologia nas mãos de poucos fabricantes e a dependência de equipamentos importados.

Todo o desenvolvimento das pesquisas durante a realização deste trabalho foi na busca da simplicidade, principalmente porque se deseja manter a eficiência reduzindo os custos, ao mesmo tempo em que depende do mínimo de intervenção humana e manutenções.

Baseado nisto, é apresentado o seguinte problema: é viável a substituição dos inversores e bombas elétricas especiais (corrente contínua – CC) utilizadas em sistemas de bombeamento fotovoltaico por conversores de frequência e bombas elétricas convencionais em grande variedade e disponibilidade no mercado? Diante de tais informações, pesquisas sobre os limites operacionais deste tipo de sistema de baixo custo foram necessárias para demonstrar os efeitos resultantes.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 TIPO DE PESQUISA**

A pesquisa é do tipo experimental, pois terá como objeto de estudo o desempenho de uma bomba elétrica centrífuga aplicada em sistemas de bombeamento de água para irrigação de pequenas propriedades rurais, utilizando como fonte de energia placas fotovoltaicas. O motor de indução será testado em diversas situações de irradiação solar para obter todas as informações sobre os resultados. A pesquisa também será explicativa, que é caracterizada por ações como registrar, analisar, interpretar e identificar dados e suas causas. Tem abordagem descritiva, que visa à identificação, registro e análise dos limites operacionais do sistema de irrigação, utilizando conversores e motobombas convencionais encontrados do mercado.

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL EM ESTUDO

A área de estudo será o município de Rio Verde, situado na microrregião do Sudoeste goiano, localizado nas coordenadas geográficas 17° 47' 53" S e 50° 55' 41" W, com altitude de 715m, a 220 km de Goiânia (capital do estado). Tem como municípios limítrofes Castelândia, Jataí, Montividiu, Paraúna, Quirinópolis, Santa Helena de Goiás. As principais rodovias que dão acesso ao município são Rodovia Federal - BR 060 e BR 452 e rodovia estadual GO 174. Tem em extensão uma área de 8.379,661 km<sup>2</sup>. A escolha é devida ao recente crescimento da demanda de instalação de sistemas fotovoltaicos.

## 2.3 IRRADIAÇÃO SOLAR NO LOCAL DE ESTUDO

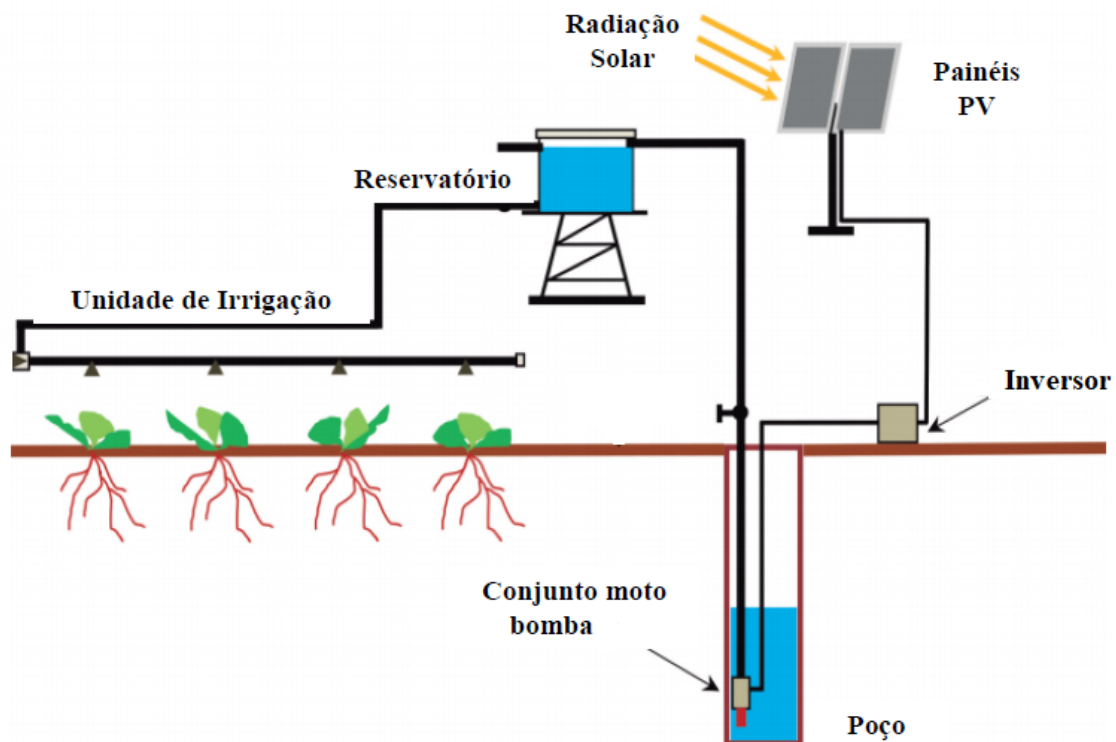
Conforme detalhado no estudo sobre radiação solar no item 1.3, a irradiação solar é a irradiância integrada em um intervalo de tempo especificado, geralmente uma hora ou um dia, sendo dada em watt hora por metro quadrado (Wh.m<sup>-2</sup>).

Dessa forma, acordo com a CRESESB (Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito), a irradiação solar média no plano horizontal na cidade de Rio Verde é de 5,19 kWh.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>. Foram escolhidos como referência para este projeto de pesquisa os dados disponíveis pela plataforma do CRESESB, que, desde 1994, desenvolve um trabalho integrado com bases de dados de todo o país, de forma a integrar em uma única plataforma, dados estes disponíveis gratuitamente para pesquisadores. O CRESESB é um centro de referência na identificação e coleta de dados das energias solar e eólica, estabelecendo acordos de cooperação com entidades estudantis e interagindo com órgãos normativos e grupos especializados da área para o estabelecimento de recomendações técnicas.

## 2.4 MONTAGEM DO ARRANJO EXPERIMENTAL

A Figura 1 mostra como é formado um sistema de bombeamento de água para irrigação utilizando energia fotovoltaica, ligado a inversores de frequência e bombas elétricas já preparadas para instalação em corrente contínua, disponíveis no mercado. Os principais componentes são: a radiação solar, o reservatório de água elevado, as unidades de irrigação, o conjunto motobomba, o poço, o inversor de frequência e os painéis fotovoltaicos.

**Figura 1.** Esquema da instalação do sistema fotovoltaico para irrigação



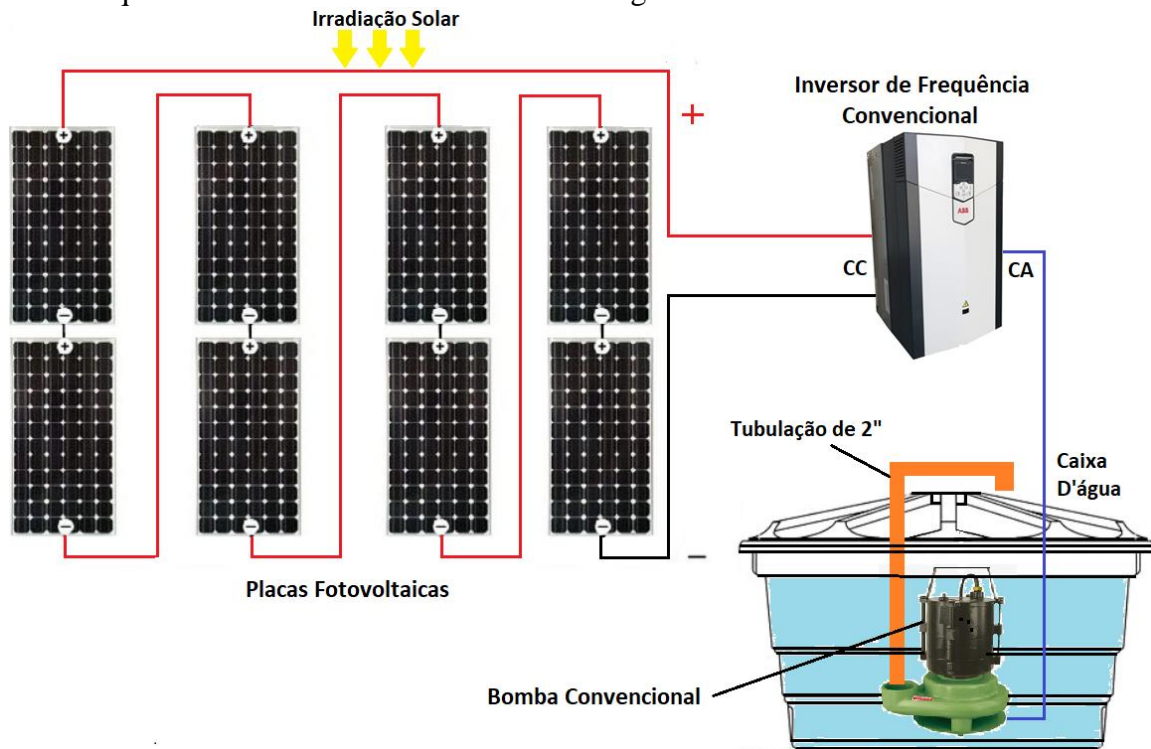
Fonte: Alvarenga et al. (2014).

Já a Figura 2 mostra os principais componentes utilizados no arranjo laboratorial proposto. Todos os testes foram feitos em laboratório, não houve testes em campo.

Comparando as Figuras 2 e 3, temos algumas considerações a fazer. A primeira é que a caixa d'água utilizada no estudo laboratorial não tem elevação, a segunda é que não foi utilizado um

poço, mas, sim, um circuito fechado de autobombeamento na própria caixa d'água, ou seja, o protótipo laboratorial desconsiderou as perdas de carga de um sistema real.

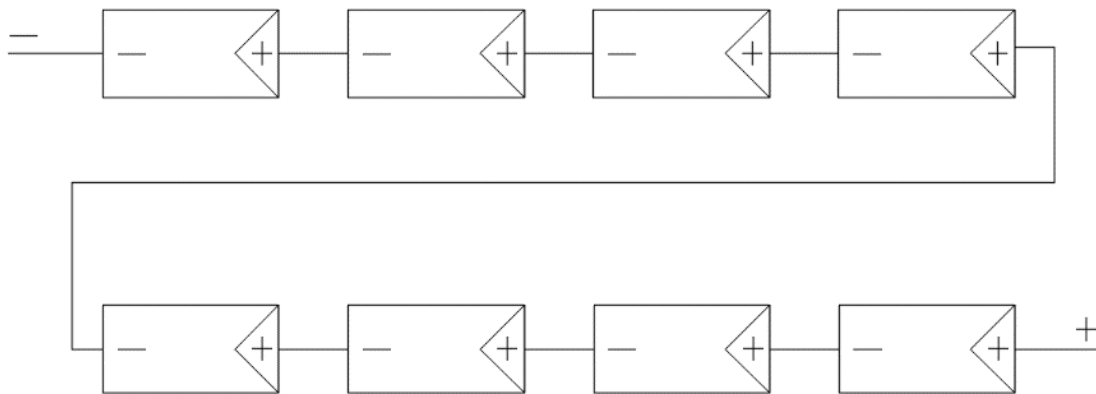
**Figura 2.** Esquema do sistema de bombeamento de água fotovoltaico laboratorial



Fonte: O autor (2020).

O arranjo experimental foi montado nas dependências do Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde, composto por um sistema equivalente representativo do funcionamento *off-grid* para irrigação, utilizando energia fotovoltaica. A montagem contemplou os painéis solares, cabos elétricos, conectores e estrutura de suporte.



**Figura 3.** Arranjo fotovoltaico com 8 módulos ligados em série

**Fonte:** O autor (2019).

O dimensionamento da quantidade de placas necessárias foi em função da tensão de entrada da bomba utilizada, já que o sistema não irá ter um sistema de rastreamento do ponto de máxima potência do módulo solar. A bomba elétrica utilizada é de 0,75kW e sua tensão, de 220V trifásico, como cada placa fornecerá 46,3V, assim foram montados 8 módulos fotovoltaicos em série, cujas características estão descritas na Tabela 01. Os arranjos fotovoltaicos foram montados com módulos policristalinos em uma estrutura metálica fixa, inclinada de 23° com relação ao plano horizontal, de forma que a superfície de incidência dos raios solares ficasse direcionada para o norte geográfico, conforme pode ser visto na Figura 4.

**Figura 4.** Imagem dos módulos fotovoltaicos montados



**Fonte:** O autor (2019).

**Figura 5.** Local de instalação das placas no IFGoiano (UTM: -17.806350, -50.905302)



**Fonte:** Google Maps (2020).

A Tabela 1 descreve as características dos módulos fotovoltaicos instalados, tais como potência nominal, corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, corrente com potência máxima, tensão com potência máxima, tensão máxima do sistema e peso de cada módulo.

**Tabela 1.** Características dos módulos fotovoltaicos instalados

Descrição da característica da placa	Variável	Unidade de Medida	Valor
Potência Nominal (+5W/-0W) Precisão de Medição P <sub>mpp</sub> : ±3%*	P <sub>mpp</sub>	[W]	335
Corrente de curto-circuito	I <sub>sc</sub>	[A]	9,40
Tensão de circuito aberto	V <sub>oc</sub>	[V]	46,3
Corrente com potência máxima	I <sub>mpp</sub>	[A]	8,87
Tensão com potência máxima	V <sub>mpp</sub>	[V]	37,8
Tensão máxima do sistema	V <sub>sys</sub>	[V]	1.000 (IEC)
Peso	M	[kg]	22,5 ± 5%

\*STC Desempenho nas Condições de Teste Padrão (STC): 1000W.m<sup>-2</sup>;25°C,AM 1,5 Espectro.  
**Fonte:** QCELLS (2019).

Os módulos fotovoltaicos foram montados sobre estruturas de aço galvanizado a fogo. No solo foram construídas duas sapatas de concreto de 600mm de profundidade. Foi instalado um sistema hidráulico sobre a parte superior das placas, cuja função é fazer a limpeza das placas, de forma que partículas de poeira não diminuam a produção de energia elétrica.

## 2.5 SELEÇÃO DO CONVERSOR DE FREQUÊNCIA COMERCIAL

Foram analisadas as possibilidades operacionais que conversores de vários fabricantes oferecem e seu grau de adaptabilidade às funções necessárias requeridas para sua operação em conjunto com geradores fotovoltaicos. As seguintes características inerentes a esses dispositivos são necessárias:

- a) Ter regulador proporcional e integral (PI) incorporado;
- b) Ter uma entrada e uma saída analógica;

- c) Ter uma saída de sinal analógica que pudesse ser configurada de forma a se obter um sinal de tensão (0-10V) proporcional à tensão contínua nos barramentos de alimentação; e
- d) Ter um software que possa ser integrado a uma interface de computador para facilitar a captação das grandezas elétricas, incluindo torque do motor, velocidade do motor, corrente do motor, frequência de saída do inversor, tensão DC do inversor e tensão de saída do inversor.

**Figura 6.** Imagem do inversor escolhido para a pesquisa (ACS880 ABB)



**Fonte:** ABB (2019).

**Tabela 1** - Características do conversor de frequência

Descrição da característica do inversor	Variável	Valor
Entrada	U1	3~208 à 240 VAC (+10/-10%)
	I1	4,6 A
	f1	50/60 Hz
Saída	U2	3~0...U1
	I2	4,6 A
	f2	0...500 Hz
	Sn	1,8 kVA
Icc	kA	65
IP	-	21
UL	-	Tipo 1
Fator de potência	-	$\cos\varphi_1 = 0,98$ (fundamental) $\cos\varphi = 0,93$ para 0,95 (total)
Rendimento (à potência nominal)	%	98
Controle do motor	-	Controle Direto de Torque (DTC)
Grau de proteção	-	IP20
Altitude 0 a 1,000 m	-	Sem depreciação
Altitude 1,000 a 4,000 m	-	Com depreciação de 1%/100 m
Tipo de refrigeração	-	A ar
Limites de Temperatura ambiente	-	-15 a +55°C, sem condensação
Operação	-	IEC 60721-3-3, Classe 3C2 (gases químicos), Classe 3S2 (partículas sólidas)

Fonte: ABB (2019).

Outra vantagem importante que este inversor de frequência tem é a possibilidade de sua integração com um software chamado *ABB Drive Composer*, que, ligado a uma unidade computacional, permite verificar em tempo real as medições feitas pelo próprio inversor, unidades de medidas como torque do motor, velocidade do motor, corrente do motor, frequência de saída do inversor, tensão DC do inversor e tensão de saída do inversor.

## 2.6 SELEÇÃO DA BOMBA ELÉTRICA DE CORRENTE ALTERNADA

A bomba elétrica adquirida no comércio local foi a bomba centrífuga submersível da fabricante Schneider, Figura 7, que é bastante utilizada em drenagem de águas servidas e pluviais, rebaixamento de lençol freático, bombeamento de efluentes não fibrosos e indústrias.

Esta bomba foi escolhida em razão de três fatores principais: primeiramente por ser do tipo centrífuga, pois as bombas centrífugas trabalham melhor para líquidos de baixa viscosidade (neste caso, foi utilizada a água, que tem por característica baixa viscosidade) e têm bom rendimento para menores alturas manométricas (a altura manométrica deste projeto de pesquisa é de um metro). O outro fator determinante para a escolha desta bomba foi a facilidade de instalação e, por fim, a possibilidade de fazer o fechamento da tensão em 220V trifásico, diminuindo assim a quantidade de placas a serem utilizadas no experimento.

**Figura 7.** Imagem da bomba utilizada na pesquisa



**Fonte:** Schneider (2019).

**Tabela 2.** Características da bomba centrífuga utilizada

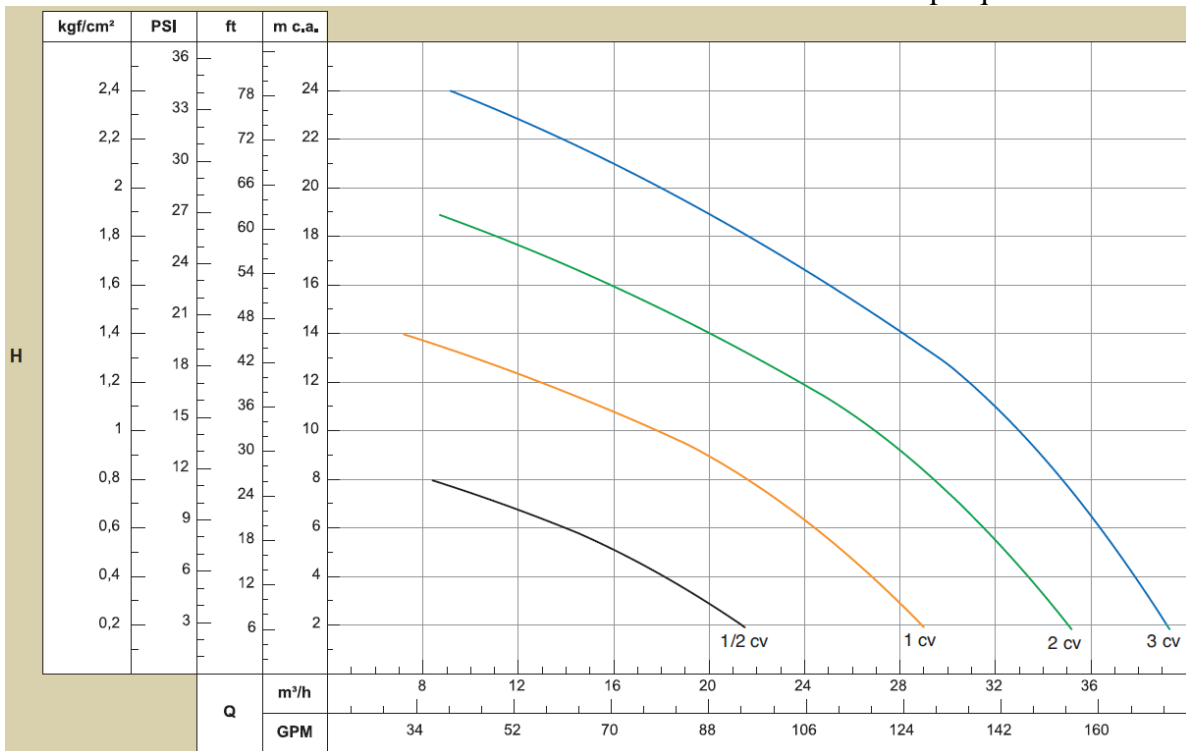
Descrição da característica da bomba	Variável	Valor
Fabricante	Schneider	-
Tipo	Centrífuga submersível	-
Modelo	BCS-220	-
Frequência Nominal	Hz	60
Número de Polos	Unid.	02
Velocidade Nominal	RPM	3420
Potência Nominal	0,75	kW
Tensão	VAC	220/380
Pressão máxima sem vazão	m.c.a.	16
Máxima secção transversal dos sólidos	mm	Ø20

**Fonte:** Schneider (2019).

As curvas características da motobomba elétrica utilizada no trabalho seguem nas Figuras 8 e 9.

Na Figura 8 pode ser observado que a bomba utilizada neste projeto de pesquisa (1,0 cv), representada pela curva laranja, tem, para a altura manométrica pesquisada neste trabalho (1 m.c.a.), uma vazão de, aproximadamente, 30 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Nesta mesma figura, pode-se destacar o decaimento da vazão em virtude da altura manométrica, que é uma característica comum em bombas submersas utilizadas para bombeamento de água. A Figura 8 ainda apresenta a curva de bombas de outras potências (1/2cv, 2cv e 3cv), cada qual com sua respectiva capacidade de vazão, mas todas se assemelhando na diminuição da vazão em virtude da altura da coluna d'água.

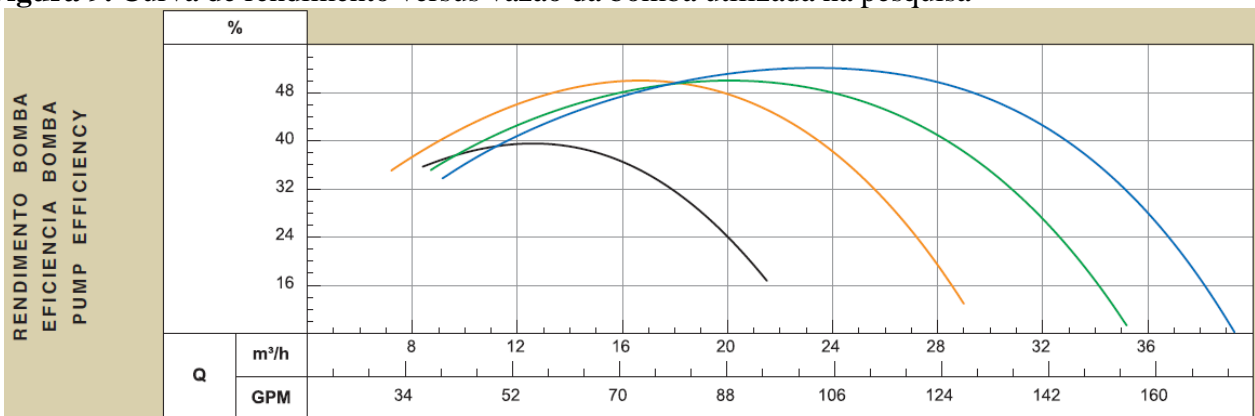
**Figura 8.** Curva da altura manométrica versus vazão da bomba utilizada na pesquisa



Fonte: Schneider (2019).

A Figura 9 mostra o rendimento da bomba em função da vazão. É possível analisar que o rendimento cai consideravelmente à medida que a vazão de líquidos sobe. Mas também é possível observar que há um ponto de rendimento máximo, que, para a bomba de 1,0cv (curva laranja), acontece para uma vazão de cerca de 17 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, alcançando neste ponto um rendimento máximo de 48%.

**Figura 9.** Curva de rendimento versus vazão da bomba utilizada na pesquisa



Fonte: Schneider (2019).





A motobomba foi instalada numa caixa d'água com capacidade para 0,5 m<sup>3</sup> de água, operando com sistema de tubulação em circuito fechado, com o objetivo de manter constante seu nível de água. A Figura 11 mostra a instalação da bomba submersível na caixa d'água.

**Figura 11.** Imagem da bomba elétrica e da caixa d'água



**Fonte:** O autor (2019).

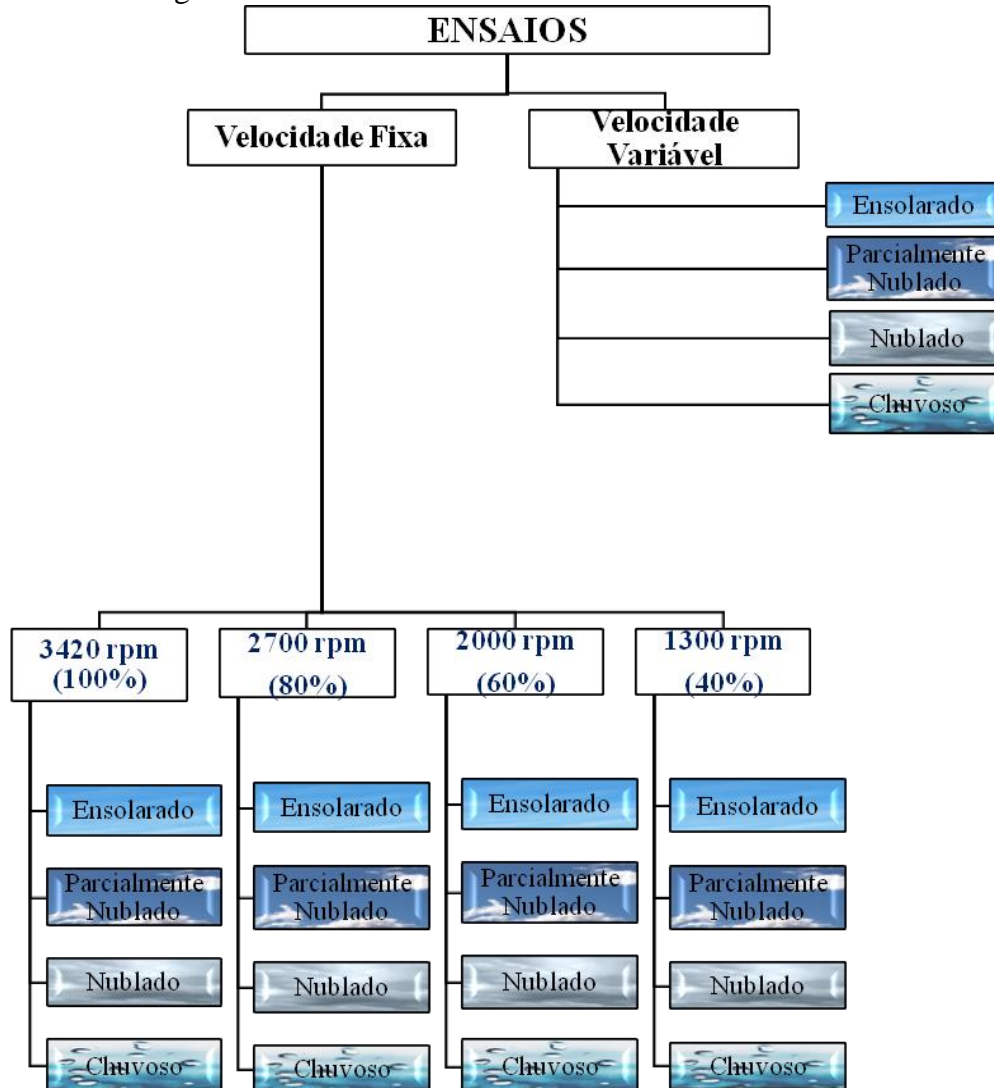
## 2.7 METODOLOGIA DO ENSAIO

O objetivo dos ensaios foi analisar os limites de operação da bomba e do inversor de frequência convencional, buscando avaliar os limites de operação tanto da bomba quanto do inversor.

Conforme a Figura 12, os ensaios foram realizados para quatro diferentes velocidades nominais da bomba elétrica e para quatro condições de irradiação solar, com o objetivo de medir, no mesmo instante, valores de vazão bombeada, irradiância coletada pelo gerador fotovoltaico,

velocidade do motor, corrente do motor, frequência de saída do inversor, tensão DC do inversor e tensão de saída do inversor.

**Figura 12.** Fluxograma dos ensaios com velocidade fixa e variável



**Fonte:** O autor (2020).

As configurações utilizadas foram as seguintes:

- Utilização de um conversor de frequência convencional acionando a bomba elétrica centrífuga adquirida no comércio local (convencional);
- Ensaio do conversor de frequência, utilizando frequências fixas, ou seja, velocidades predeterminadas da bomba elétrica, conforme relacionado abaixo. Essas velocidades, ou

*set-point*, foram escolhidas de forma a poder analisar um amplo range de trabalho da bomba elétrica, já que, variando a análise de velocidade entre 100% a 40%, praticamente todas as condições de bombeamento que realmente importam serão representadas no resultado final.

b.1) 100%: 3420 RPM;

b.2) 80%: 2700 RPM;

b.3) 60%: 2000 RPM;

b.3) 40%: 1300 RPM;

c) Ensaio do conversor de frequência com quatro diferentes condições climáticas. As condições climáticas abaixo representam todas as possíveis circunstâncias de irradiação solar que as placas fotovoltaicas irão sofrer ao longo de sua vida útil. Os ensaios c1, c2, c3 e c4 permitem comparar o desempenho do conversor de frequência convencional operando com uma bomba elétrica trifásica 380/220 VAC para diferentes condições de irradiação solar.

c.1) Ensolarado;

c.2) Parcialmente nublado;

c.3) Nublado;

c.4) Chuvoso;

d) A quantidade de módulos fotovoltaicos foi de 8 unidades de 335Wp em série, totalizando 2.680 W; e

e) Ensaio do conversor de frequência com velocidades (*set-point*) variáveis, utilizando a configuração de PID do próprio conversor de frequência. Este ensaio utilizou o sinal da

tensão do *link* VCC do conversor como referência para a variação da velocidade da motobomba.

Em todos os ensaios realizados, as alturas de recalque foram mantidas fixas pela utilização de tubulação com altura manométrica igual a um metro. A bomba elétrica foi instalada em uma caixa d'água com capacidade para 0,5m<sup>3</sup> de água, operando com sistema de tubulação em circuito fechado, com o objetivo de manter constante o nível de água no reservatório.

Em cada instante de um sistema de geração de energia alternada, os pontos máximos da crista da onda são chamados de corrente e tensão de pico a pico ou corrente e tensão instantâneos. Quando um equipamento é ligado, nem toda essa corrente e tensão são absorvidos, o que é absorvido é chamado de tensão ou de corrente eficaz (REZA, 2015).

O fabricante informou apenas os valores eficazes em corrente alternada para o inversor utilizado no projeto, conforme Tabela 2. Assim, o valor de pico foi considerado como limite operacional do inversor em corrente contínua. A equação 13 foi utilizada para calcular o valor de pico.

$$V_{eficaz} = \frac{V_P}{\sqrt{2}} \quad (01)$$

Em que:

$V_{eficaz}$  = tensão eficaz (V); e

$V_P$  = Tensão de pico (V).

O conversor de frequência utiliza uma tensão eficaz nominal de entrada em corrente alternada igual a 220 VAC ( $\pm 10\%$ ), sendo que, utilizando a equação 13, temos o valor de aproximadamente 310 VCC ( $220 \times \sqrt{2}$ ). Este será, portanto, o valor nominal da tensão CC necessária para alimentar o conversor. A VCC na saída do arranjo fotovoltaico assim como VCC no link do conversor de frequência variam com a irradiação solar. Para a configuração proposta (8 módulos em série), na condição de irradiação solar incidente padrão ( $I_{col} = 1.000 \text{ W.m}^{-2}$ ), a VCC na saída dos módulos será de 370,4 VCC ( $46,3 \text{ VCC} \times 8$ ), este valor foi calculado com base na Tabela 1.

## **2.8 GRANDEZAS MONITORADAS**

Foram medidos os valores instantâneos das seguintes grandezas:

### **2.8.1 ELÉTRICAS**

Os valores de grandezas elétricas medidas foram torque do motor, velocidade do motor, corrente do motor, frequência de saída do inversor, tensão DC do inversor e tensão de saída do inversor. Em razão da complexidade do projeto, para viabilizar a medição de todas essas grandezas, optou-se pela utilização do inversor *ABB com o Drive Composer*.

## 2.8.2 SOFTWARE ABB DRIVE COMPOSER

O *software* utilizado para medir o torque do motor, velocidade do motor, corrente do motor, frequência de saída do inversor, tensão DC do inversor e tensão de saída do inversor foi o *ABB Drive Composer*.

O *ABB Drive Composer* é uma ferramenta livre de parametrização e manutenção de drives de arquitetura comum da ABB. Esta ferramenta é usada para visualizar e configurar parâmetros de drives e para monitorar e ajustar o desempenho de processos. A versão de registro do *Drive Composer* fornece a funcionalidade básica para a configuração de parâmetros, monitoramento básico, tendo o controle local do drive a partir do PC e a administração do registrador de eventos (*Data Logs*).

## 2.8.3 MEDIDA DA IRRADIÂNCIA

Foram medidos e armazenados os valores instantâneos da irradiação coletada (*Icol*) em watts por metro quadrado, sobre o plano do gerador fotovoltaico (Figura 13). O sensor utilizado foi o medidor da densidade de potência média da energia solar, que faz leituras em  $W.m^{-2}$ , modelo *Power Meter SP-2000*, do fabricante Icel. A Tabela 2 mostra as demais características do sensor:

**Tabela 4. Características do medidor de irradiação utilizado**

Descrição da característica do inversor	Variável
Display de cristal líquido com iluminação	-
Taxa de amostragem: 0,25 segundos aprox.	Contudo a taxa de atualização dos valores no display também é de 1 segundo
Escalas	1999 $W.m^{-2}$ ; 634 $BTU/(ft^2 \cdot h)$
Resolução	1 $W.m^{-2}$ ; 1 $Btu/(ft^2 \cdot h)$
Alimentação	Três pilhas de 1,5V tipo AAA
Exatidão	$\pm 10 W.m^{-2}$ [ $\pm 3 BTU/(ft^2 \cdot h)$ ] ou 5%, o que

	for maior à luz do sol
Coeficiente de temperatura	$\pm 0,38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} / ^\circ\text{C}$
Desvio	$< \pm 3/\text{ano}$
Temperatura de operação	de $5^\circ\text{C}$ a $40^\circ\text{C}$ menor que 80%RH
Temperatura de armazenamento	de $-10$ a $+60^\circ\text{C}$ menor que 70%RH
Dimensões	162x63x28 mm
Peso	aprox. 250g (incluindo as pilhas)

Fonte: Icel (2019).

Os valores instantâneos da irradiação solar foram medidos em watts por metro quadrado ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) sobre o plano do gerador fotovoltaico. A precisão deste medidor de irradiância é bastante alta, e seus recursos técnicos atenderam plenamente ao objetivo proposto.

O equipamento estava calibrado no período de aquisição dos dados. A medição foi feita no plano inclinado, tendo em vista que as superfícies dos painéis fotovoltaicos estão inclinadas  $23^\circ$  em relação ao plano horizontal.

**Figura 13.** Medição da irradiação solar



Fonte: O autor (2019).

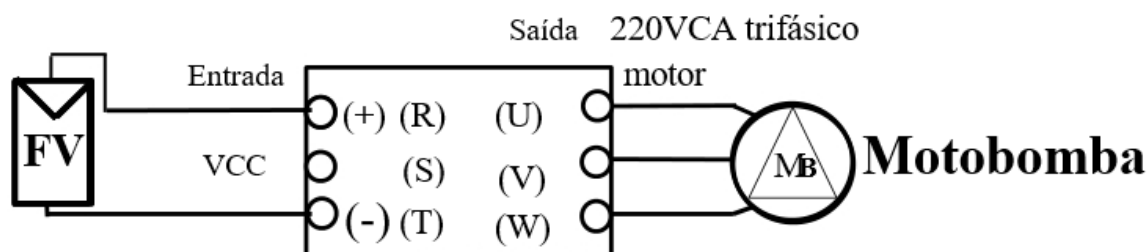


### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 LIMITES OPERACIONAIS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DE UM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA CONVENCIONAL ACIONANDO UMA MOTOBOMBA CENTRÍFUGA CONVENCIONAL

Os resultados apresentados nesta seção têm o sentido de mostrar a possibilidade de se utilizar uma motobomba de baixo custo, como alternativa econômica, em substituição ao sistema de motobombas de corrente contínua. Para tal ensaio, foi instalada uma motobomba centrífuga submersível convencional de potência nominal igual a 0,75kW, disponível no comércio local. A Figura 14 mostra o esquema de ligação dos painéis no inversor e, conseqüentemente, na motobomba.

**Figura 14.** Esquema de ligação de alimentação do inversor



Fonte: O autor (2019).

A vazão de água não foi medida diretamente, mas, com base nos dados das Figuras 8 e 9, foi possível proceder a uma aproximação precisa dos valores de vazão para quatro diferentes velocidades, considerando a altura manométrica de 1 m.c.a. e a eficiência da bomba de, aproximadamente, 12%.

A metodologia de cálculo da vazão foi a seguinte: com base nos dados da Figura 8, foi obtido o valor de  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  de vazão para a altura manométrica de 1 m.c.a. Esse valor de vazão foi comparado na Tabela 9 para se obter o valor de 12% de rendimento da bomba.

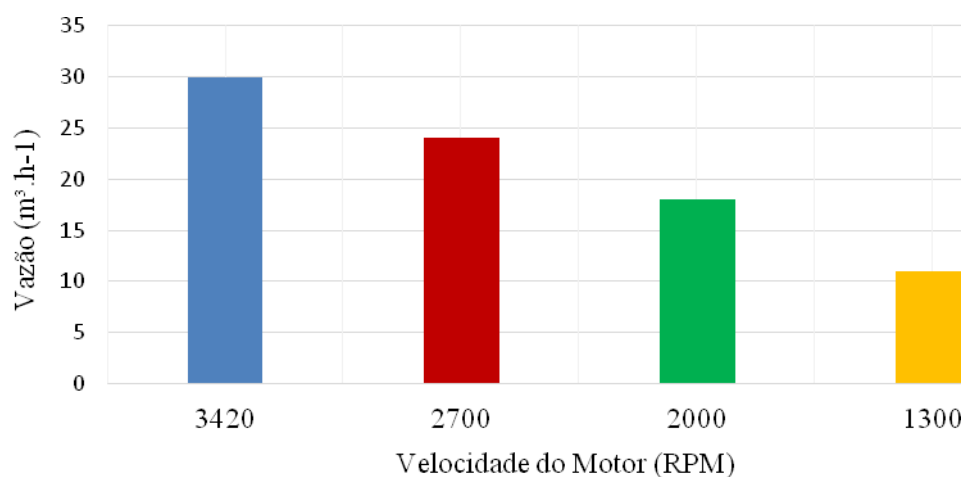
Tendo esse valor de rendimento (12%) como referência, foram montadas a Tabela 6 e a Figura 15.

**Tabela 5.** Vazão estimado em comparação com a velocidade do motor

Velocidade do Motor (RPM)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)
3420	30
2700	24
2000	18
1300	11

Fonte: O autor (2019).

**Figura 15.** Vazão estimada em comparação com a velocidade do motor



Fonte: O autor (2019).

As medições da irradiação solar foram coletadas de forma instantânea de hora em hora, e os resultados anotados para traçar a curva de irradiação para as quatro condições climáticas (ensolarado, parcialmente nublado, nublado e chuvoso).

As datas das coletas dos dados foram: para a condição ensolarado, dia 06 de outubro de 2019; parcialmente nublado, dia 17 de novembro de 2019; nublado, dia 22 de dezembro de 2019; e chuvoso, dia 01 de dezembro de 2019.

A Tabela 7 mostra as condições climáticas das datas mencionadas, registradas pelo Inmet (Instituto Nacional de Meteorologia).

**Tabela 6.** Condição climática nas datas das coletas dos dados

Condição Climática	Precipitação Total (mm)	Pressão ATM Máxima (mB)	Radiação Global Máxima ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ )	Temperatura Máxima ( $^{\circ}\text{C}$ )	Umidade Relativa do Ar (%)	Velocidade média do Vento (m/s)
Ensolarado	0	927,6	1075,6	29,3	48	1,6
Parcialmente nublado	0	927,2	671,1	28,2	66	1,5
Nublado	0,8	926,2	155,3	25,5	70	1,4
Chuvoso	15	923	149,5	21	85	1

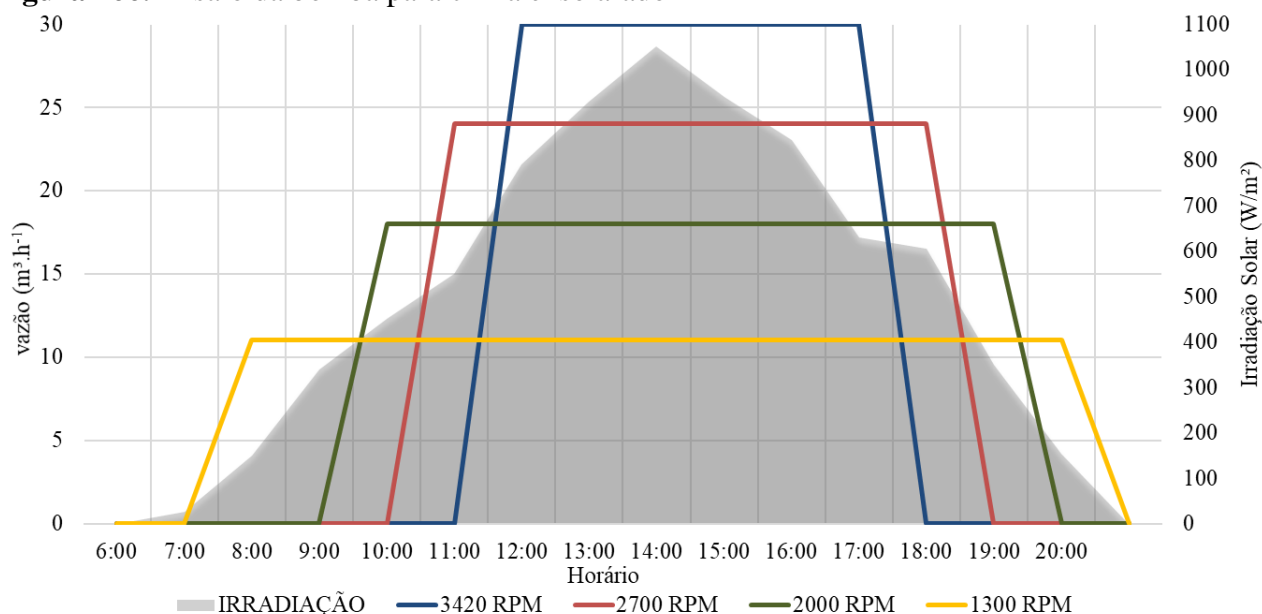
**Fonte:** Inmet (2020).

As Tabelas 8, 9, 10 e 11, além das Figuras 16, 17, 18 e 19, mostram o resultado dos ensaios da motobomba centrífuga convencional, testadas para quatro diferentes velocidades. A Tabela 8 e a Figura 16 mostram os resultados dos ensaios para a condição climática ensolarado.

**Tabela 7.** Ensaio da bomba para clima ensolarado

Horário	Irradiação ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Vazão ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ )			
		Velocidade 100%	Velocidade 80%	Velocidade 60%	Velocidade 40%
5:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
6:00	26	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
7:00	150	Falha CF	Falha CF	Falha CF	11
8:00	340	Falha CF	Falha CF	Falha CF	11
9:00	450	Falha CF	Falha CF	18	11
10:00	550	Falha CF	24	18	11
11:00	790	30	24	18	11
12:00	930	30	24	18	11
13:00	1050	30	24	18	11
14:00	940	30	24	18	11
15:00	844	30	24	18	11
16:00	630	30	24	18	11
17:00	605	Falha CF	24	18	11
18:00	350	Falha CF	Falha CF	18	11
19:00	153	Falha CF	Falha CF	Falha CF	11
20:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
TOTAL DE VAZÃO ACUMULADA ( $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ )		180	192	180	143

**Fonte:** O autor (2019).

**Figura 166.** Ensaio da bomba para clima ensolarado

Fonte: O autor (2019).

O contorno na cor cinza das Figuras 16, 17, 18 e 19 representa a evolução da irradiação solar ao longo do dia.

Por exemplo, para a condição climática ensolarada, Figura 16, a irradiação solar chegou no seu pico de aproximadamente  $1.000 \text{ W.m}^{-2}$  às 14h30min.

Em contrapartida, para o clima chuvoso, Figura 19, o pico da irradiação não passou de  $300 \text{ W.m}^{-2}$ .

As Tabelas 8, 9, 10 e 11 demonstram que o tempo em que a bomba permaneceu ligada depende diretamente da irradiação solar, quanto mais sol durante o dia, mais água será bombeada.

Durante os ensaios, observou-se também que o aumento da velocidade da bomba influencia nos resultados, já que a energia despendida pelo sistema será maior, e nem sempre o sistema fotovoltaico conseguiu suprir a necessidade da demanda de energia em razão da baixa irradiação solar, fazendo com que o conversor de frequência entrasse em falha, isso pode ser observado, por exemplo, na Tabela 8, entre as 5h00min e as 10h00min, utilizando 100% da velocidade da bomba

(3420 RPM), sendo que a motobomba não ligou, já que o conversor apresentou falha de subtensão na ligação CC.

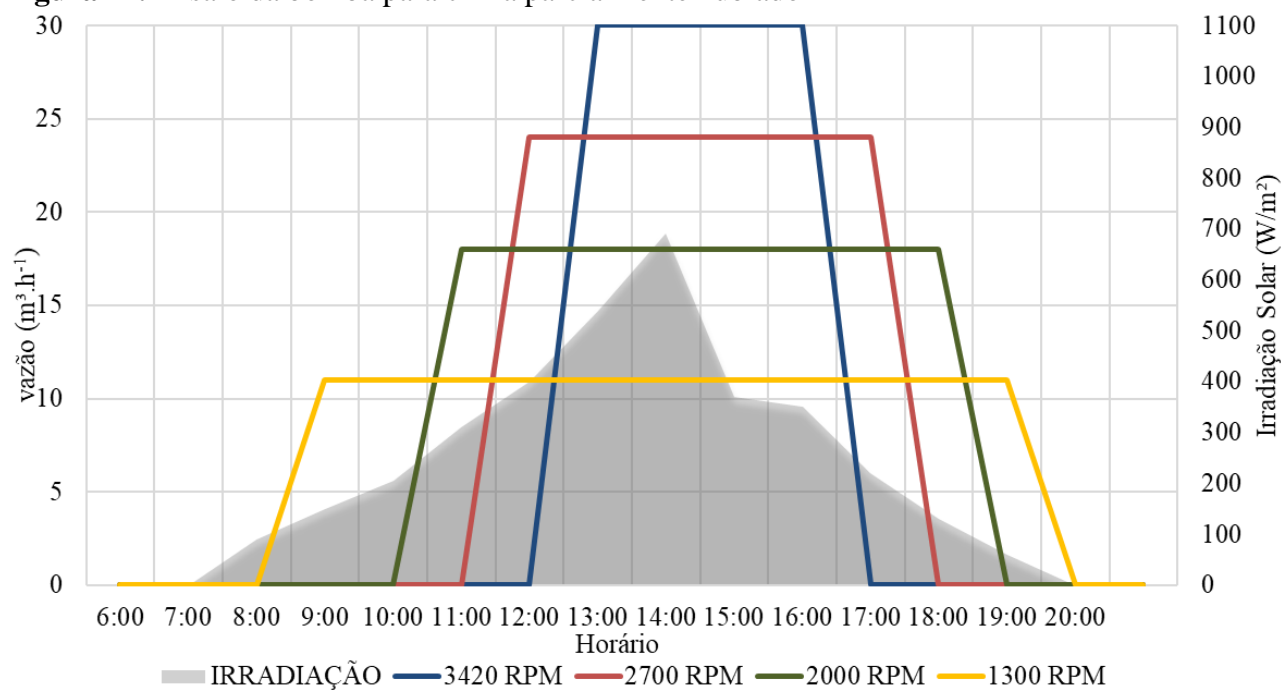
A falha apresentada pelo inversor foi a A3A2, que significa subtensão na ligação CC, e a causa é a tensão intermediária do circuito CC estar abaixo do mínimo recomendado pelo fabricante.

A Tabela 9 e a Figura 17 mostram os resultados dos ensaios para a condição climática parcialmente nublado.

**Tabela 8.** Ensaio da bomba para clima parcialmente nublado

Horário	Irradiação (W.m <sup>-2</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )			
		Velocidade 100%	Velocidade 80%	Velocidade 60%	Velocidade 40%
5:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
6:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
7:00	90	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
8:00	220	Falha CF	Falha CF	Falha CF	11
9:00	310	Falha CF	Falha CF	Falha CF	11
10:00	430	Falha CF	Falha CF	18	11
11:00	550	Falha CF	24	18	11
12:00	540	30	24	18	11
13:00	690	30	24	18	11
14:00	370	30	24	18	11
15:00	350	30	24	18	11
16:00	150	Falha CF	24	18	11
17:00	100	Falha CF	Falha CF	18	11
18:00	60	Falha CF	Falha CF	Falha CF	11
19:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
20:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
TOTAL DE VAZÃO ACUMULADA (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )		120	144	144	121

Fonte: O autor (2019).

**Figura 17.** Ensaio da bomba para clima parcialmente nublado

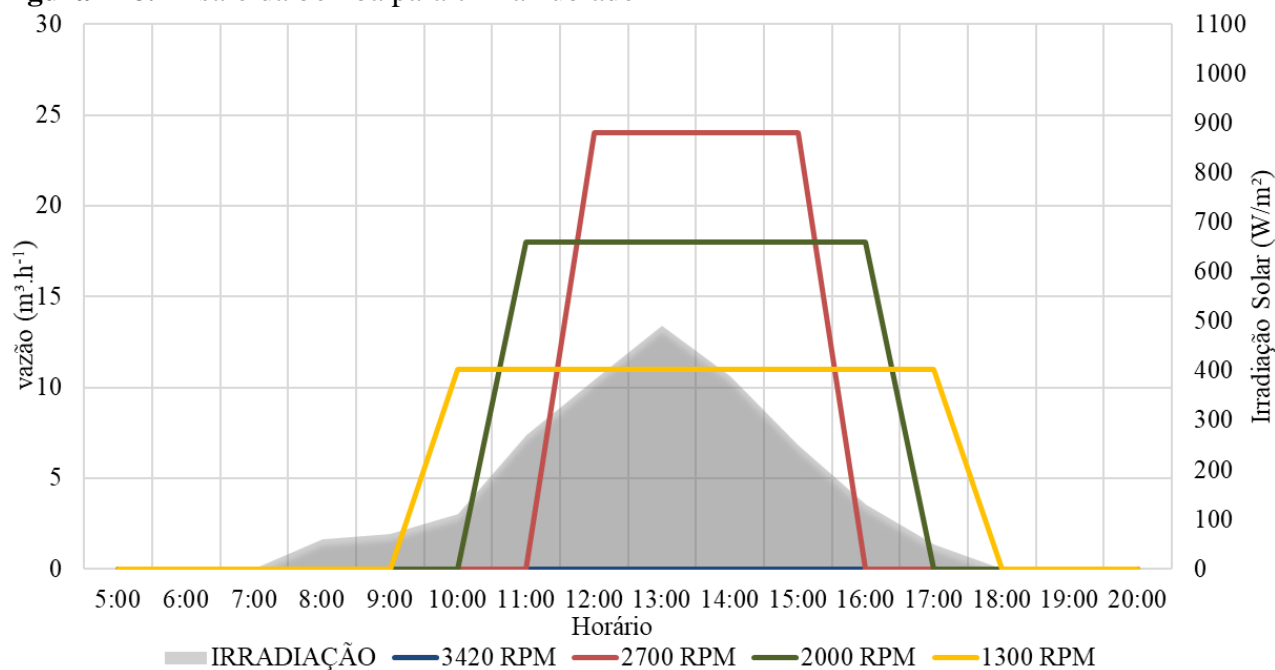
Fonte: O autor (2019).

A Tabela 10 e a Figura 18 mostram os resultados dos ensaios para a condição climática nublado.

**Tabela 9.** Ensaio da bomba para clima nublado

Horário	Irradiação (W.m <sup>-2</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )			
		Velocidade 100%	Velocidade 80%	Velocidade 60%	Velocidade 40%
5:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
6:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
7:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
8:00	60	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
9:00	70	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
10:00	110	Falha CF	Falha CF	Falha CF	11
11:00	270	Falha CF	Falha CF	18	11
12:00	380	Falha CF	24	18	11
13:00	490	Falha CF	24	18	11
14:00	390	Falha CF	24	18	11
15:00	250	Falha CF	24	18	11
16:00	130	Falha CF	Falha CF	18	11
17:00	50	Falha CF	Falha CF	Falha CF	11
18:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
19:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
20:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
TOTAL DE VAZÃO ACUMULADA (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )		0	96	108	88

Fonte: O autor (2019).

**Figura 178.** Ensaio da bomba para clima nublado

Fonte: O autor (2019).

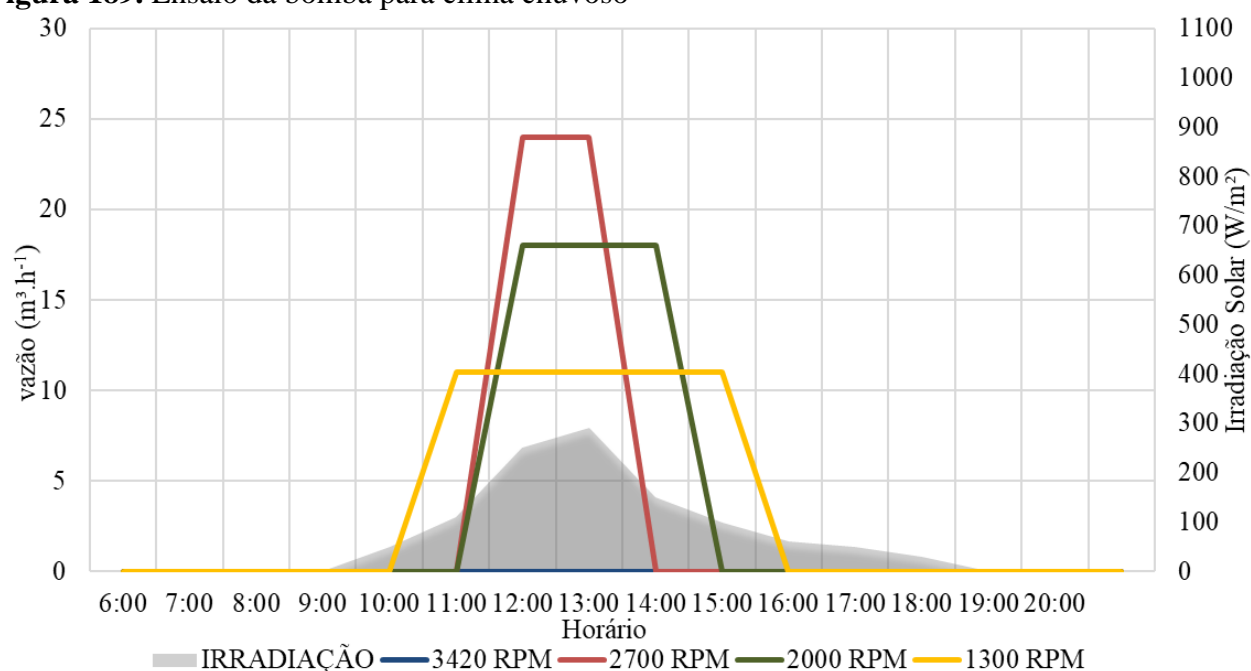
A Tabela 11 e a Figura 19 mostram os resultados dos ensaios para a condição climática chuvosa.

**Tabela 10.** Ensaio da bomba para clima chuvoso

Horário	Irradiação (W.m <sup>-2</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )			
		Velocidade 100%	Velocidade 80%	Velocidade 60%	Velocidade 40%
5:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
6:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
7:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
8:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
9:00	50	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
10:00	110	Falha CF	Falha CF	Falha CF	11
11:00	250	Falha CF	24	18	11
12:00	290	Falha CF	24	18	11
13:00	150	Falha CF	Falha CF	18	11
14:00	100	Falha CF	Falha CF	Falha CF	11
15:00	90	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
16:00	80	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
17:00	30	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
18:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
19:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
20:00	0	Falha CF	Falha CF	Falha CF	Falha CF
TOTAL DE VAZÃO ACUMULADA (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )		0	48	54	55

Fonte: O autor (2019).



**Figura 189.** Ensaio da bomba para clima chuvoso

**Fonte:** O autor (2019).

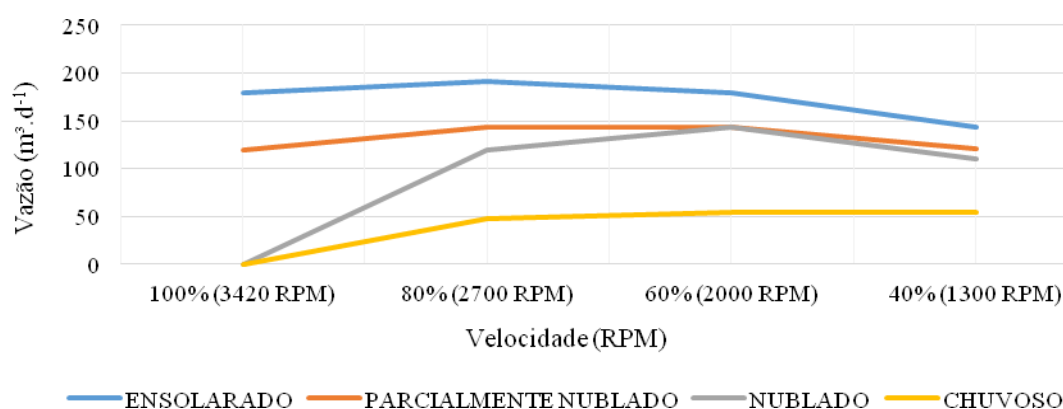
A Tabela 12 e a Figura 20 mostram os resultados dos cálculos de vazão obtidos pelos ensaios realizados, considerando a estratégia de *set-point* (velocidade) fixa.

O impacto da condição climática e, conseqüentemente da irradiação solar, no desempenho da bomba elétrica convencional, pode ser observado, por exemplo, para a velocidade fixa de 3420 RPM, ou seja, utilizando 100% da capacidade de bombeamento do sistema. Neste caso, a vazão total bombeada foi calculada em  $180 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  para o clima ensolarado,  $120 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  quando o clima se apresentou parcialmente nublado e não houve bombeamento para as condições nublado e chuvoso. Ou seja, a velocidade da bomba foi um fator preponderante no desempenho do sistema de bombeamento de água utilizando energia fotovoltaica, conversor convencional e bomba elétrica convencional.

**Tabela 11.** Vazão total para a estratégia de *set-point* fixo

	Ensolarado	Parcialmente nublado	Nublado	Chuvoso
Velocidade	Vazão (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )
100%	180	120	0	0
80%	192	144	120	48
60%	180	144	144	54
40%	143	121	110	55

Fonte: O autor (2019).

**Figura 20.** Vazão total para a estratégia de *set-point* fixo

Fonte: O autor (2019).

Para o clima ensolarado e com 80% da velocidade nominal da bomba, foi observado o maior tempo em que a bomba permaneceu ligada, resultando em cerca de 192 m<sup>3</sup>/dia de água bombeada (Tabela 12). A falha apresentada pelo inversor foi a A3A2, que significa subtensão na ligação CC, e a causa é a tensão intermediária do circuito CC estar abaixo do mínimo recomendado pelo fabricante. Os limites de tensão de entrada VAC do inversor em questão são 208 VAC (-10%) a 240 VAC (+10%), conforme informado pelo fabricante. Ou seja, para a etapa retificadora, os limites da tensão VCC são 264 VCC (208 VAC - 10% x  $\sqrt{2}$ ) e 373 VCC (240 VAC +10% x  $\sqrt{2}$ ), valores calculados utilizando a equação 01. Esses limites impostos pelo fabricante foram determinantes na escolha da quantidade de placas, já que a VOC de cada painel é de 46,2 VCC, então a tensão máxima na entrada no inversor será de 369,6 VCC (8 placas x 46,2VCC).

Um sinal dentro de um inversor de frequência convencional passa por três etapas: a primeira etapa é a retificação, a segunda etapa é um banco de capacitores DC que filtra a tensão CC para eliminar o *ripple* existente na senoide da rede e a terceira etapa é o inversor propriamente dito, que são os 06 IGBTs (*Insulation Gate Bipolar Transistor*), gerando as três fases da tensão de saída, com frequência e tensão variáveis. Após a retificação do sinal de entrada VAC, o inversor de frequência gera um novo sinal senoidal, com período e amplitude diferentes do sinal original. Dessa forma, o inversor ajusta a frequência e a tensão, conforme o usuário deseja que sua carga se comporte.

Alimentando o inversor com uma VCC, conforme feito neste trabalho, simplesmente eliminamos as duas primeiras etapas (retificação e circuito intermediário). Assim, independentemente da tensão de entrada VAC ou VCC, o inversor vai processar o sinal na última etapa (inversor). O cuidado é que o sinal VCC deve estar dentro da faixa de operação nominal do inversor.

Os técnicos da ABB, fabricantes do inversor, orientaram sobre um ponto importante, que é a forma como os cabos foram conectados. O cabo positivo da fonte fotovoltaica foi conectado a uma das fases de entrada do inversor e o cabo negativo, a outra fase. Percebe-se então que uma das fases de entrada no inversor ficou sem conexão. Mesmo com os cabos conectados dessa forma, não houve problemas técnicos no funcionamento do inversor. Em nenhum momento a corrente nominal do inversor foi alcançada, caso isso acontecesse, e com base nos estudos do inversor de frequência, alvo deste trabalho, e nas informações técnicas da ABB, que é a fabricante, mesmo a plena carga e injetando tensão monofásica na entrada do inversor, ele não entraria em falha, pois o *ripple* da tensão DC que existe dentro do inversor ficaria baixo, mesmo não contendo as três fases, pois a tensão de entrada já é VCC. O inversor utilizado neste projeto tem capacidade de medir os *ripples* da tensão.

### 3.2 CONFIGURAÇÃO DO CONTROLE DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DE UM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA CONVENCIONAL ACIONANDO UMA MOTOBOMBA CENTRÍFUGA CONVENCIONAL

Em fevereiro de 2019, foi adquirido um conversor de frequência da WEG, modelo CFW 10<sup>2</sup>. Após várias tentativas de pôr o equipamento para funcionar corretamente, verificou-se que o inversor não tinha capacidade de informar na sua saída analógica o valor correspondente ao seu *link* DC, quesito importante para a estratégia utilizada no ensaio desta seção.

Portanto, não havia como informar ao regulador PI, por intermédio de um sinal adequado proveniente da saída analógica, o valor atual em que se encontra a tensão do gerador fotovoltaico para que ele pudesse corrigir eventuais variações que viessem acontecer nesta variável. Este fato impossibilitou, por completo, a utilização deste equipamento para operar em um sistema de bombeamento de água com tecnologia fotovoltaica.

Em março de 2019, foi testado um conversor da marca ABB, modelo ACS880. Este conversor, por sua vez, atendeu a todos os requisitos básicos citados anteriormente. Conseguiu-se, dessa maneira, dar início à etapa inicial do projeto: pôr em funcionamento de forma satisfatória o sistema de bombeamento, utilizando a estratégia de velocidade variável.

O ensaio descrito no item 3.3.1 utilizou a estratégia de fixar quatro diferentes velocidades (*set-point*) e analisar os limites operacionais do sistema. Nesta configuração de controle proposta agora, o *set-point* (velocidade) será variável, ou seja, um controle PID interno no inversor ajusta a velocidade do acionamento para manter a bomba ligada o maior tempo possível, tendo como referência a tensão no *link* VCC dentro do próprio inversor. Ao utilizar um CF alimentado por um gerador fotovoltaico, que se comporta na prática como um gerador de corrente cuja intensidade

---

<sup>2</sup> Alguns equipamentos são denominados em forma genérica

depende da irradiância incidente sobre sua superfície, sem nenhuma forma de controle do processo de transporte de energia, poderá haver variações nos valores de tensão e de corrente, provenientes do gerador fotovoltaico, que venham a interromper o funcionamento do sistema. Ou seja, se a energia fornecida pelo gerador for insuficiente (durante um céu nublado, por exemplo) para que o CFC opere a motobomba em seus valores nominais, o funcionamento do sistema será interrompido.

Ocorre normalmente, na tentativa de vencer o torque resistente sobre seu eixo, que o motor de indução (conjunto motor – conversor) tente absorver uma corrente do gerador fotovoltaico, de intensidade maior que o valor possível, para as condições de irradiância do momento, deslocando a tensão de operação do gerador fotovoltaico para valores abaixo do limite inferior aceito pelo conversor de frequência. Um regulador proporcional, integral (PI), habitualmente incorporado neste equipamento, é utilizado de forma a se estabelecer um valor de tensão contínua aproximadamente constante, em seu barramento de alimentação, adequado para o sistema operar.

O regulador funcionará, portanto, da seguinte maneira: ao variar os níveis de irradiância sobre o arranjo fotovoltaico, a quantidade de energia transportada à motobomba pelo conversor de frequência variará de forma controlada, resultando em um aumento ou diminuição de sua velocidade de rotação. Este processo de controle, executado pelo regulador PI, visa a manter o valor da tensão de alimentação (variável de processo) constante.

Utiliza-se neste procedimento o conceito já bem conhecido em engenharia fotovoltaica de que um valor de tensão constante e bem escolhido determina um excelente ponto de operação para o gerador, fornecendo à carga uma potência que pouco difere, quando integrada ao longo do tempo, do desempenho do sistema operando no ponto de máxima potência.

O conversor de frequência permite monitorar a tensão de entrada em seu barramento de alimentação VCC por meio de um sinal de tensão (0 a 10 V, em CC) proveniente de uma saída analógica (1 na Figura 21) configurada para responder proporcionalmente ao valor da tensão de entrada VCC. Este sinal é então introduzido em uma entrada de sinal (6, Figura 21), também

analógica, e comparada a um valor de referência, determinado pelo usuário, que corresponderá à tensão de operação desejada. O controlador PI atuará então sobre o erro resultante, variando a velocidade de rotação da motobomba.

Uma relação com os parâmetros de controle, adotados para o modelo de conversor utilizado nos ensaios, é apresentada no apêndice. Será ativado o parâmetro *Sleep* quando este parâmetro estiver habilitado e houver queda de tensão, fazendo com que a tensão no circuito intermediário fique abaixo do nível de subtensão, sendo os pulsos de saída desabilitados (motor gira livre) e o CF aguardando o retorno da tensão por até 2 s. Se a tensão voltar ao estado normal antes desse tempo, o CF volta a habilitar os pulsos PWM, impondo a referência de frequência instantaneamente.

**Figura 21.** Sistema de controle de um conversor de frequência configurado para operar com tensão de alimentação constante

XAI	Tensão de referência e entradas analógicas	
1	+VREF	10 V DC, $R_L$ 1 to 10 kohm
2	-VREF	-10 V DC, $R_L$ 1 to 10 kohm
3	AGND	Ground
4	AI1+	<b>Referência de velocidade</b> 0(2) to 10 V, $R_m > 200$ kohm
5	AI1-	
6	AI2+	Sem uso como padrão
7	AI2-	0(4) to 20 mA, $R_m > 100$ ohm
J1	J1	AI1 jumper de seleção de tensão/corrente
J2	J2	AI2 jumper de seleção de tensão/corrente
XAO	Saídas analógicas	
1	AO1	<b>Veloc. do motor</b> 0 a 20 mA, $R_L < 500$ ohm
2	AGND	
3	AO2	<b>Corr. do motor</b> 0 a 20 mA, $R_L < 500$ ohm
4	AGND	

Fonte: O autor (2019).

A funcionalidade *Sleep* é extremamente útil, pois como já foi visto, se o controlador PID do CF utilizado não estiver adequadamente sintonizado, sempre que houver variações bruscas de irradiância o CF pode vir a desarmar por erro de subtensão. Todavia, com a existência desse parâmetro, mesmo que o controlador PID do CF utilizado não esteja sintonizado adequadamente, este problema dificilmente ocorrerá.

A Figura 22 e as Tabelas 13 e 14 mostram os resultados dos ensaios para a estratégia de *set-point* variável, onde foi observada a vantagem de a velocidade da bomba seguir proporcionalmente a variação do *link* DC do inversor. Outra vantagem foi o não chaveamento sucessivo do CF e, conseqüentemente, da motobomba, no nascer e no pôr do Sol, quando o nível de irradiância é insuficiente para o sistema entrar ou permanecer em operação. Este processo de chaveamento do CF tem como consequência a redução de sua vida útil e, conseqüentemente, da motobomba.

**Tabela 12.** Ensaio para *set-point* variável para condições climáticas ensolarado e parcialmente nublado

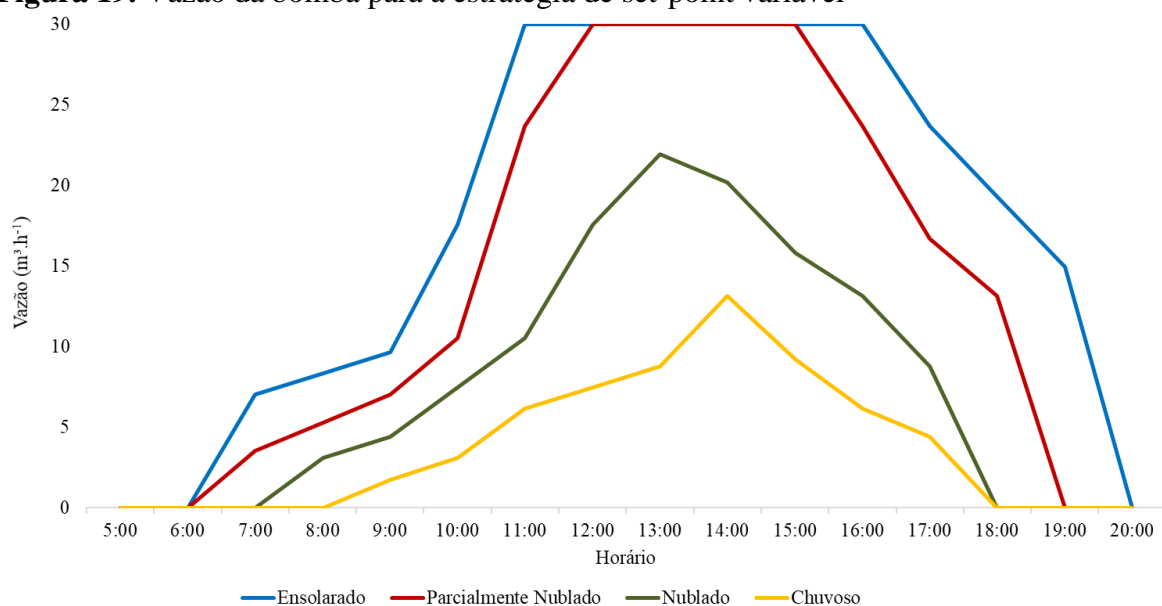
Horário	Ensolarado		Parcialmente nublado	
	Velocidade Média (rpm)	Vazão ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	Velocidade Média (rpm)	Vazão ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
5:00	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0
7:00	800	7	400	4
8:00	950	8	600	5
9:00	1100	10	800	7
10:00	2000	18	1200	11
11:00	3420	30	2700	24
12:00	3420	30	3420	30
13:00	3420	30	3420	30
14:00	3420	30	3420	30
15:00	3420	30	3420	30
16:00	3420	30	2700	24
17:00	2700	24	1900	17
18:00	2200	19	1500	13
19:00	1700	15	0	0
20:00	0	0	0	0
TOTAL DE VAZÃO ACUMULADA ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )		280		224

Fonte: O autor (2019).

**Tabela 13.** Ensaio para *set-point* variável para as condições climáticas nublado e chuvoso

Horário	Nublado		Chuvoso	
	Velocidade Média (rpm)	Vazão ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ )	Velocidade Média (rpm)	Vazão ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ )
5:00	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0
7:00	0	0	0	0
8:00	350	3	0	0
9:00	500	4	50	2
10:00	850	7	110	3
11:00	1200	11	250	6
12:00	2000	18	290	7
13:00	2500	22	150	9
14:00	2300	20	100	13
15:00	1800	16	90	9
16:00	1500	13	80	6
17:00	1000	9	30	4
18:00	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0
TOTAL DE VAZÃO ACUMULADA ( $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ )		123		60

Fonte: O autor (2019).

**Figura 19.** Vazão da bomba para a estratégia de *set-point* variável

Fonte: O autor (2019).



A Tabela 15 apresenta um comparativo entre as vazões para a estratégia de *set-point* fixo (em seu melhor desempenho) com os valores resultantes do ensaio utilizando estratégia de *set-point* variável. Utilizando a estratégia de *set-point* (velocidade) variável, houve ganhos para todas as condições climáticas, comparando com a estratégia de *set-point* fixo, já considerando o melhor desempenho para cada estratégia de *set-point* fixo.

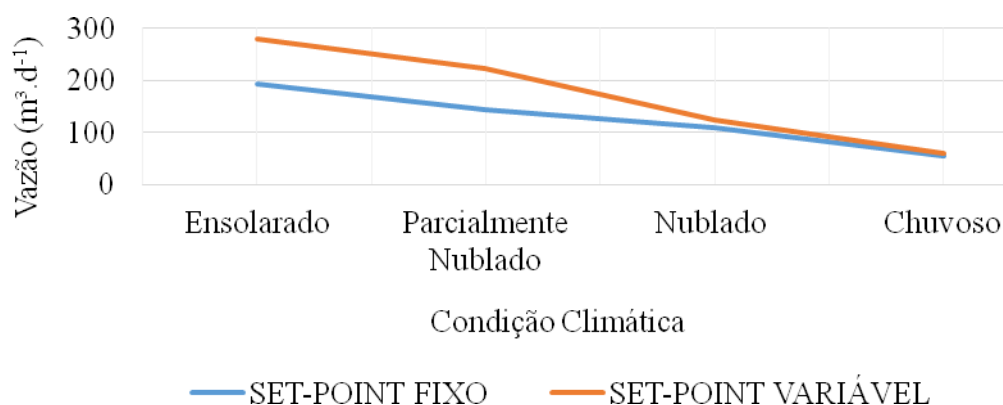
A estratégia de *set-point* (velocidade) variável aumentou a vazão em aproximadamente 45,83% para o clima ensolarado em comparação ao melhor desempenho para a estratégia de *set-point* fixo (2700 RPM), tendo alcançado uma melhoria de 55,55% para o clima parcialmente nublado.

A comparação dos resultados obtidos nos ensaios, utilizando a estratégia de velocidade fixa e de velocidade variável mostradas na Tabela 15 e na Figura 23, foi feita simultaneamente para cada uma das quatro condições climáticas (ensolarado, parcialmente nublado, nublado e chuvoso), dessa forma pode-se afirmar que as condições de irradiação eram idênticas. Assim, as coletas dos dados das duas estratégias de controle foram feitas nos mesmos dias já citados anteriormente: para a condição ensolarado, dia 06 de outubro de 2019; parcialmente nublado, dia 17 de novembro de 2019; nublado, dia 22 de dezembro de 2019; e chuvoso, dia 01 de dezembro de 2019.

**Tabela 14.** Comparação estratégia *set-point* fixo e variável

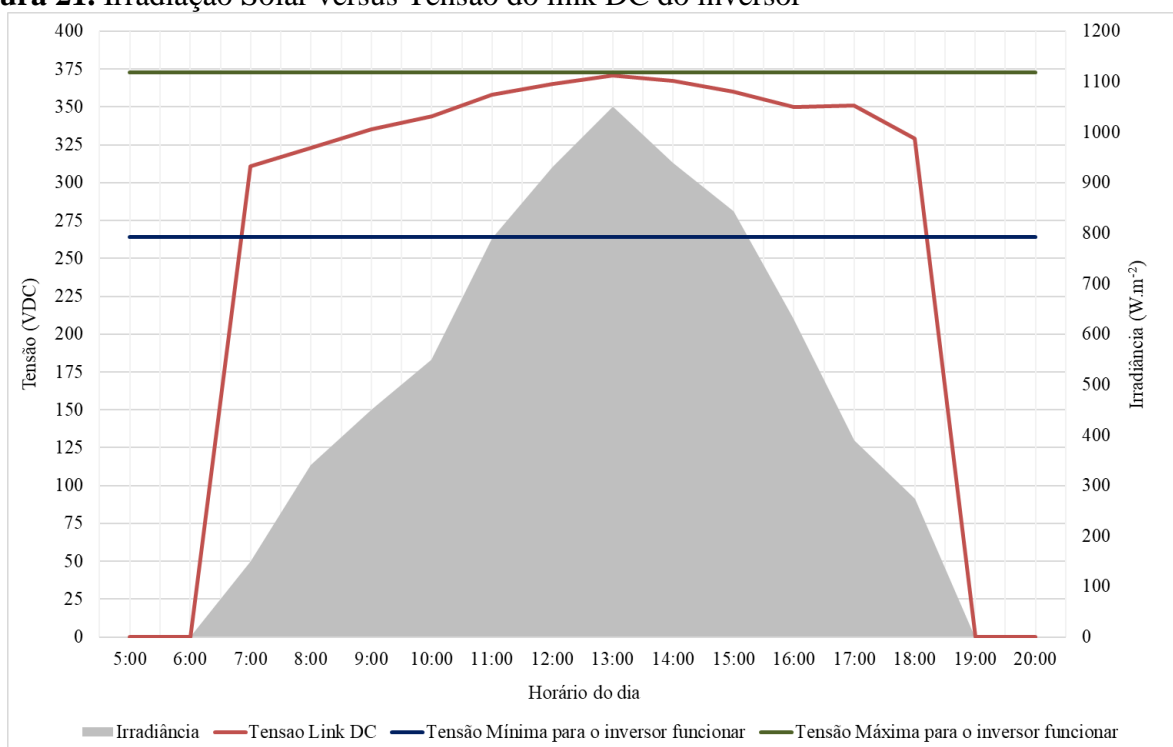
Clima	Vazão (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )		Diferença (%)
	Set-point fixo	Set-point variável	
Ensolarado	192 (2700 rpm)	280	45,83
Parcialmente nublado	144 (2700 rpm)	224	55,55
Nublado	108 (2000 rpm)	123	13,88
Chuvoso	55 (1300 rpm)	60	9,09

**Fonte:** O autor (2019).

**Figura 20.** Comparação entre estratégia *set-point* fixo e variável

Fonte: O autor (2019).

Observa-se na Figura 24 que a tensão do link DC do inversor varia conforme a irradiância. Com o aumento da irradiância, a tensão no link DC do inversor alcança o valor mínimo necessário, tendo o inversor energia suficiente para ativar seu chaveamento. Por característica do sistema fotovoltaico, a tensão na saída das placas varia pouco, entre 299 e 371Vcc (aproximadamente 24%).

**Figura 21.** Irradiação Solar versus Tensão do link DC do inversor

Fonte: O autor (2019).

Para esta aplicação, a variável de processo a ser controlada deve ser a tensão do barramento CC, que, por sua vez, é a mesma tensão de alimentação do CF. Esta variável foi escolhida porque o CF é programado para fornecer à motobomba sua frequência nominal de operação. Ou seja, se a potência que o gerador fotovoltaico estiver entregando não for suficiente para a motobomba operar nessa frequência, isto ocasionará uma queda de tensão no barramento CC, que resultará no desarme do equipamento por erro de subtensão.

No entanto, tendo a tensão do barramento CC como variável de processo, este fato não acontece, pois à medida que o CF for aumentando sua frequência de operação, que, por sua vez, ocasiona diminuição da tensão do barramento CC, o controlador PID atua reduzindo a frequência de operação do CF sempre que a tensão no barramento CC ficar abaixo do valor de *set-point* especificado. Porém, para que o PID atue desta forma, o parâmetro referente à sua ação de controle deve ser selecionado para a opção reverso.

### 3.3 AVALIAÇÃO DE CUSTOS

A avaliação de custos apresentada neste trabalho foi feita com o objetivo de comparar os custos de implementação do sistema na configuração pesquisada com os custos de um sistema de bombeamento de água que utilize uma bomba e um inversor de frequência específicos para sistema fotovoltaico, acoplado a uma motobomba de corrente contínua, pois, com relação a outras tecnologias, já existem na literatura estudos que comprovam que, sob certas circunstâncias, a opção fotovoltaica é a mais viável.

Alvarenga (2019) fez uma análise comparativa do custo do volume bombeado para diferentes tipos de tecnologia a saber: solar fotovoltaica, eólica (mecânica e elétrica) e diesel. Em média, para todos os sistemas estudados, num total de 14, o custo do volume bombeado com a tecnologia de geração a diesel chega a ser o dobro em relação à fotovoltaica. Haupenthal (2019) fez

uma análise econômica comparativa das opções de bombeamento de água com tecnologia elétrica convencional, solar fotovoltaica e a gasolina, demonstrando que no contexto atual já há significativo espaço para o emprego do bombeamento fotovoltaico.

Neste trabalho, estão sendo comparados dois sistemas de bombeamento que utilizam a mesma fonte de geração de energia, ou seja, energia fotovoltaica, mas que diferem dos demais equipamentos utilizados (inversor de frequência e motobomba). Neste caso, a variável que irá alterar a diferença entre os resultados obtidos será o custo por volume bombeado.

Como informação, quando for mencionado sistema de bombeamento fotovoltaico com conversor de frequência alternado (SBFCA), trata-se de um sistema que utiliza motobomba convencional com conversor de frequência convencional, parametrizado para operar com energia solar fotovoltaica, justamente o foco desta pesquisa; e quando for mencionado sistema de bombeamento fotovoltaico com conversor contínuo (SBFCC), trata-se de sistema que utiliza motobomba comercial desenvolvida especialmente para operar com energia solar fotovoltaica, o qual conta com um dispositivo de condicionamento de potência. O SBFCC escolhido foi o modelo SA 1500, da fabricante Solartronic (Figura 25). Este *kit* foi escolhido por conter uma motobomba de 0,75kW, mesma potência do sistema SBFCA.

**Figura 22.** *Kit* do Sistema de bombeamento Solartronic – SA 1500



**Fonte:** Solartronic (2020).

**Figura 23.** Exemplo de instalação *Kit* do sistema de bombeamento Solartronic – SA 1500



**Fonte:** Solartronic (2020).

A Tabela 16 descreve os custos individuais dos equipamentos para os dois sistemas (SBFCA e SBFCC). Os valores são referentes ao ano de 2020 foram coletados mediante elaboração de cotações com representantes locais dos fabricantes

**Tabela 15.** Custo dos equipamentos - valores referentes a 02/08/2020 (US\$ 1 = R\$ 5,29).

Tipo de sistema de bombeamento	Descrição do equipamento	Custo (US\$)
SBFCA	Mão de obra de montagem	U\$ 622
	Inversor de frequência ACS 880/ABB	U\$ 349
	Conjunto com 8 placas Canadian 335W	U\$ 2.504
	Motobomba BCS-220 0,75kW Schneider	U\$ 625
	Caixa <i>String Box</i> , chave seccionadora e Proteções com DPS CC	U\$ 50
	<b>Total</b>	<b>U\$ 4.150</b>
SBFCC	Mão de obra de montagem	U\$ 622
	Inversor de frequência Solartronic – SA 1500	U\$ 1.507
	Conjunto com 3 placas BYD 285W	U\$ 873
	Motobomba solar SQF 5A-6 0,75kW	U\$ 2.512
	Caixa <i>String Box</i> , chave seccionadora e Proteções com DPS CC	U\$ 50
	<b>Total</b>	<b>U\$ 5.750</b>

Fonte: O autor (2020).

O parâmetro de equalização dos dois sistemas (SBFCA e SBFCC) foi a potência do motobomba, já que, em ambos os sistemas, a motobomba é de 0,75kW. A tensão que a motobomba necessita para o SBFCA é de 380VAC trifásico, já para o SBFCC, a tensão é monofásica e pode variar entre 30 e 300VDC.

A Tabela 17 mostra o comparativo dos custos por volume bombeado, para a estratégia de velocidade fixa, considerando duas condições climáticas extremas, a ensolarada e a chuvosa.

Para fazer o comparativo, o valor total do custo encontrado na Tabela 16 foi dividido pela melhor vazão diária encontrada nos ensaios para a condição climática ensolarada e também para a condição chuvosa.

**Tabela 16.** Comparação do custo do volume bombeado – velocidade fixa

Tipo de sistema de bombeamento	Condição climática	Vazão (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )	US\$.m <sup>-3</sup> .d <sup>-1</sup>
SBFCA	Ensolarado	192 (2700 rpm)	21,61
	Chuvoso	55 (1300 rpm)	75,45
SBFCC	Ensolarado <sup>3</sup>	129 (3420 rpm)	44,57
	Chuvoso <sup>4</sup>	41 (3420 rpm)*	140,24

\* Foi considerada a velocidade nominal fixa de 3420 rpm.

Fonte: O autor (2020).

Comparando os valores presentes na Tabela 17, nota-se que o sistema SBFCA apresenta uma relação custo por volume bombeado 67% melhor para o clima ensolarado e 74% melhor para a condição climática chuvosa, em comparação com o sistema SBFCC. Nota-se que não há o valor do volume bombeado para a velocidade fixa de 1300 rpm na condição chuvosa, dada a característica de funcionamento do sistema SBFCC, que não trabalha com velocidade variável, sendo, assim, difícil fazer uma comparação mais precisa entre os sistemas.

A Tabela 18 mostra o comparativo dos custos por volume bombeado para a estratégia de velocidade variável para o sistema SBFCA e para a estratégia de velocidade fixa para o sistema SBFCC, também considerando duas condições climáticas extremas, a ensolarada e a chuvosa.

**Tabela 17.** Comparação do custo por volume diário bombeado – velocidade variável

Tipo de sistema de bombeamento	Condição climática	Vazão (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )	US\$.m <sup>-3</sup> .d <sup>-1</sup>
SBFCA	Ensolarado	280	14,82
	Chuvoso	60	69,16
SBFCC	Ensolarado <sup>3</sup>	129*	44,57
	Chuvoso <sup>4</sup>	41*	140,24

\* Foi considerada a velocidade nominal fixa de 3420 rpm.

Fonte: O autor (2020).

<sup>3</sup> Irradiância de referência 5kWh.m<sup>-2</sup>.dia.

<sup>4</sup> Irradiância de referência 1kWh.m<sup>-2</sup>.dia.

Dada a característica de funcionamento do sistema SBFCC que não trabalha com velocidade variável, torna-se difícil fazer a comparação entre os sistemas. Foi feita então uma comparação entre a estratégia de velocidade variável para o SBFCA, com a condição de velocidade fixa para o SBFCC. Na condição ensolarada, a estratégia de velocidade variável tem uma relação custo por volume diário bombeado 46% melhor em comparação com o SBFCC, utilizando estratégia de velocidade fixa. Para o clima chuvoso, a melhor relação do custo por volume diário bombeado é de 68%.

### **3.4 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Níveis elevados de irradiância se traduzem em aumento da temperatura e redução da tensão de circuito aberto dos módulos. Sugere-se, portanto, aprimorar o modo operacional, introduzindo um sistema de correção da tensão de operação em função da temperatura dos módulos fotovoltaicos.

Outra possibilidade a ser explorada seria testar novas configurações de programação do conversor de frequência, com o objetivo de acompanhar o ponto de máxima potência do arranjo fotovoltaico.

O desempenho global do sistema - conversor de frequência e motobomba convencional - pode ser melhorado substancialmente usando motobombas de elevada eficiência na região das alturas manométricas empregadas nestes ensaios.

Propõe-se também a instalação de mais sistemas em campo para serem avaliados em longo prazo, tendo como objetivos avaliar a apropriação da tecnologia, capacitar equipes técnicas e identificar problemas ainda não verificados no âmbito deste trabalho de pesquisa, pois, apenas assim, é possível desenvolver um processo seguro de difusão.



Para este projeto de pesquisa, foram analisadas apenas as condições elétricas do sistema, em uma bancada de laboratório, mas um oportuno cenário de estudos seria a avaliação do desempenho do sistema em campo, de forma a se obter a área a ser irrigada para uma determinada cultura, para diferentes tipos de solos e para as condições climáticas da região.

E por fim, propõe-se uma pesquisa com um inversor de frequência de baixo custo, da fabricante nacional Weg, sem o recurso de PID, para analisar os limites operacionais do sistema de bombeamento, reduzindo os custos de implementação de inversores convencionais ligados diretamente a bombas de corrente alternada, tendo como fonte de energia elétrica placas fotovoltaicas.

#### 4 CONCLUSÃO

Os ensaios feitos com um conversor de frequência convencional e uma motobomba convencional, associados a um gerador fotovoltaico, mostram a viabilidade técnica da utilização de equipamentos adquiridos no comércio local.

Neste trabalho, foram avaliadas duas formas de estratégia de operação, *set-point* (velocidade) fixo e variável. Para o caso do sistema operando com valor de *set-point* fixo, sua tensão deve corresponder a um valor que esteja dentro da faixa de operação admissível para o barramento CC, mas, em se tratando dos conversores de frequência da linha estudada neste projeto, o ABB ACS880 220V trifásico, a faixa de tensão corresponde a 264 – 373 VCC. Todavia, para alguns conversores de frequência, estes valores podem ser alterados.

Para situações com alto índice de nebulosidade, é recomendado que o sistema opere com um valor de *set-point* menor. Isto tem como objetivo minimizar as chances de o sistema vir a desarmar devido à passagem de nuvens. Contudo, deve-se tomar cuidado para que a tensão de circuito aberto

formado no gerador não ultrapasse o limite máximo de tensão admissível para o barramento CC, sob o risco de danificar o equipamento.

No decorrer da pesquisa, pôde-se constatar que o conversor de frequência é o elemento chave para a operação otimizada do sistema. Sua parametrização é relativamente simples, pois, em suma, consiste em habilitar o controlador PID e configurar a entrada e saída analógicas para fazer o sistema operar em malha fechada.

A maior dificuldade está na determinação dos parâmetros de sintonia do controlador PID para proporcionar a operação estável do sistema durante todo seu ciclo de bombeamento. Esses parâmetros devem ser determinados considerando apenas as ações de controle proporcional e integral, pois é nesta situação que o sistema apresentou melhor desempenho.

Quando implementada a estratégia de um sistema de controle variável do *set-point* (velocidade), o sistema de bombeamento diminuiu o chaveamento sucessivo do CF e, conseqüentemente, da motobomba, no nascer e no pôr do Sol, quando o nível de irradiância é insuficiente para o sistema entrar ou permanecer em operação. A estratégia de *set-point* (velocidade) variável aumentou a vazão para todas as condições de clima - ensolarado, parcialmente nublado, nublado e chuvoso - quando comparado com a estratégia de *set-point* fixo.

Por fim, este trabalho de pesquisa deu origem a uma bancada de ensaio de sistemas de bombeamento fotovoltaico. Esta bancada se mostrou uma ferramenta muito útil para realização de ensaios, com o problema da restrição de alturas manométricas não permitindo um diagnóstico completo do sistema.

Em se tratando da avaliação técnica e econômica do sistema de bombeamento fotovoltaico com conversor de frequência, pode-se constatar que, para todos os sistemas ensaiados, os valores de custo por volume bombeado representam ganhos significativos em relação a um sistema de bombeamento fotovoltaico composto por equipamentos dedicados a este tipo de aplicação. Ou seja, o sistema é economicamente competitivo.

## 5 REFERÊNCIAS

ALVARENGA, A. C.; FERREIRA, V. H.; FORTES, M. Z. Energia solar fotovoltaica: uma aplicação na irrigação da agricultura familiar. Sinergia, São Paulo, v. 15, n. 4, p. 311-318, out/dez. 2014.

BORGES, C.G.R.; SERA, A.S. Dimensionado mediante simulación de sistemas de energía solar fotovoltaica aplicados a la electrificación rural. Ingeniería Mecánica v.14, nº 1, 2011, p.13-21.

BRITO, A. U.; ZILLES, R. Systematized Procedure for Parameter Characterization of a Variable-speed Drive Used in Photovoltaic Pumping Applications. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, V.14, n.3, p.249-260, 2018.

FAHRENBRUCH, Alan; BUBE, Richard. Fundamentals of solar cells: photovoltaic solar energy conversion. Elsevier, 2012.

HAUPENTHAL, Soni Willian et al. Utilização de um sistema fotovoltaico amorfo em sistema de irrigação por microaspersão. 2019.

MALTHUS, Thomas Robert. An essay on the principle of population, as it affects the future improvement of society. With remarks on the speculations of mr. Godwin, m. Condorcet, and other writers. By TR Malthus. 1817.

MME- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Manual de Projetos Especiais. [S.l.: s.n.].Disponível

em:<[https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Manual\\_de\\_Projetos\\_Especiais2011-2014.pdf/](https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Manual_de_Projetos_Especiais2011-2014.pdf/)>. Acesso em: 10 jun 2020.

NUNES, B.; BENNETT, D.; MARQUES JUNIOR, S. Sustainable agricultural production: an investigation in Brazilian semi-arid livestock farms. *Journal of Cleaner Production*, v. 64, p. 414-425, Jun 10 2020. ISSN 0959-6526; 1879-1786. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000329595700038 >. Acesso em 09 de jun. 2020.

REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st century, *Renewables 2019 - Global Status Report*, [www.ren21.net](http://www.ren21.net)

REZA, SM Shamim; SARKAR, Nazmul Islam. Design and performance analysis of a directly-coupled solar photovoltaic irrigation pump system at Gaibandha, Bangladesh. In: *Green Energy and Technology (ICGET), 2015 3rd International Conference on*. IEEe, 2015. p. 1-6.

SCHNEIDER, Francielle Pareja et al. Comparação de sistemas de geração de energia utilizando gerador a diesel e painéis fotovoltaicos para áreas rurais isoladas. 2019.

## APÊNDICE

Relação dos principais parâmetros de controle necessários para operar com o conversor de frequência, modelo ACS880 da ABB, com tensão constante fornecida por um gerador fotovoltaico.

<b>PARÂMETRO</b>	<b>NOME</b>	<b>VALOR</b>
13.12	AO1 source	7
13.17	AO1 source min	299
13.18	AO1 source max	371
13.19	AO1 out at AO1 src min	0
13.20	AO1 out at AO1 src max	10
22.41	Speed ref safe	3420
30.11	Minimum speed	0
30.12	Maximum speed	3420
12.17	AII min	0
12.18	AII max	10
12.19	AII scaled at AII min	0
12.20	AII scaled at AII max	3420
19.01	Actual operation Mode	2
40.43	Nível dormir	0
40.44	Sleep delay	5
40.45	Sleep boost time	0
40.46	Sleep boost step	0
40.47	Wake-up deviation	0
40.48	Atraso despertar	0.5
40.49	Tracking mode	Off
95.01	Tensão de Alimentação	1
95.04	Control board supply	0
96.01	Language	2070
99.03	Motor type	0
99.04	Motor ctrl mode	0
99.06	Motor nominal current	4.6
99.07	Motor nominal voltage	220
99.08	Motor nominal Frequency	60
99.09	Motor nominal Speed	3420
99.10	Motor nominal power	0.736
99.11	Motor nominal cosfii	0.78
46.01	Speed scaling	3420