

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO -
CAMPUS RIO VERDE**

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E
SUSTENTABILIDADE**

**MODELAGEM DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO
FOTOVOLTAICO EM CORRENTE ALTERNADA PARA IRRIGAÇÃO**

Orientador: Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior

Discente: Amanda Angélica Rodrigues Paniago

RIO VERDE – GO

SETEMBRO – 2022

AMANDA ANGÉLICA RODRIGUES PANIAGO

**MODELAGEM DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO
FOTOVOLTAICO EM CORRENTE ALTERNADA PARA IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada à banca examinadora como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE em ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, do 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).

Orientador: Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior

**RIO VERDE – GO
SETEMBRO – 2022**

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

PP192m Paniago, Amanda Angélica Rodrigues
Modelagem de sistemas de bombeamento fotovoltaico em corrente alternada para irrigação / Amanda Angélica Rodrigues Paniago; orientador João Areis Ferreira Barbosa Junior; co-orientador Édio Damasio da Silva Junior. -- Rio Verde, 2022.
98 p.

Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2022.

1. Energia solar. 2. Conversor CC-CA. 3. Implementação computacional. 4. Bombas hidráulicas. I. Barbosa Junior, João Areis Ferreira, orient. II. Silva Junior, Édio Damasio da, 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, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

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

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;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, 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;
- Que 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.

Local / /
Data

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 1/2022 - GEXT-RV/DEXT-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Unidade do IF Goiano:	Campus Rio Verde	
Programa de Pós-Graduação:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Defesa de:	Dissertação	Defesa de número: 48
Data: 27/07/2022	Hora de início: 09:00h	Hora de encerramento: 12:00h
Matrícula do discente:	2020102331440021	
Nome da discente:	Amanda Angélica Rodrigues Paniago	
Título do trabalho:	Modelagem de sistemas de bombeamento fotovoltaico em corrente alternada para irrigação	
Orientador:	João Areis Ferreira Barbosa Júnior	
Área de concentração:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Linha de Pesquisa:	Eficiência Energética e Sustentabilidade	
Projeto de pesquisa de vinculação		

Titulação:	Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade
------------	--

Nesta data, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora, Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior (Presidente da banca), Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira (Avaliador Externo), Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira (Avaliador Interno) sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada por vídeo conferência via Google Meet à distância, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de Mestrado, de autoria de AMANDA ANGÉLICA RODRIGUES PANIAGO, 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, João Areis Ferreira Barbosa Júnior, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida o(a) autor (a) da dissertação para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), 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**. 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, esta ata 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 Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Decisão da banca: Aprovada

Esta defesa é parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna do IFGoiano.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Geraldo Andrade de Oliveira**, Geraldo Andrade de Oliveira - Professor Colaborador - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Ifg (1), em 27/07/2022 20:32:31.
- **Marconi Batista Teixeira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 27/07/2022 17:37:29.
- **Joao Areis Ferreira Barbosa Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 27/07/2022 17:35:37.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 27/07/2022. 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: 410782
Código de Autenticação: 171e768eb5



Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3620-5600

Dedico este trabalho à minha família e amigos,
por todo amor e confiança.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela minha saúde e discernimento.

A esta instituição, ao Programa de Pós-Graduação e ao seu corpo docente pelo conhecimento e oportunidade a mim concedida

Ao meu orientador João Areis pela confiança e paciência.

Aos meus colegas de trabalho pela compreensão e incentivo.

Aos meus amigos pelos momentos de descontração e diversão.

A minha família por todo o apoio e carinho.

A minha avó Maria Helena por ter me mostrado o valor da vida e da família, especialmente no último ano.

A minha mãe Cristiane pelo amor incondicional e amparo nos momentos que mais precisei.

Ao meu amor Márcia por estar sempre ao meu lado, pelo incentivo nos momentos de aflição e pela dedicação nos momentos de incerteza.

“Não é da minha natureza cair sem lutar.
Mesmo quando as coisas parecem ser
insuperáveis”

(Suzane Collins)

RESUMO

A demanda mundial por alimentos tem aumentado devido ao crescimento populacional. A produção agrícola, deve criar subsídios para o atendimento da demanda requerida, através do aumento da eficiência de produção. Neste sentido, soluções de irrigação que preservem o meio ambiente e que utilizem menos água devem ser adotadas, na tentativa de fomentar um desenvolvimento sustentável para o setor. Os sistemas fotovoltaicos têm sido muito utilizados como fonte de energia em unidades rurais, por ser renovável, limpa e acessível. Assim, é possível levar energia elétrica a locais remotos, sem a necessidade de criação de novas redes elétricas rurais ou queima de combustíveis fósseis, a exemplo do diesel. Deste modo, a energia elétrica produzida por uma usina fotovoltaica, fonte alternativa de energia, é usada para fornecer energia para bombas hidráulicas, componente fundamental dos sistemas de irrigação. Como os módulos fotovoltaicos convertem a irradiação solar em energia em corrente contínua, convém a conexão de bombas alimentadas por motores de corrente contínua, devido principalmente a facilidade de instalação e concepção. Entretanto, a substituição dessa topologia por uma que utilize motores de indução, mostra-se bastante atrativa, já que são consideravelmente mais acessíveis em âmbito nacional do que motores de corrente contínua. Outra vantagem se refere a frequente substituição de escovas requeridas pelos motores de corrente contínua, representando elevados gastos com manutenção e redução da vida útil do sistema. Evidentemente, quando os motores de indução são utilizados, uma unidade de condicionamento de energia deve ser instalada. Esta é responsável por converter a energia do arranjo fotovoltaico em corrente contínua para corrente alternada, possibilitando a conexão do motor de indução. O emprego de inversores de frequência convencionais pode representar outra vantagem, tendo em vista a facilidade de manutenção e acesso a mão de obra especializada. A implementação de modelos matemáticos e computacionais, para análise e compreensão dessa tecnologia, é de suma importância para a previsão do comportamento do sistema mediante a mudança dos valores das variáveis de entrada, permitindo a descrição da resposta do conjunto antes mesmo da instalação prática. Essa dissertação propôs a implementação computacional de um sistema de bombeamento solar utilizando motor de indução e conversor de frequência convencional para aplicação em irrigação utilizando inversor de frequência para alimentação de uma bomba hidráulica convencional. Sendo assim, o trabalho realizou a caracterização dos componentes do sistema, a demonstração de um exemplo de dimensionamento para irrigação, a parametrização do modelo computacional e a obtenção de resultados de simulação satisfatórios para a faixa de velocidades rotacionais menores do que a nominal.

Palavras-chave: Energia solar; Conversor CC-CA; Implementação computacional, Bombas hidráulicas.

ABSTRACT

The world demand for food has increased due to population growth. Agricultural production must create subsidies to meet the required demand, through increased production efficiency. In this sense, irrigation solutions that preserve the environment and use less water should be adopted, in an attempt to promote sustainable development for the sector. Photovoltaic systems have been widely used as a source of energy in rural units, as they are renewable, clean and affordable. Thus, it is possible to take electricity to remote locations, without the need to create new rural electrical networks or burning fossil fuels, such as diesel. In this way, the electrical energy produced by a photovoltaic plant, an alternative source of energy, is used to supply energy for hydraulic pumps, a fundamental component of irrigation systems. As photovoltaic modules convert solar radiation into direct current energy, it is advisable to connect pumps powered by direct current motors, mainly due to the ease of installation and design. However, the replacement of this topology by one that uses induction motors is quite attractive, since they are considerably more accessible nationwide than direct current motors. Another advantage refers to the frequent replacement of brushes required by direct current motors, representing high maintenance costs and reduced system life. Of course, when induction motors are used, a power conditioning unit must be installed. This is responsible for converting the energy of the photovoltaic array into direct current to alternating current, enabling the connection of the induction motor. The use of conventional frequency inverters can represent another advantage, in view of the ease of maintenance and access to specialized labor. The implementation of mathematical and computational models, for the analysis and understanding of this technology, is of paramount importance for predicting the behavior of the system by changing the values of the input variables, allowing the description of the response of the set even before the practical installation. This dissertation proposed the computational implementation of a solar pumping system using an induction motor and a conventional frequency converter for application in irrigation using a frequency inverter to supply a conventional hydraulic pump. Therefore, the work carried out the characterization of the system components, the demonstration of an example of dimensioning for irrigation, the parameterization of the computational model and obtaining satisfactory simulation results for the range of rotational speeds lower than the nominal.

Keywords: Solar energy; DC-AC converter; Computational implementation, Hydraulic pumps.

SUMÁRIO

Resumo	v
Abstract	vi
Lista de tabelas	viii
Lista de figuras	ix
Lista de abreviaturas	xi
Lista de símbolos	xiii
1 Introdução.....	1
2 Objetivos	17
3 Referências Bibliográficas	18
4 Capítulo 1 – Artigo 1.....	23
5 Capítulo 2 – Artigo 2.....	62
6 Considerações Finais.....	97
7 Anexos.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Evapotranspiração de referência (ET _o), em mm/dia	43
Tabela 4.2 – Valores médios de turno de rega (TR), tensão crítica de água no solo (T _s), coeficiente da cultura (K _c) e profundidade efetiva do sistema radicular do tomateiro (Z).....	43
Tabela 4.3 – Sugestão de turno de rega (dias) para o tomateiro irrigada por gotejamento	45
Tabela 4.4 – Dimensionamento das linhas laterais (LL)	50
Tabela 4.5 – Dimensionamento das linhas de derivação (LD).....	50
Tabela 4.6 – Perda de carga da linha principal (LP)	51
Tabela 4.7 – Perda de carga na tubulação de recalque (TR)	51
Tabela 4.8 – Altura manométrica total (H _m)	52
Tabela 4.9 – Dados técnicos da motobomba	53
Tabela 4.10 – Características do sistema fotovoltaico	55
Tabela 4.11 – Estimativa de custo de implantação do sistema (US\$ 1 = R\$ 5,25).....	55
Tabela 4.12 - Fatores considerados para viabilidade econômica para sistemas de irrigação por gotejamento	56
Tabela 4.13 – Custos e receita do sistema de irrigação por gotejamento por hectare (fonte de energia por gerador a diesel)	57
Tabela 4.14 – Custos e receita do sistema de irrigação por gotejamento por hectare (fonte de energia por gerador fotovoltaico)	57
Tabela 5.1 – Dados do módulo fotovoltaico.....	68
Tabela 5.2 – Dados técnicos do motor de indução	74
Tabela 5.3 – Valores de eficiência e fator de potência do motor de indução	74
Tabela 5.4 – Variáveis e parâmetros de entrada dos subsistemas	76
Tabela 5.5 – Valores considerados de rotação e irradiação solar	77
Tabela 5.6 – Valores de pico de irradiação para as condições de entrada.....	78
Tabela 5.7 – Relação de grandezas, símbolos e unidades simuladas	80
Tabela 5.8 – Resultados de simulação de vazão instantânea.....	91
Tabela 5.9 – Vazão acumulada diária para diversas condições de irradiação.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Tipos de irrigação superficial.....	7
Figura 1.2 – Exemplo de irrigação por aspersão	7
Figura 1.3 – Exemplo de irrigação localizada	8
Figura 1.4 – Exemplo de subirrigação.....	8
Figura 1.5 – Diagrama de um sistema de bombeamento de água FV-CC.....	9
Figura 1.6 – Diagrama de um sistema de bombeamento de água FV-CA	10
Figura 1.7 – Diagrama de um sistema de bombeamento de água com banco de baterias.....	10
Figura 1.8 – Total diário da irradiação global horizontal (média anual típica – Wh/m ² /dia)...	11
Figura 1.9 – Tipos de células de silício	12
Figura 1.10 – Sistema de bombeamento.....	13
Figura 1.11 – Tipos de motores de indução.....	15
Figura 1.12 – Exemplos de bombas dinâmicas e de deslocamento positivo.....	16
Figura 1.13 – Configuração básica de um conversor CC-CA estático trifásico.....	17
Figura 4.1 – Diagrama de domínios do sistema de bombeamento fotovoltaico.....	27
Figura 4.2 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.....	28
Figura 4.3 – Curva I-V de um módulo fotovoltaico.....	30
Figura 4.4 – Efeito das condições atmosféricas na curva I-V	31
Figura 4.5 – Circuito básico de um inversor CC/CA	32
Figura 4.6 – Curva típica de conjugado <i>versus</i> velocidade de um motor de indução	33
Figura 4.7 – Circuito equivalente do motor de indução	35
Figura 4.8 - Local de instalação do sistema de irrigação.....	38
Figura 4.9 – Irradiação solar no plano horizontal para Rio Verde - GO.....	39
Figura 4.10 – Temperatura média compensada mensal em Jataí – GO	40
Figura 4.11 – Umidade relativa do ar compensada mensal em Jataí – GO.....	40
Figura 4.12 – Exemplo de cultivo do tomate.....	41
Figura 4.13 – Diagrama de plantio	47
Figura 4.14 – Detalhe de espaçamentos das culturas e emissores.....	48
Figura 5.1 – Diagrama de modelagem computacional	67
Figura 5.2 – Arranjo fotovoltaico em estudo.....	68
Figura 5.3 – Curva I-V e P-V do arranjo modelado	69
Figura 5.4 – Tensão (V _{pv}) e corrente (I _{pv}) para degrau de irradiação	69
Figura 5.5 – Pontos de operação referentes a simulação.....	70

Figura 5.6 – Diagrama elétrico de um inversor de frequência	71
Figura 5.7 – Exemplo de sinal de comparação SPWM	71
Figura 5.8 – Diagrama de teste do controle de velocidade.....	73
Figura 5.9 – Teste do controle de velocidade	73
Figura 5.10 – Curva vazão <i>versus</i> altura manométrica	75
Figura 5.11 – Curva vazão <i>versus</i> potência hidráulica.....	75
Figura 5.12 – Diagrama dos casos de estudo.....	77
Figura 5.13 – Resultados para o caso E100.....	82
Figura 5.14 – Resultados para o caso E80.....	83
Figura 5.15 – Resultados para o caso E60.....	84
Figura 5.16 – Resultados para o caso N100	85
Figura 5.17 – Resultados para o caso N80	86
Figura 5.18 – Resultados para o caso N60	87
Figura 5.19 – Resultados para o caso C100	88
Figura 5.20 – Resultados para o caso C80	89
Figura 5.21 – Resultados para o caso C60	90
Figura 5.22 – Comparação de valores simulados com valores experimentais	91

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>a-Si</i>	- Silício amorfo
ANA	- Agência Nacional de Águas
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
BA	- Bomba d'água
CA	- Corrente Alternada
CC	- Corrente Contínua
CRESESB	- Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
FP	- Fator de Potência
FV	- Fotovoltaico
GD	- Geração Distribuída
IF	- Inversor de frequência
I-V	- Corrente-Tensão
IGBT	- Transistores Bipolares de Gatilho Isolado. Do inglês, <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
LC	- Filtro Indutivo-Capacitivo
LD	- Linha de derivação
LL	- Linha lateral
LP	- Linha principal
LEPA	- Aplicação Precisa com Baixo Consumo de Energia. Do inglês, <i>Low Energy Precision Application</i>
<i>m-Si</i>	- Monocristalino
MI	- Motor de indução
MOSFET	- Transistor de Efeito de Campo Semicondutor de Óxido Metálico. Do inglês, <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MPP	- Ponto de Máxima Potência. Do inglês, <i>Maximum Power Point</i>
MPPT	- Rastreamento do Ponto de Máxima Potência. Do inglês, <i>Maximum Power Point Tracking</i>
NREL	- Laboratório Nacional de Energia Renovável (EUA). Do inglês, <i>National Renewable Energy Laboratory</i>
<i>p-Si</i>	- Policristalino
P-V	- Potência-Tensão
PWM	- Modulação por Largura de Pulso. Do inglês, <i>Pulse Width Modulation</i>
RE	- Reservatório elevado

SPWM	- Modulação por Largura de Pulso Senoidal. Do inglês, <i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>
STC	- Condições Normais de Teste. Do inglês, <i>Standard Test Conditions</i>
TA	- Tubulação de alimentação
TR	- Tubulação de recalque
TS	- Tubulação de sucção

LISTA DE SÍMBOLOS

I_{pv}	- Corrente de saída do arranjo fotovoltaico
V_{pv}	- Tensão de saída do arranjo fotovoltaico
R_s	- Resistência paralela ou <i>shunt</i>
R_p	- Resistência série
I_{ph}	- Corrente fotovoltaica
I_d	- Corrente na junção p-n
I_p	- Corrente <i>shunt</i>
N_s	- Número de células associadas em série
n_s	- Velocidade síncrona
p	- Número de polos do motor
f_e	- Frequência do estator
f_r	- Frequência do rotor
n	- Velocidade do rotor
s	- Escorregamento do motor
I_0	- Corrente de saturação reversa do diodo
q	- Carga do elétron
k	- Constante de Boltzmann
T	- Temperatura do módulo
η_d	- Fator de idealidade do diodo
$I_{ph(STC)}$	- Corrente fotovoltaica no STC
k_I	- Coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito
ΔT	- Gradiente de temperatura do módulo
$T_{(STC)}$	- Temperatura no STC
G	- Irradiação incidente sobre o módulo
$G_{(STC)}$	- Irradiação no STC
$I_{0(STC)}$	- Corrente saturação reversa do diodo no STC
E_g	- Energia do gap para o silício
I_{SC}	- Corrente de curto-circuito
V_{OC}	- Tensão de circuito aberto
P_{mp}	- Potência nominal do módulo fotovoltaico

V_{mp}	- Tensão nominal do módulo fotovoltaico
I_{mp}	- Corrente nominal do módulo fotovoltaico
V_{ac}	- Tensão de saída do inversor de frequência
I_{ac}	- Corrente de saída do inversor de frequência
Q	- Vazão d'água
C	- Conjugado ou torque mecânico
C_p	- Conjugado com rotor bloqueado
$C_{máx}$	- Conjugado máximo
$C_{mín}$	- Conjugado mínimo
C_n	- Conjugado nominal
P	- Pressão hidráulica
E	- Tensão de entrada do inversor de frequência
i_s	- Corrente de entrada do inversor de frequência
$i_{A,B,C}$	- Correntes trifásicas de saída do inversor
P_1	- Potência elétrica consumida pelo motor
P_2	- Potência transferida ao eixo do motor
P_3	- Potência de acionamento da bomba
P_4	- Potência hidráulica entregue pela bomba
R_1	- Resistência efetiva do estator
X_1	- Reatância de dispersão do estator
R_c	- Resistência de perdas no núcleo
X_m	- Reatância de magnetização
R_2	- Resistência do rotor referida
X_2	- Reatância de dispersão do rotor referida
H_m	- Altura manométrica
z_1	- Cota geométrica no ponto inicial do sistema de recalque
z_2	- Cota geométrica no ponto final do sistema de recalque
H_g	- Altura geométrica entre dois pontos do sistema de recalque
Δh	- Perda de carga nas tubulações que interligam dois pontos
P_H ou P_{hid}	- Potência hidráulica
H	- Altura útil do sistema de bombeamento
γ	- Peso específico da água
η_b	- Rendimento da bomba

η_M	- Rendimento do motor elétrico
η	- Rendimento do conjunto motor-bomba
P_b	- Potência absorvida pela bomba
f_{sw}	- Frequência de chaveamento
T_{sw}	- Período de chaveamento
V_{ref}	- Sinal de referência senoidal
V_p	- Onda portadora de alta frequência
f_{el}	- Frequência elétrica
V_a	- Tensão de armadura do motor
P_n	- Potência nominal do motor
n_n	- Rotação nominal do motor
V_n	- Tensão nominal do motor
I_n	- Corrente nominal do motor
I_p	- Corrente de partida do motor
C_{in}	- Conjugado de partida do motor
J	- Momento de inércia do motor
t_{stop}	- Tempo de simulação
ET_o	- Evapotranspiração de referência
K_c	- Coeficiente da cultura
ET_c	- Evapotranspiração da cultura
TR	- Turno de rega
Z	- Profundidade radicular da cultura
LTN	- Lâmina total de água
V_t	- Volume total de água
T_i	- Tempo de irrigação
J	- Perda de carga unitária
F	- Fator de correção de Christiansen
m	- Constante de Blasius

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

A insegurança alimentar é uma realidade eminente, estima-se que uma a cada nove pessoas não possuem acesso a alimentação adequada. Ainda existem pessoas sem acesso a proteína e energia em quantidades suficientes para uma correta nutrição corporal. Deste modo, um grande desafio mundial é a manutenção da oferta de alimentos mesmo com a perspectiva de crescimento populacional para as próximas décadas. Estima-se que até 2050 a população mundial ultrapassará a marca de 9,5 bilhões de pessoas. Adicionalmente, o enriquecimento da população implica no aumento do consumo de alimentos, já que o poder de compra se eleva. Assim, os produtores rurais estão enfrentando uma maior concorrência por terra, água e energia (GODFRAY et al., 2010; SAATH; FACHINELLO, 2018).

Além disso, emerge a necessidade de minimizar os impactos negativos que a produção de alimentos traz ao meio ambiente. O escopo de todos esses problemas é a ameaça de efeitos de mudanças climáticas, alto consumo de água, emissões de gases de efeito estufa e preocupações sobre como medidas de mitigação podem afetar o sistema alimentar conhecido. Com isso, torna-se claro o desafio: atender rapidamente à demanda por alimentos, preservando o meio ambiente e a sociedade, de forma a contemplar toda a população, retirando as pessoas mais pobres da situação de desnutrição (GUPTA et al., 2020).

Dentre as várias alternativas para o atendimento dos desafios da demanda global por alimentos, pode-se destacar a produção por irrigação. Esta é uma prática indispensável para a agricultura moderna, sendo fundamental para a viabilização da produção agrícola em regiões de escassez de água, ao longo de todo o ano, como no semiárido brasileiro, ou durante estações específicas, como na região central do país durante os meses de seca. Deste modo, o plantio de algumas culturas só é possível graças a aplicação suplementar de água, nos meses que apresentam baixos índices de precipitação. Apesar do crescimento dessa atividade implicar no alto consumo de água, nota-se benefícios como o aumento da produtividade e da garantia na oferta de alimentos,

minimizando assim as perdas produtivas devido a seca. A irrigação também oferece estabilidade da oferta de alimentos, contribuindo para a segurança alimentar e nutricional da população brasileira. Com intuito de melhorar a gestão dos recursos hídricos e permitir o uso racional da água, medidas legais e administrativas são exigidas. Desta forma, ações que fomentem a sustentabilidade, aumento da eficiência e redução do desperdício mostram-se cada vez mais necessárias (ANA, 2017; GARCIA; VILPOUX; CEREDA, 2018).

Levando em conta os desafios no atendimento ao aumento da demanda por alimentos, e ainda, considerando o avanço da modernização da agroindústria, o uso de novas tecnologias e soluções em automação exige a oferta de energia elétrica de forma confiável e barata. No Brasil especificamente existem ainda áreas remotas sem acesso a eletricidade, a exemplo de algumas regiões do Mato Grosso do Sul. Nestes casos, a geração distribuída (GD), juntamente com a utilização de fontes renováveis, tornam-se uma solução para a otimização e crescimento da agricultura regional. Dentre essas fontes pode-se citar a biomassa da cana-de-açúcar e a energia solar fotovoltaica (GARCIA; VILPOUX; CEREDA, 2018).

Diante do exposto, a utilização da energia solar fotovoltaica como fonte de energia elétrica em sistema de bombeamento de água, tem se tornado cada vez mais frequente, especialmente para aplicações de irrigação. Os sistemas de bombeamento solar se mostram uma boa alternativa às bombas d'água movidas a grupos motor-gerador diesel ou alimentadas pela rede elétrica convencional da concessionária. Considerando que os combustíveis fósseis são fontes de energia não renováveis e poluentes, e que os custos para utilização de energia elétrica para irrigação tendem a aumentar cada vez mais, pode-se destacar a grande importância que a energia solar fotovoltaica representa ao futuro do setor agrícola. Em regiões que apresentam abundância de irradiação solar e indisponibilidade das redes de transmissão elétrica as vantagens da utilização do bombeamento solar tornam-se ainda mais evidentes (SONTAKE; KALAMKAR, 2016).

A topologia que possui o motor de corrente contínua (CC) acoplado diretamente ao painel fotovoltaico para o bombeamento de água é bastante usual. Esse tipo de instalação permite *strings* de painéis menores e maior simplicidade de implementação. Por outro lado, a intermitência da geração mostra-se uma desvantagem dessa tecnologia, já que a entrega de água é interrompida sob baixa radiação ou durante a noite. O uso de baterias pode ser uma solução, no entanto, sua utilização afeta diretamente a vida útil e custos de manutenção do sistema (FILHO et al., 2018; KUMAR; SINGH, 2019).

O uso de motores CC é mais comum para sistemas de bombeamento fotovoltaico de baixa potência. Esse tipo de motor utiliza escovas, geralmente feitas de carvão, para permitir o contato da alimentação elétrica com a parte rotativa da máquina. O uso de escovas implica em baixa eficiência de conversão, e requerem manutenção regular devido aos contatos deslizantes com comutador. À medida que o motor CC aciona a bomba, a exigência do torque varia de acordo com a velocidade em que é acionada. Como a energia fornecida pelo gerador fotovoltaico é não linear, geralmente o conjunto motor-bomba não opera no ponto ótimo de potência, independentemente do nível de insolação ao qual está submetido. Por isso, a aplicação de um conversor de potência controlado por algoritmos de rastreamento da máxima potência (MPPT) podem ser aplicados, com o intuito de elevar os níveis de conversão e entregar maior confiabilidade ao sistema. No entanto, para alguns casos, a cuidadosa seleção do motor CC e da bomba podem fornecer sistemas eficientes, simples e econômicos (ALGHUWAINEM, 1992; HAMILTON, 2000; KUMAR; SINGH, 2017).

Desta forma, sistemas de bombeamento solar que utilizam conjuntos motor-bomba equipados com motores de indução são propostos (ERROUHA et al., 2019; KHAN; SHUKLA; SINGH, 2019; MISHRA; SINGH, 2017). Sua topologia utiliza um conversor de frequência acoplado ao barramento CC da *string* de painéis fotovoltaicos, permitindo assim a alimentação do motor de indução CA. Um sistema baseado em motor de indução é mais confiável, robusto, exige pouca manutenção, possui melhor eficiência e oferece mais flexibilidade para controle em comparação com motores CC (JAIN et al., 2015). No Brasil, boa parte das bombas CC utilizadas para irrigação são importadas, logo, existe certa dificuldade de manutenção, especialmente em relação a reposição de peças e mão de obra especializada. Assim, problemas relacionados ao acesso a assistência técnica, alto custo de manutenção e baixa vida útil do sistema são compensados.

Campos (2020) propõe uma alternativa ao uso de inversores convencionais alimentados em CC, sendo utilizados em bombas alimentadas por motor de indução. No entanto, com o intuito de difundir essa alternativa tecnológica para uso comercial em larga escala, algumas questões ainda devem ser respondidas, dentre estas: a compreensão do comportamento do sistema frente as diferentes condições de radiação e as consequências da variação de frequência de operação do inversor.

Para estudar os conversores eletrônicos para sistemas fotovoltaicos e suas aplicações, deve-se primeiro modelar matematicamente esses dispositivos. O modelo matemático do sistema fotovoltaico pode ser útil na análise dinâmica de conversores, no

estudo de algoritmos de rastreamento de máxima potência e principalmente para simular o comportamento do sistema e seus componentes usando simuladores computacionais, sendo possível assim prever as suas principais características de funcionamento (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009a).

Visando contornar estas limitações, surge a presente pesquisa que pretende propor um modelo no domínio do tempo para implementação computacional de um sistema de bombeamento solar formado por painéis fotovoltaicos e conversor de frequência acoplados a alguns conjuntos motor-bomba de alimentação CA. Deseja-se, validar essa topologia de bombeamento solar para aplicação em irrigação e comprovar a viabilidade de implantação desse tipo de sistema, avaliando sua operação sob diferentes situações impostas pela variação da radiação solar.

1.2 Revisão de Literatura

1.2.1 Sistemas de irrigação

A expectativa é que a demanda por produção agrícola continue aumentando à medida que a população mundial cresce e enriquece. Entretanto, devido aos grandes impactos que esse tipo de produção confere ao meio ambiente, causados pela intensificação do uso de fertilizantes artificiais e água em grande volume, surge a necessidade de implantação de sistemas agrícolas que garantam segurança alimentar e nutricional, de forma igualitária e acessível, sem prejudicar os ecossistemas dos quais a agricultura e a humanidade depende (GARIBALDI et al., 2017; PROSEKOV; IVANOVA, 2018).

O alcance da segurança alimentar requer o uso intensivo de irrigação na agricultura, enquanto a água e território estão se tornando cada vez mais escassos e valiosos. A irrigação para agricultura é o maior consumidor de água doce do mundo, representando cerca de 70% do total. No geral, os agricultores tendem a utilizar mais água do que o necessário, tentando evitar a perdas na produção; como resultado, boa parte da água e energia são desperdiçadas (GUPTA et al., 2020; KAMIENSKI; VISOLI, 2018).

A agricultura irrigada no Brasil tem crescido cada vez mais devido a fatores como a expansão da agricultura em regiões de baixa precipitação durante parte ou todo o ano, estímulos governamentais ao setor e disponibilidade de financiamentos. Além disso,

a presença da irrigação nas áreas de cultivo em todo o país, também pode ser explicada por benefícios como: o aumento da produtividade da ordem de 2 a 3 vezes em relação a agricultura sem aplicação suplementar de água; possibilidade de utilização do solo durante o ano todo, com até três safras; a elevação da oferta e regularidade de alimentos e produtos agrícolas; atenuação da influência climática e riscos de produção; preços mais favoráveis para o produtor rural; melhor qualidade e padronização dos produtos agrícolas; oportunidade de novos negócios; modernização dos sistemas de produção, estimulando a utilização de novas tecnologias (ANA, 2017).

No entanto, a irrigação encontra algumas barreiras de crescimento, muitas vezes relacionadas ao acesso e custos de energia elétrica. As taxas cobradas pelas concessionárias de energia tendem a aumentar, especialmente em condições de alta demanda e horários de pico. Além disso, os produtores rurais sofrem com as constantes quedas de energia e instabilidades de fornecimento. Essas são questões muito preocupantes para aqueles que dependem diretamente da energia elétrica na sua produção, podendo resultar em grandes prejuízos. Por isso, muitos agricultores buscam independência no acesso a eletricidade. Em geral, geradores a diesel estão sendo usados para bombeamento em áreas remotas, onde o acesso à energia elétrica é difícil ou inexistente. Nesses casos, a instalação de usinas fotovoltaica mostra-se uma boa solução para aproveitamento energético. No geral, a energia solar pode apresentar um custo-benefício maior em comparação aos geradores a diesel, trazendo uma solução de independência energética e ambientalmente correta (AL-BADI et al., 2018; MUHSEN; KHATIB; NAGI, 2017; VAN STADEN; ZHANG; XIA, 2009).

Nos sistemas de bombeamento de água para irrigação alimentados por módulos fotovoltaicos a água é captada de um poço ou fonte de água superficial e posteriormente destinada ao seu uso final por uma bomba hidráulica. Uma das principais vantagens do sistema de bombeamento fotovoltaico é que as necessidades de irrigação e os níveis de radiação solar variam de maneira semelhante, ou seja, os momentos do dia com maior exposição solar são também os momentos em que as plantas mais necessitam de aplicação suplementar de água. Embora os custos iniciais de investimento sejam altos, quando bem projetados e administrados, podem oferecer uma alternativa tecnológica, econômica e ambientalmente favoráveis, quando levada em conta à longa vida útil, os baixos requisitos de manutenção e o desuso de combustível fósseis (OLCAN, 2015).

Em geral, existem dois tipos de topologias para os sistemas de bombeamento solar, os que utilizam motores CC e os que utilizam motores CA. O primeiro possui

vantagens devido a facilidade de instalação e demandam um menor número de módulos associados. No entanto, os custos de manutenção tendem a ser maiores, já que as bombas CC geralmente são importadas e exigem frequentes substituições de escovas. Nesse sentido, emergem os sistemas que utilizam os motores de indução CA como alternativa de bombeamento. Naturalmente, a instalação de uma unidade de condicionamento de energia é necessária para realizar a conversão CC-CA e possibilitar a alimentação dessas bombas CA por fonte solar fotovoltaica. O trabalho de Campos (2020) propõe um sistema de bombeamento solar para aplicação na irrigação, utilizando motor de indução e um conversor de frequência convencional. Os ensaios realizados mostraram viabilidade técnica e financeira para o sistema. Foram utilizadas duas técnicas de controle de operação, set-point de velocidade fixo e variável. Constatou-se ainda que, para situações de nebulosidade é recomendado que o sistema opere com set-points menores.

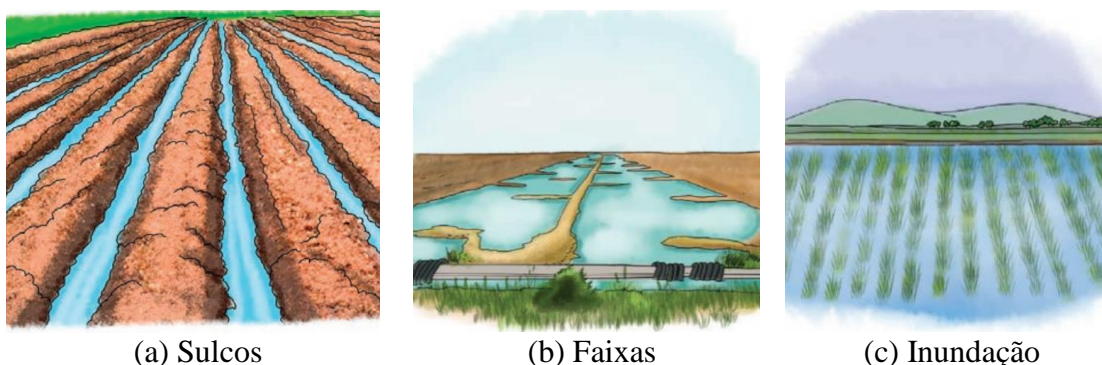
Seu desenvolvimento trouxe à tona questões relacionadas a compreensão do comportamento do sistema *versus* a variação de condições climáticas como mudanças de radiação solar, temperatura e sombreamento. Dentre estas, pode-se destacar: como as diversas configurações de operação do inversor de frequência influenciam no comportamento do sistema; e ainda, quais as consequências da consideração das perdas de carga hidráulica dos componentes do sistema traz ao desempenho deste. Essas questões podem ser respondidas mediante estudos de modelagem e simulação computacional, a fim de relacionar as variáveis do sistema e sua performance. As modelagens computacionais vem sendo muito utilizadas com o intuito de avaliar e caracterizar sistemas que utilizam fontes alternativas de energia, com os objetivos principais de difundir-la e driblar as dificuldades que podem vir a retardar o seu uso (ASGARI; JANNATI; IDRIS, 2014; FERREIRA et al., 2020; MOTAHHIR et al., 2018; RAI; DEBRE, 2016; RAZAVI; AHMADI; ZAHEDI, 2018; TRIPATHI, 2017; VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009b).

Alguns métodos podem ser utilizados para fornecer e aplicar água as plantas. Fatores como valor do investimento, disponibilidade de mão de obra, gasto energético e eficiência de irrigação diferenciam os métodos que podem ser considerados. Existem basicamente quatro métodos de irrigação: superficial, aspersão, localizada e subterrânea (ANDRADE; BRITO, 2006; NETTO, 1998). Abaixo serão apresentadas suas principais características:

- i. Irrigação superficial: o método de irrigação por superfície distribui a água por gravidade de forma superficial no solo. Algumas vantagens são o menor custo,

simplicidade de equipamentos e menor consumo de energia. Esse método se adapta bem a maior parte das culturas e tipos de solo. No entanto, depende de condições topográficas e pode apresentar baixa eficiência de aproveitamento de água. Esse método pode ser dividido em três tipos: (a) sulcos, em que a água é conduzida por sulcos paralelos a linha das plantas; (b) faixas, em que a água se movimenta do canal para o dreno em faixas paralelas com declive longitudinal; e (c) inundação, em que o terreno é dividido em tabuleiros cobertos por uma lâmina d'água;

Figura 1.1 – Tipos de irrigação superficial



(a) Sulcos

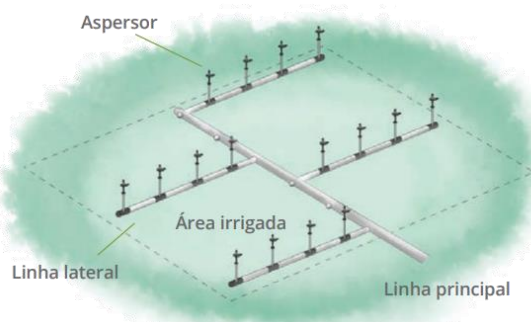
(b) Faixas

(c) Inundação

Fonte: Adaptado de Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (2019a).

- ii. Irrigação por aspersão: O método da aspersão é caracterizado por jatos de água lançados ao ar que atingem a cultura. Suas principais vantagens são a facilidade de adaptação ao solo e sua topografia, eficiência na distribuição de água e possibilidade de automatização. Já as desvantagens são os elevados custos de instalação e operação; vulnerabilidade as condições climáticas e a água salina; que pode reduzir a vida útil dos equipamentos e prejudicar as culturas. Os sistemas por aspersão mais utilizados são o convencional, autopropelido, pivô central, deslocamento linear e LEPA (do inglês - *Low Energy Precision Application*);

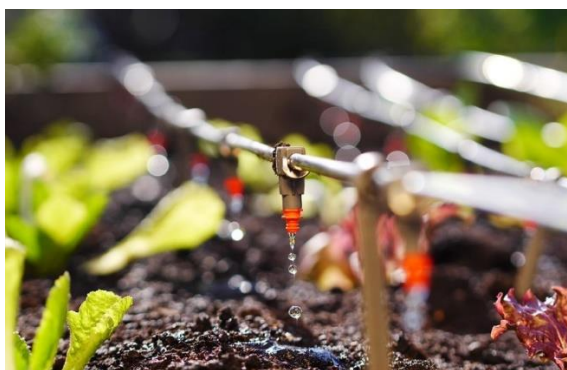
Figura 1.2 – Exemplo de irrigação por aspersão



Fonte: Serviço Nacional de Aprendizagem (2019b).

- iii. Irrigação localizada: o método da irrigação localizada aplica a água de forma pontual, diretamente sobre parte do sistema radicular das plantas, por meio de emissores pontuais, lineares ou superficiais. As vantagens são que a área molhada é menor do que a área total, permite elevar a frequência de irrigação com redução do consumo de água, automação do sistema de irrigação e pouca mão de obra para fazer o manejo de irrigação durante o ciclo vegetativo da cultura. Pode ter um custo inicial relativamente alto, variando de acordo com o espaçamento das linhas laterais. Os principais métodos de irrigação localizada são por gotejamento e microaspersão;

Figura 1.3 – Exemplo de irrigação localizada



Fonte: Revista Campo e Negócios (2021).

- iv. Irrigação subterrânea: no método de subirrigação, o lençol freático é sustentado a determinada profundidade, de forma a permitir o fluxo de água recomendado à região radicular da cultura. Pode ser acompanhado de um sistema de drenagem subsuperficial. Pode ser considerado o método de menor custo e apresentar resultados satisfatórios quando bem manejado;

Figura 1.4 – Exemplo de subirrigação



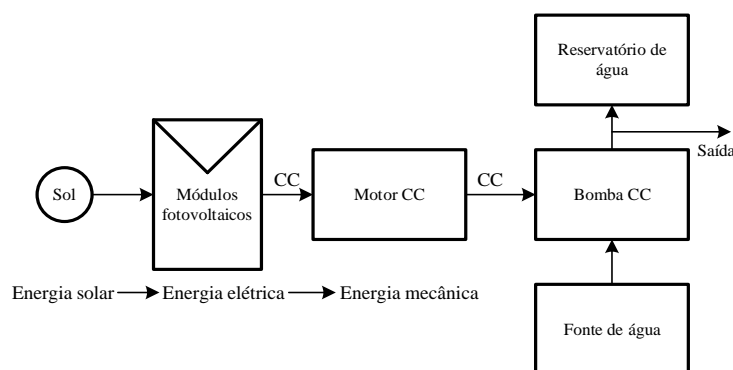
Fonte: Guimarães (2018).

1.2.2 Topologias de sistemas de bombeamento fotovoltaico

Um sistema de bombeamento de água fotovoltaico consiste em um gerador fotovoltaico (FV), responsável por transformar a energia solar em energia elétrica, um conjunto motor-bomba responsável pela conversão de energia elétrica em energia mecânica e uma estrutura de armazenamento de energia para suprimento do período sem irradiação solar. O conjunto de módulos FV é montado de forma a otimizar a geração de energia elétrica entregue ao sistema de bombeamento de água.

A topologia FV-CC possui um diagrama simplificado, já que não existe a necessidade de conversão de energia, como pode ser visto na Figura 1.5. A energia gerada pelos módulos FV é utilizada diretamente por um conjunto motor-bomba CC. A água é direcionada a um reservatório de água durante o dia, para uso diurno, noturno ou sob condições de sombreamento.

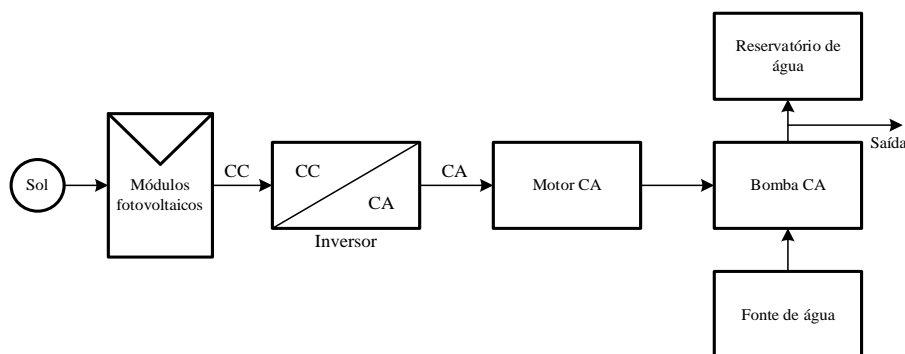
Figura 1.5 – Diagrama de um sistema de bombeamento de água FV-CC



Fonte: Adaptado de Chandel et al. (2015).

Já a topologia FV-CA, é formada por uma associação de módulos FV, conectado a uma unidade de condicionamento de energia que é compreendida por um conversor CC/CA, acoplado a um conjunto motor-bomba composto por um motor de indução CA e algum tipo de bomba centrífuga, como pode ser visto na Figura 1.6. O tanque de água atua como dispositivo de armazenamento de energia, já que o líquido armazenado pode ser distribuído posteriormente através da energia potencial gravitacional.

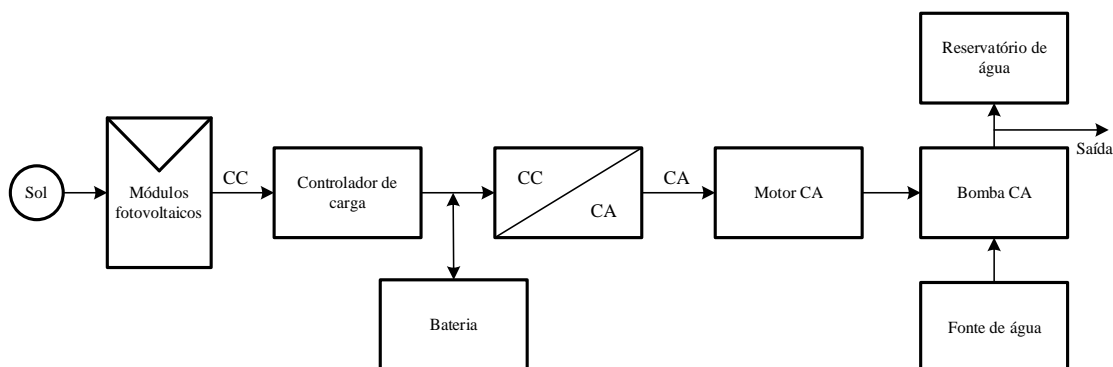
Figura 1.6 – Diagrama de um sistema de bombeamento de água FV-CA



Fonte: Adaptado de Chandel et al. (2015).

A inclusão de um banco de baterias a topologia FV-CA pode ser implementada. Nesse caso, a bomba funciona independentemente do nível de irradiação solar, embora dependa diretamente da autonomia da bateria. Geralmente as baterias não são utilizadas para o armazenamento devido aos altos custos e vida útil curta. A Figura 1.7 mostra o diagrama da topologia FV-CA com banco de baterias.

Figura 1.7 – Diagrama de um sistema de bombeamento de água com banco de baterias



Fonte: Adaptado de Chandel et al. (2015).

O objeto de estudo dessa pesquisa refere-se a topologia FV-CA apresentada na Figura 1.6. O condicionamento de energia é realizado por um conversor de frequência convencional. A fim de avaliar o sistema de bombeamento FV-CA serão descritos a seguir as principais características relacionadas ao gerador fotovoltaico e do sistema de bombeamento de água.

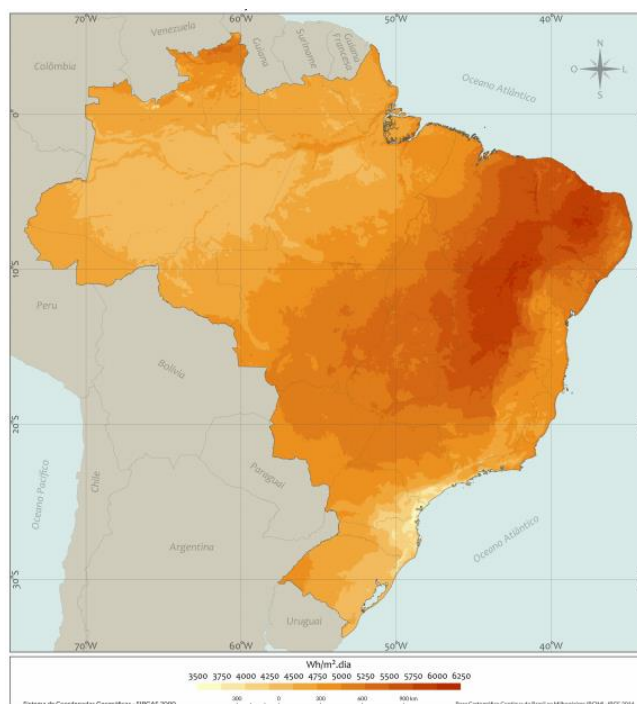
1.2.3 Gerador fotovoltaico

A energia solar fotovoltaica é uma tecnologia capaz de gerar energia elétrica em corrente contínua (CC) graças ao efeito fotoelétrico provocado no material semicondutor do qual é formado quando atingido por fótons. Logo, enquanto a luz solar estiver

incidindo sobre a célula fotovoltaica, esta será capaz de alimentar carga elétrica. Existem células fotovoltaicas, na Terra ou no espaço, já a algumas décadas. A energia fotovoltaica possui inúmeras vantagens: não polui o meio ambiente, exige baixa manutenção, independe do aumento dos custos de combustível, é modular, ecologicamente sustentável e confiável. No entanto, possui desvantagens como a dificuldade de armazenamento de energia e alto custo de implementação inicial, que geralmente são compensadas pela sua longa vida útil e benefícios ambientais (LUQUE; HEGEDUS, 2003).

A geração de energia fotovoltaica é influenciada pela radiação solar e pela temperatura. Além disso, outras condições atmosféricas, como nebulosidade, umidade relativa do ar, também podem interferir na conversão de energia desempenhada pelos módulos FV. A disponibilidade de radiação solar, também denominada energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende da latitude local e da posição no tempo, como hora do dia e dia do ano. Essa característica resulta da inclinação que o planeta tem em relação ao seu eixo de rotação. Esse fator combinado aos movimentos de translação e rotação da Terra, causam a não uniformidade da disponibilidade de radiação solar. Como a maior parte do território brasileiro está localizada próxima a linha do Equador, o Brasil possui alto potencial solar (ANEEL, 2005). O Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017) apresenta o mapa de distribuição da média anual típica da radiação solar global diária no plano horizontal, como pode ser visto na Figura 1.8.

Figura 1.8 – Total diário da irradiação global horizontal (média anual típica – Wh/m²/dia)



Fonte: (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017).

Percebe-se que o Brasil como um todo possui ótimo potencial de geração fotovoltaica devido aos altos índices de radiação solar. Deve-se destacar a região do sudoeste goiano que apresenta uma média anual de radiação solar global diária de cerca de 5.000 Wh/m²/dia, ficando atrás apenas de algumas regiões do Nordeste brasileiro (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017).

1.2.4 Tipos de módulos fotovoltaicos

Existem vários tipos de módulos fotovoltaicos solares. Os módulos de silício monocristalino, são feitos usando células cortadas de um único cristal cilíndrico de silício. Esta é a tecnologia fotovoltaica mais eficiente, consegue converter cerca de 15% da energia solar em eletricidade. O processo de fabricação do silício monocristalino é relativamente complicado, resultando em custos mais altos do que outras tecnologias. Os módulos de silício policristalino são formados por células cortadas de um lingote de silício derretido e recristalizado. Os lingotes são então cortados em bolachas muito finas e montados em células completas. São geralmente mais baratos, devido ao processo de fabricação mais simples, mas tendem a ser menos eficientes, em torno de 12%. Já os módulos fotovoltaicos de silício amorfo são produzidos depositando silício em uma fina camada homogênea sobre um substrato, em vez de criar uma estrutura cristalina rígida. Como o silício amorfo absorve a luz com mais eficiência do que o silício cristalino, as células podem ser mais finas, por isso o nome alternativo 'filme fino'. O silício amorfo pode ser depositado em uma ampla variedade de substratos, rígidos e flexíveis, o que o torna ideal para superfícies curvas ou para colagem direta em materiais de cobertura. Essa tecnologia é, no entanto, menos eficiente que o silício cristalino, com eficiências típicas de cerca de 6%, mesmo tendo fabricação mais fácil e barata (MUGHAL; SOOD; JARIAL, 2018).

Figura 1.9 – Tipos de células de silício



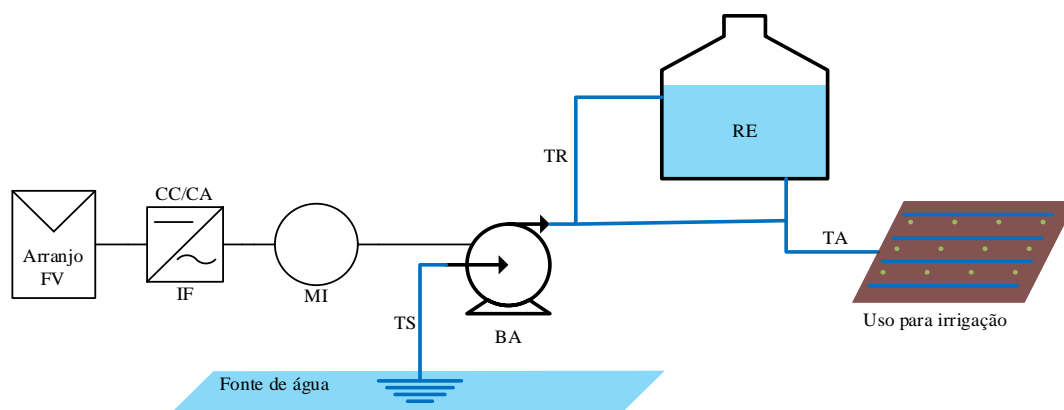
Fonte: Adaptado de (GREEN SARAWAK, 2018).

A Figura 1.9 mostra os tipos de células de silício citadas anteriormente. Embora os módulos fotovoltaicos de silício amorfo (a-Si) possuam vantagens, os mais utilizados comercialmente são os monocristalinos (m-Si) e policristalinos (p-Si), devido a maior eficiência, já que geralmente a área de instalação é limitada.

1.2.5 Sistemas de bombeamento de água

De forma geral, os motores CC tem sido utilizados para o bombeamento de água, no entanto, há muitos casos de substituição por motores de indução (MI), já que trazem vantagens como a robustez, economia, disponibilidade e operação em condições críticas (SHUKLA; SINGH, 2019). A Figura 1.10 ilustra o diagrama de um sistema de bombeamento de água utilizando um MI.

Figura 1.10 – Sistema de bombeamento



Fonte: Autora (2022).

O sistema de bombeamento de água estudado é composto por um arranjo FV, um inversor de frequência (IF), um motor de indução (MI), uma bomba d'água (BA), tubulação de sucção (TS), tubulação de recalque (TR), reservatório elevado (RE) e a tubulação de alimentação (TA). Podem ser utilizadas diversos tipos de bombas d'água para aplicação na agricultura, sendo que fatores como nível de pressão e vazão e posicionamento da bomba influenciam na sua escolha.

Alguns fatores podem influenciar o dimensionamento, aquisição e instalação do sistema de bombeamento. Dentre eles pode-se citar a altura de recalque, a altura de sucção, a complexidade da instalação do sistema, a capacidade e disponibilidade de construção do reservatório de elevado, a regularidade demandada pela aplicação e a

necessidade diária de água. Além disso, outras condições são necessárias para que a bomba, motor e fonte de energia possam ser dimensionados. Desta forma, considerando a quantidade de elementos que caracterizam um sistema de bombeamento, deve-se preocupar com o correto dimensionamento do sistema e uma boa previsão das variáveis que influenciam o comportamento do sistema, para que o custo-benefício seja bem definido e futuras frustrações e substituições de componentes do sistema sejam evitadas (CORRÊA, 2008).

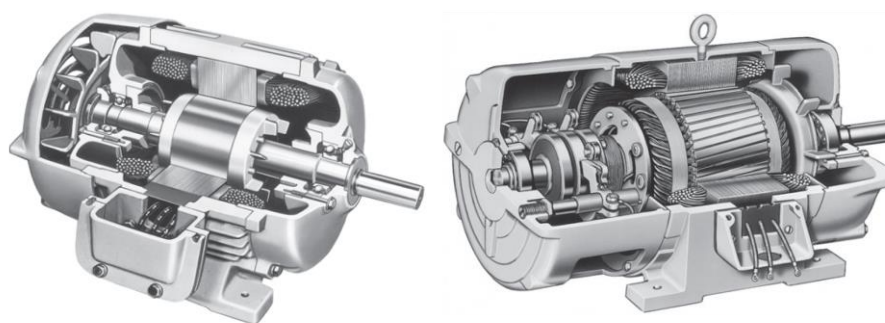
1.2.6 Motor de indução

A principal característica de um motor de indução é que as bobinas do estator são alimentadas em corrente alternada, enquanto uma corrente elétrica é induzida no rotor. Nas máquinas de indução, as correntes são induzidas nos enrolamentos do rotor como consequência do movimento de rotação do rotor em relação ao estator e das correntes que circulam no estator. A excitação trifásica resulta na criação de um campo magnético no entreferro que gira na velocidade síncrona (n_s). As duas variáveis que determinam o valor da velocidade, como descreve a Equação (1.1), são o número de polos (p) e a frequência (f_e) da corrente elétrica aplicada do estator (UMANS, 2014).

$$n_s = \left(\frac{120}{p} \right) f_e \quad (1.1)$$

Existem basicamente dois tipos de rotores de motor de indução, o rotor gaiola de esquilo e o rotor bobinado, como pode ser visto na Figura 1.11. O primeiro é formado por um conjunto de barras condutoras colocadas em ranhuras na superfície do rotor e curto-circuitadas nas extremidades através de anéis de curto-circuito. O segundo rotor é formado por enrolamentos trifásicos semelhantes aos do estator. A ligação trifásica é usualmente em estrela (Y) e os terminais são conectados aos anéis deslizantes do eixo do rotor. Os enrolamentos são curto-circuitados por escovas que se sustentam nos anéis deslizantes. Esse tipo de rotor permite adicionar resistências extras ao circuito e as correntes podem ser medidas, sendo possível modificar a característica de conjugado *versus* velocidade do motor (CHAPMAN, 2013).

Figura 1.11 – Tipos de motores de indução



Gaiola de esquilo

Bobinado

Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

Os motores de rotor bobinado são maiores, mais caros e tem uma manutenção mais complicada quando comparadas aos rotores gaiola de esquilo, portanto será adotado a modelagem do segundo motor de indução tipo gaiola de esquilo, já que esses são usados para aplicações de menor escala (UMANS, 2014).

1.2.7 Bombas hidráulicas

Uma máquina hidráulica nada mais é do que elemento que promove trocas de energias mecânica e hidráulica. Se divide em turbinas ou bombas. No caso da bomba hidráulica a energia mecânica é transformada em energia hidráulica com o objetivo de transportar ou elevar fluidos a distâncias ou alturas consideráveis. Ao contrário das turbinas que utilizam a energia hidráulica para transformá-la em mecânica e produzir energia elétrica, por exemplo. Essas também podem ser classificadas em relação a trajetória do fluido no rotor. É considerada radial quando o fluido entra na direção do raio e sai na direção do eixo, tangencial quando o jato incide de forma tangencial ao rotor, e axial quando o fluido circula pelo rotor na direção do eixo (BAPTISTA; COELHO, 2014).

Elas também podem ser classificadas, de acordo com o tipo de aplicação, em: bombas de água submersas, de superfície e flutuantes. A bomba submersa retira água de poços profundos, enquanto a bomba de superfície retira água de poços rasos, nascentes, lagoas, rios ou tanques. Já a bomba de água flutuante retira água de reservatórios com capacidade de ajuste de altura. O motor e a bomba são construídos juntos em sistemas submersíveis e flutuantes, por isso são chamados de conjunto motor-bomba. No sistema de superfície, a bomba e o motor podem ser selecionados separadamente para estudar o desempenho do sistema (CHANDEL et al., 2015).

Figura 1.12 – Exemplos de bombas dinâmicas e de deslocamento positivo



Dinâmica (cinética)

Deslocamento positivo (direto)

Fonte: Adaptado de PROPEQ (2019) e Reportero industrial (2015).

De acordo com o princípio de operação, as bombas também são classificadas em: bombas cinéticas ou dinâmicas e bombas de deslocamento direto ou positivo. As bombas dinâmicas operam oferecendo alta velocidade e pressão ao fluido de passagem. A eficiência das bombas dinâmicas é menor em comparação às bombas de deslocamento positivo, porém apresenta custos de manutenção relativamente mais baixos. Alguns exemplos de bombas de dinâmicas são as bombas centrífugas e periféricas. As bombas de deslocamento positivo operam forçando um volume fixo de fluido da seção de entrada da bomba para a zona de descarga da bomba. Essas bombas geralmente tendem a ser maiores que as bombas dinâmicas de mesma capacidade. Podem ser divididas em bombas alternativas e rotativas (CHANDEL et al., 2015; TSUTIYA, 2006).

1.2.8 Conversor de frequência

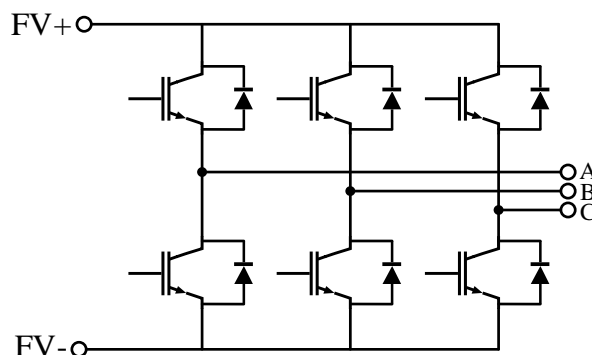
Nas aplicações que utilizam fontes de energia renováveis, fontes de alimentação ininterruptas e integração à rede de veículos elétricos requerem conversores de potência CC-CA de alta eficiência. Existem conversores de um único ou múltiplos estágios de conversão. Os conversores CC-CA de estágio único são mais indicados para aplicações que exigem maior eficiência de conversão de energia, já que não necessitam de elementos passivos para acoplamento CC. São utilizados múltiplos estágios quando o barramento CC não possui o nível de tensão adequado ou quando deseja-se implementar um controle de otimização da extração de potência da fonte geradora. Nesses casos, geralmente utiliza-se um conversor CC-CC elevador (NAYAK; RAJASHEKARA; PRAMANICK, 2019; WANG et al., 2019).

O inversor CC-CA fornece tensões trifásicas, com amplitude e frequência variáveis, de acordo com as mudanças de radiação solar, condições ambientais e de carga,

como uma porcentagem de seus valores nominais. A corrente elétrica é modulada de forma senoidal para obter uma alta eficiência (HAMROUNI; JRAIDI; CHÉRIF, 2009).

O conversor de frequência permite a realização de partidas suaves no conjunto motor-bomba com limitação de corrente, trazendo assim, vantagens como a redução da queda de tensão em cabos elétricos, diminuição do estresse no motor, aumento da vida útil do sistema mecânico e dos enrolamentos, além de favorecer a utilização de fontes alternativas de energia como a fotovoltaica (FILHO et al., 2018).

Figura 1.13 – Configuração básica de um conversor CC-CA estático trifásico



Fonte: Adaptado de Corrêa (2008).

A Figura 1.13 mostra a configuração mais básica de um conversor de CC-CA, sendo este um inversor estático convencional. É alimentado por um barramento de tensão CC e possui braços de inversão formados por semicondutores do tipo IGBT (transistores bipolares de gatilho isolado), ou similar. Essa configuração teoricamente oferece melhor rendimento, devido ao número reduzido de elementos. A utilização de um inversor comercial é possível para pequenas aplicações, representando um ganho em robustez e manutenção (CORRÊA, 2008).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral:

O objetivo geral deste projeto é a modelagem computacional de um sistema de bombeamento fotovoltaico para aplicação em irrigação utilizando inversor de frequência para alimentação de uma bomba hidráulica convencional.

2.2 Objetivos específicos:

Este projeto tem como objetivos específicos:

- Descrever o circuito equivalente do sistema fotovoltaico, o conversor de frequência e do conjunto motor-bomba hidráulico;
- Simular computacionalmente o sistema de bombeamento fotovoltaico;
- Analisar a influência das mudanças nas condições ambientais, inclusão de perdas hidráulicas e configurações do inversor de frequência em relação ao comportamento do sistema;
- Comparar os resultados de simulação computacional para cada configuração do sistema proposto.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPR), 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Energia Solar. **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**, p. 14, 2005.

AL-BADI, A.; YOUSEF, H.; AL MAHMOUDI, T.; AL-SHAMMAKI, M.; AL-ABRI, A.; AL-HINAL, A. Sizing and modelling of photovoltaic water pumping system. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 37, n. 5, p. 415–427, 2018.

ALGHUWAINEM, S. M. Steady-State Performance of Dc Motors Supplied From Photovoltaic Generators with Step-Up Converter. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 7, n. 2, p. 267–272, 1992.

ANDRADE, C. DE L. T. DE; BRITO, R. A. L. Métodos de Irrigação e Quimigação. **Circular Técnica**, 86, p. 1–17, 2006.

ASGARI, S. H.; JANNATI, M.; IDRIS, N. R. N. Modeling of three-phase induction motor with two stator phases open-circuit. 2014 IEEE Conference on Energy Conversion, CENCON 2014. **Anais...Johor Bahru: IEEE**, 2014

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

CAMPOS, L. C. C. **Utilização de motor de indução com conversor de frequência convencional fotovoltaico para irrigação**. Instituto Federal Goiano – Câmpus Rio Verde – GO, 2020.

CHANDEL, S.; NAIK, M.; ENERGY, R. C.-R. AND S.; 2015, U. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation...: Heriot-Watt University Library Resources. **Elsevier: Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 1084–1099, 2015.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

CORRÊA, T. P. **Desenvolvimento de um sistema bombeamento fotovoltaico com maximização das eficiências do arranjo fotovoltaico e do motor elétrico**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

ERROUHA, M.; DEROUICH, A.; MOTAHHIR, S.; ZAMZOU, O.; EL OUANJLI, N.; EL GHZIZAL, A. Optimization and control of water pumping PV systems using fuzzy logic controller. **Energy Reports**, v. 5, p. 853–865, 2019.

FERREIRA, A. DE O.; BRITO, A. U.; GALHARDO, M. A. B.; FERREIRA, L.; MACÊDO, W. N. Modeling, control and simulation of a small photovoltaic-wind water pumping system without battery bank. **Computers and Electrical Engineering**, v. 84, 2020.

FILHO, J. R. M. F.; MENDES, F. R. F.; SOUSA, J. R. B.; MEDEIROS, C. M. S.; SOUSA, I. R. Photovoltaic Panel Based Pumping System: A Solution Without Batteries. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 2, p. 514–520, 2018.

GARCIA, M. DA S.; VILPOUX, O. F.; CEREDA, M. P. Distributed electricity generation from sugarcane for agricultural irrigation: A case study from the midwest region of Brazil. **Utilities Policy**, v. 50, p. 207–210, 2018.

GARIBALDI, L. A.; GEMMILL-HERREN, B.; D'ANNOLFO, R.; GRAEUB, B. E.; CUNNINGHAM, S. A.; BREEZE, T. D. Farming Approaches for Greater Biodiversity, Livelihoods, and Food Security. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 32, n. 1, p. 68–80, 2017.

GODFRAY, H. C. J.; BEDDINGTON, J. R.; CRUTE, I. R.; HADDAD, L.; LAWRENCE, D.; MUIR, J. F.; TOULMIN, C. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 812–818, 2010.

GREEN SARAWAK. Going Solar Chapter 8 : Know Your Solar PV Cells and Panels. Disponível em: <<https://greensarawak.com/things-to-know-before-going-solar/going-solar-chapter-8-know-your-solar-pv-cells-and-panels/>>. Acesso em: 3 ago. 2020.

GUIMARÃES, F. Netafim desenvolve tecnologia de irrigação subterrânea em conilon. Disponível em: <<https://www.agromogiana.com.br/netafim-desenvolve-tecnologia-de-irrigacao-subterranea-em-conilon/>>. Acesso em: 2 jun. 2022.

GUPTA, M.; ABDELSALAM, M.; KHORSANDROO, S.; MITTAL, S. Security and Privacy in Smart Farming: Challenges and Opportunities. **IEEE Access**, v. 8, p. 34564–34584, 2020.

HAMILTON, R. J. DC motor brush life. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 36, n. 6, p. 1682–1687, 2000.

- HAMROUNI, N.; JRAIDI, M.; CHÉRIF, A. Theoretical and experimental analysis of the behaviour of a photovoltaic pumping system. **Solar Energy**, v. 83, n. 8, p. 1335–1344, 2009.
- JAIN, S.; THOPUKARA, A. K.; KARAMPURI, R.; SOMASEKHAR, V. T. A single-stage photovoltaic system for a dual-inverter-fed open-end winding induction motor drive for pumping applications. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 30, n. 9, p. 4809–4818, 2015.
- KAMIENSKI, C.; VISOLI, M. C. Swamp: uma plataforma para irrigação de precisão baseada na Internet das Coisas. - Portal Embrapa. **Embrapa Informática Agropecuária-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, v. 15, n. 20, p. 76–84, 2018.
- KHAN, K.; SHUKLA, S.; SINGH, B. Performance-Based Design of Induction Motor Drive for Single-Stage PV Array Fed Water Pumping. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 55, n. 4, p. 4286–4297, 2019.
- KUMAR, R.; SINGH, B. Single Stage Solar PV Fed Brushless DC Motor Driven Water Pump. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, v. 5, n. 3, p. 1377–1385, 2017.
- KUMAR, R.; SINGH, B. Grid Interactive Solar PV-Based Water Pumping Using BLDC Motor Drive. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 55, n. 5, p. 5153–5165, 2019.
- LUQUE, A.; HEGEDUS, S. (EDS.). **Handbook of photovoltaic science and engineering**. John Wiley & Sons, 2003.
- MISHRA, A. K.; SINGH, B. Control of SRM drive for photovoltaic powered water pumping system. **IET Electric Power Applications**, v. 11, n. 6, p. 1055–1066, 2017.
- MOTAHHIR, S.; EL GHZIZAL, A.; SEBTI, S.; DEROUICH, A. Modeling of Photovoltaic System with Modified Incremental Conductance Algorithm for Fast Changes of Irradiance. **International Journal of Photoenergy**, v. 2018, 2018.
- MUGHAL, S.; SOOD, Y. R.; JARIAL, R. K. A Review on Solar Photovoltaic Technology and Future Trends. NCRACIT International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology 2018 IJSRCSEIT. **Anais...2018**
- MUHSEN, D. H.; KHATIB, T.; NAGI, F. A review of photovoltaic water pumping system designing methods, control strategies and field performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, n. August 2016, p. 70–86, 2017.
- NAYAK, P.; RAJASHEKARA, K.; PRAMANICK, S. K. Soft-Switched Modulation Technique for a Single-Stage Matrix-Type Isolated DC-AC Converter. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 55, n. 6, p. 7642–7656, 2019.
- NETTO, J. M. A. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1998.

OLCAN, C. Multi-objective analytical model for optimal sizing of stand-alone photovoltaic water pumping systems. **Energy Conversion and Management**, v. 100, p. 358–369, 2015.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L. DE; RÜTHER, R.; ABREU, S. L. DE; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. DE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: [s.n.].

PROPEQ. Como funciona uma bomba centrífuga. Disponível em: <<https://propeq.com/post/como-funciona-uma-bomba-centrifuga/>>.

PROSEKOV, A. Y.; IVANOVA, S. A. Food security: The challenge of the present. **Geoforum**, v. 91, n. February, p. 73–77, 2018.

RAI, T.; DEBRE, P. Generalized modeling model of three phase induction motor. 2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, ICEETS 2016. **Anais...2016**

RAZAVI, S. H.; AHMADI, R.; ZAHEDI, A. Modeling, simulation and dynamic control of solar assisted ground source heat pump to provide heating load and DHW. **Applied Thermal Engineering**, v. 129, p. 127–144, 2018.

REPORTERO INDUSTRIAL. Bombas dosificadoras de bajo mantenimiento. Disponível em: <<http://www.reporteroindustrial.com/temas/Bombas-dosificadoras-de-bajo-mantenimiento+50000516>>.

REVISTA CAMPO E NEGÓCIOS. **Irrigação por gotejamento**. [s.l: s.n.].

SAATH, K. C. D. O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, p. 195–212, 2018.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL. **Irrigação: gestão de sistemas por superfície**. Brasília: Senar, 2019a. v. 1

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL. **Irrigação : gestão da irrigação por aspersão**. Brasília: Senar, 2019b.

SHUKLA, S.; SINGH, B. Reduced Current Sensor Based Solar PV Fed Motion Sensorless Induction Motor Drive for Water Pumping. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 15, n. 7, p. 3973–3986, 2019.

SONTAKE, V. C.; KALAMKAR, V. R. Solar photovoltaic water pumping system - A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1038–1067, 2016.

TRIPATHI, R. N. **Solar Photovoltaic Power Generating System & Grid Integration - Modeling, Controller Design and Optimization**. Kyushu Institute of Technology, 2017.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2014.

VAN STADEN, A. J.; ZHANG, J.; XIA, X. A model predictive control strategy for load shifting in a water pumping scheme with maximum demand charges. 2009 IEEE Bucharest PowerTech: Innovative Ideas Toward the Electrical Grid of the Future. **Anais...2009**

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. **IEEE Transactions on power electronics**, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009a.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. Power Electronics Conference, 2009. COBEP'09. Brazilian. **Anais...2009b**

WANG, J.; WU, H.; YANG, T.; ZHANG, L.; XING, Y. Bidirectional Three-Phase DC-AC Converter with Embedded DC-DC Converter and Carrier-Based PWM Strategy for Wide Voltage Range Applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 66, n. 6, p. 4144–4155, 2019.

4 CAPÍTULO 1 – ARTIGO 1

CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO SOLAR PARA IRRIGAÇÃO UTILIZANDO MOTOR DE INDUÇÃO COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA CONVENCIONAL

RESUMO

A topologia alternativa que utiliza motor em corrente alternada para alimentação de sistemas de bombeamento para irrigação tendo como fonte de energia módulos fotovoltaicos é apresentada como uma solução limpa para agricultores de pequeno e médio porte. As demandas energéticas de produtores rurais, especialmente em regiões isoladas, com acesso escasso a energia elétrica, são cada vez mais emergentes. A energia solar fotovoltaica representa, nesse caso, uma alternativa fácil e acessível para produções que necessitam de aplicação suplementar de água, como em locais áridos ou durante os períodos de seca. Aliado a utilização de motores de indução convencionais, que utilizam inversor de frequência para o condicionamento de energia, tornam os sistemas de bombeamento fotovoltaico mais simples e robustos. Esse trabalho descreve a caracterização dos elementos que compõem um sistema CA de bombeamento fotovoltaico, visando a modelagem computacional e simulação desses sistemas, facilitando a difusão dessa topologia como alternativa para sistemas de irrigação. Também é demonstrado o dimensionamento de um sistema de irrigação, passando pelo manejo do cultivo, disposição das linhas distribuição da água, demanda energética e arranjo fotovoltaico. O dimensionamento é focado na região do sudoeste goiano. A cultura escolhida, o tomateiro para processamento, é amplamente cultivado em regiões do cerrado. Além do dimensionamento completo do sistema, desde o volume de água necessário até a geração solar fotovoltaica, também, foi realizado um estudo de viabilidade econômica entre o sistema proposto e um alimentado por gerador a diesel, amplamente utilizado em regiões sem acesso a energia elétrica. Constatou-se que o sistema de bombeamento fotovoltaico é uma opção viável em relação a solução já difundida no mercado, além de possuir algumas vantagens como a não utilização de combustíveis fósseis e vida útil.

Palavras-chave: Simulação computacional; Fotovoltaico; Inversor de frequência, Motor CA, Irrigação.

ABSTRACT

The alternative topology that uses an alternating current motor to power irrigation pumping systems using photovoltaic modules as an energy source is presented as a clean solution for small and medium-sized farmers. The energy demands of rural producers, especially in isolated regions with scarce access to electricity, are increasingly emerging. Photovoltaic solar energy represents, in this case, an easy and accessible alternative for productions that require additional application of water, such as in arid places or during periods of drought. Combined with the use of conventional induction motors, which use a frequency inverter for power conditioning, they make photovoltaic pumping systems simpler and more robust. This work describes the characterization of the elements that make up an AC photovoltaic pumping system, aiming at computational modeling and simulation of these systems, facilitating the dissemination of this topology as an alternative for irrigation systems. It also demonstrates the design of an irrigation system, including crop management, arrangement of water distribution lines, energy demand and photovoltaic arrangement. The sizing is focused on the southwest region of Goiás. The chosen crop, tomato for processing, is widely cultivated in cerrado regions. In addition to the complete sizing of the system, from the volume of water required to photovoltaic solar generation, an economic feasibility study was also carried out between the proposed system and one powered by a diesel generator, widely used in regions without access to electricity. It was concluded that the photovoltaic pumping system is a viable option in relation to the solution already widespread in the market, in addition to having some advantages such as the non-use of fossil fuels and useful life.

Keywords: Computer simulation; Solar pumping; Frequency inverter, AC motor, Irrigation.

4.1 Introdução

A água e energia são recursos primários a sobrevivência humana e contribuem para o desenvolvimento de várias tecnologias. Existem inúmeras aplicações para os sistemas que utilizam a energia elétrica para o bombeamento de água. Dentre elas pode-se citar o bombeamento para irrigação e água potável, desintoxicação de água, armazenamento de energia hidroelétrica, produção e armazenamento de hidrogênio, entre outras (YADAV et al., 2015).

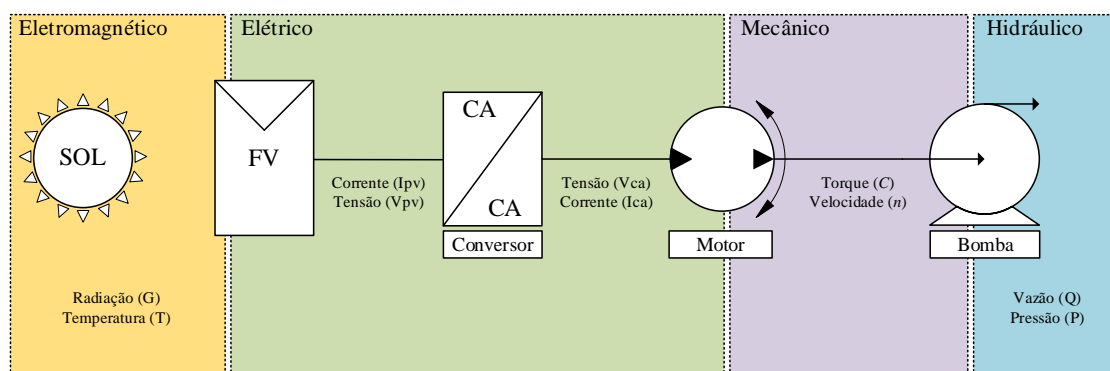
O acesso a eletricidade é fundamental para as atividades que exigem o bombeamento de água. Como os sistemas de bombeamento tem como componente principal as bombas d'água, a alimentação elétrica do motor através de uma fonte de energia deve ocorrer para permitir esse tipo de atividade. Entre as fontes mais utilizadas pode-se destacar a rede elétrica convencional e geradores a diesel. A energia solar fotovoltaica serve como uma alternativa sustentável e acessível ao uso de combustíveis fósseis. Além disso, em locais remotos, com dificuldade de acesso de redes de distribuição de energia elétrica, a geração própria através do aproveitamento da irradiação solar torna-se um ótimo recurso. Nesses casos, um sistema de armazenamento faz-se necessário para permitir o uso de energia mesmo durante a noite, para isso estudos que utilizam baterias elétricas ou tanques de armazenamento estão sendo desenvolvidos (CHANDEL et al., 2015; SHINDE; WANDRE, 2015).

Apesar da facilidade de instalação e acoplamento energético que um motor CC oferece, a robustez, baixo custo e fácil manutenção dos motores CA mostram-se alternativas interessantes para as aplicações em geral (FAM; BALACHANDER, 1988; ROHIT; KARVE; KHATRI, 2013).

A modelagem de um sistema com tais aplicações deve melhorar a compreensão do comportamento dos seus elementos assim como seus principais parâmetros e dados de calibração. A Figura 4.1 mostra os domínios e elementos de conversão do sistema. No domínio eletromagnético os parâmetros são a radiação solar (G) e a temperatura (T). O elemento responsável pela conversão para o domínio elétrico é o arranjo fotovoltaico que entrega as variáveis de corrente (I_{pv}) e tensão fotovoltaicas (V_{pv}). O conversor de frequência é o elemento responsável, nesse caso, por compatibilizar a forma de energia através da conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA). Seus parâmetros de saída são as correntes (I_{ac}) e tensões trifásicas (V_{ac}) que irão alimentar o

motor de indução CA. Esse é o responsável por converter a energia elétrica para mecânica rotacional oferecendo em sua saída torque mecânico (C) e velocidade rotacional (n). Esses parâmetros, através da bomba centrífuga, são transformados em vazão (Q) e pressão hidráulica (P). O domínio final é o hidráulico que irá utilizar a energia da água para diversas aplicações.

Figura 4.1 – Diagrama de domínios do sistema de bombeamento fotovoltaico



Fonte: Autora (2022).

Esse trabalho propõe a modelagem de um sistema de bombeamento fotovoltaico que utiliza bombas CA em contrapartida aos já difundidos sistemas com bombas CC. O sistema em estudo é composto por um arranjo fotovoltaico, um inversor de frequência convencional, um motor de indução trifásico e uma bomba centrífuga.

O trabalho está dividido nas seguintes seções: caracterização de sistemas de bombeamento fotovoltaico; dimensionamento e aplicação em um estudo de caso; levantamento de quantitativos e viabilidade financeira; e conclusões.

4.2 Caracterização de sistemas de bombeamento fotovoltaico

A presente seção tem por objetivo a modelagem e caracterização de cada elemento que compõe um sistema de bombeamento fotovoltaico. Primeiramente, será apresentado o circuito equivalente do arranjo fotovoltaico e características do seu comportamento. Posteriormente, o diagrama elétrico de um inversor de frequência e detalhes do seu funcionamento serão descritos. Depois a determinação dos parâmetros e relações do motor de indução. E por fim, a definição das principais relações hidráulicas relacionadas as bombas centrífugas.

4.2.1 Arranjo fotovoltaico

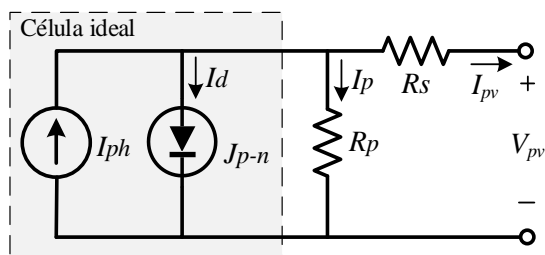
4.2.1.1 Circuito equivalente

O modelo matemático que descreve o comportamento da célula fotovoltaica, deve representar com precisão, como tensão e corrente nos terminais da célula variam em função da temperatura ambiente e as condições de radiação. Como a célula solar é uma fonte de energia não linear, a relação entre a corrente e a tensão não é direta. Sempre que as condições atmosféricas são modificadas, o ponto de operação é modificado. Dentre os modelos que descrevem a célula fotovoltaica, representado por um circuito equivalente, pode-se citar o modelo a um diodo, capaz de determinar simultaneamente as características de tensão e corrente (I - V) (GHONEIM, 2006).

Como as células fotovoltaicas são formadas por silício, um material semicondutor, estas possuem um comportamento semelhante a uma junção p-n, simulada por um diodo. A irradiação incidente na célula induz, por meio do efeito fotoelétrico, corrente elétrica nos seus terminais, logo, este pode ser assimilado a uma fonte de corrente fotovoltaica. As não idealidades são representadas por resistências. A resistência paralela ou *shunt* (R_p) representa as perdas internas relacionadas a fuga de corrente, enquanto a resistência série (R_s) modela perdas internas referentes a queda de tensão e perdas nos contatos metálicos. Os módulos fotovoltaicos são formados por várias células associadas em paralelo e em série para atingir níveis consideráveis de tensão e corrente. Conexões de paralelo resultam em ganho de corrente enquanto em série propiciam ganho de tensão (CHAIBI et al., 2018).

A Figura 4.2 mostra o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica, em que I_{pv} e V_{pv} são a corrente e tensão terminais da célula, I_{ph} é a corrente fotovoltaica, I_d é a corrente na junção p-n e I_p é a corrente *shunt*.

Figura 4.2 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica



Fonte: Adaptado de Villalva, Gazoli e Filho (2009).

A Equação (4.1) descreve matematicamente a corrente de saída do módulo (I_{pv}), considerando N_s células associadas em série. Percebe-se que a expressão é não linear, já que não é possível isolar I_{pv} na equação (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009a).

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left[\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{\eta_d k T N_s} \right] - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (4.1)$$

Onde:

I_{pv} – Corrente nos terminais do módulo [A];

V_{pv} – Tensão nos terminais do módulo [V];

I_{ph} – Corrente fotovoltaica [A];

I_0 – Corrente de saturação reversa do diodo [A];

R_s – Resistência série [Ω];

R_p – Resistência *shunt* [Ω];

q – Carga do elétron [$1,6 \cdot 10^{-19}$ C];

k – Constante de Boltzmann [$1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K];

T – Temperatura do módulo [K];

η_d – Fator de idealidade do diodo;

N_s – Número de células em série.

Ainda pode-se definir a corrente fotovoltaica (I_{ph}) como na Equação (4.2) e a corrente de saturação reversa (I_0) como na Equação (4.3). A obtenção dos valores das variáveis pode ser feita por meio dos dados constantes no *datasheet* ou dados de placa do módulo, ou ainda, realizando manipulações matemáticas para as situações de curto-circuito e circuito aberto. Os valores da corrente de curto-circuito (I_{SC}) e tensão de circuito aberto (V_{OC}) são dados do catálogo para as condições normais de teste (STC – *Standard Test Conditions*).

$$I_{ph} = \left(I_{ph(STC)} + k_I \Delta T \right) \frac{G}{G_{(STC)}} \quad (4.2)$$

$$I_0 = I_{0(STC)} \left(\frac{T_{(STC)}}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{q E_g}{\eta_d k} \left(\frac{1}{T_{(STC)}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4.3)$$

Onde:

$I_{ph(STC)}$ – Corrente fotovoltaica no STC [A];

k_I – Coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito;

ΔT – Gradiente de temperatura do módulo [K];

$T_{(STC)}$ – Temperatura no STC [25 °C];

G – Irradiação incidente sobre o módulo [W/m^2];

$G_{(STC)}$ – Irradiação no STC [$1000 \text{ W}/\text{m}^2$];

$I_{0(STC)}$ – Corrente saturação reversa do diodo no STC [A];

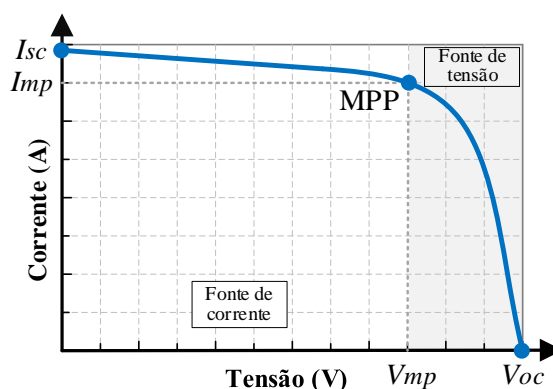
E_g – Energia do gap para o silício [1,22 eV].

Deste modo, a partir da descrição matemática dos módulos fotovoltaicos, torna-se possível obter o comportamento do gerador fotovoltaico por meio de simulação computacional, com respostas fieis a variações de irradiação, temperatura e carga (XIAO, 2017).

4.2.1.2 Comportamento típico e influências atmosféricas

A curva corrente-tensão (I-V) é uma das ferramentas gráficas mais importantes para análise do comportamento típico do módulo fotovoltaico. A Figura 4.3 mostra a curva I-V típica de um módulo fotovoltaico. Percebe-se o comportamento não linear descrito pela Equação (4.1).

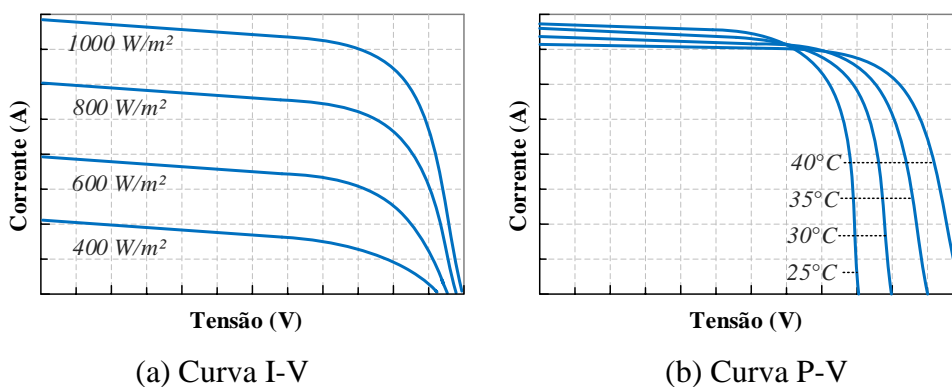
Figura 4.3 – Curva I-V de um módulo fotovoltaico



Fonte: Adaptado de Villalva, Gazoli e Filho (2009).

Para valor de tensão nula ($V = 0$), ou seja, curto-circuito, I_{pv} é igual I_{sc} . Para valor de corrente nulo ($I_{pv} = 0$), ou seja, tensão aberta V_{pv} é igual V_{oc} . A potência máxima é obtida para os quais o produto tensão-corrente é o maior possível. Nesse caso, a potência nominal (P_{mp}) é dada pelo ponto de máxima potência (MPP, *maximum power point*) de coordenadas (V_{mp}, I_{mp}) . As resistências R_p e R_s afetam diretamente a inclinação da curva I-V antes e depois do MPP, respectivamente (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009a).

Figura 4.4 – Efeito das condições atmosféricas na curva I-V



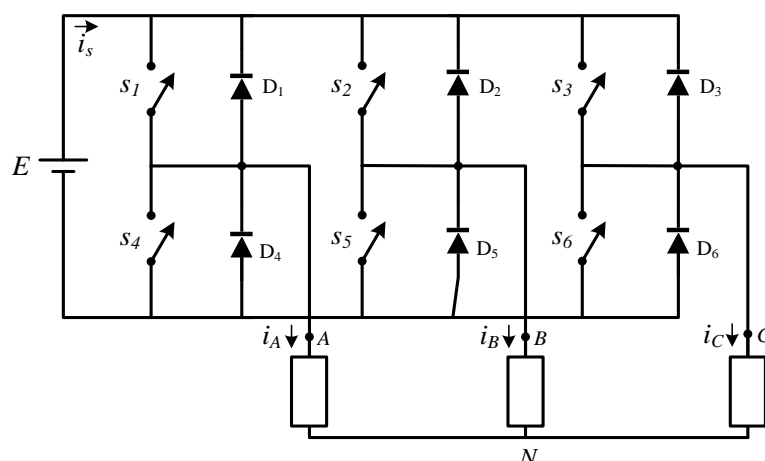
Fonte: Adaptado de Li et al. (2010).

A Figura 4.4 mostra graficamente o efeito das condições atmosféricas na curva I-V. Em (a) temos o comportamento com a variação da irradiação solar, e em (b) temos o comportamento resultante da variação de temperatura. A diminuição da irradiação causa o deslocamento do valor de I_{SC} , portanto os valores de corrente são atenuados, enquanto os valores de tensão são mantidos. Em contra partida, à medida que a temperatura se eleva, ocorre um deslocamento no valor de V_{OC} , desta forma, os valores de tensão são atenuados, ao passo que, os valores de corrente não se alteram (LI et al., 2010).

4.2.2 Inversor de frequência

A alimentação de um motor de indução CA através de uma fonte de energia fotovoltaica (CC) só é possível quando é adicionado um estágio de conversão elétrica entre ambos. Um inversor, ou conversor CC/CA, consiste em um circuito elétrico formado por chaves eletrônicas, alimentado por uma fonte de tensão de entrada CC e com tensão de saída variável trifásica de frequência também variável. O circuito básico do inversor trifásico em ponte está representado na Figura 4.5 (AHMED, 2000; KOUTROULIS et al., 2001).

Figura 4.5 – Circuito básico de um inversor CC/CA



Fonte: Adaptado de Ahmed (2000).

O tipo de controle de condução por 120° ilustra bem o funcionamento do circuito, em que cada chave é ligada por um período de 120° , desse modo, três chaves conduzem nos semiciclos positivos (s_1 , s_2 e s_3) e três chaves conduzem no semiciclo negativo (s_2 , s_4 e s_6), até completar dois ciclos de 360° , quando tudo recomeça. A tensão de fase resultante possui forma em degrau, valor máximo igual a $E/2$ e valor eficaz igual a $E/\sqrt{6}$. A frequência da onda resultante depende da frequência de chaveamento.

Em aplicações práticas é ideal a utilização de controles de chaveamento mais complexos, com o PWM senoidal ou SPWM. Em que uma onda triangular de alta frequência, chamada portadora, é comparada com uma outra onda senoidal que determina a frequência e fase da tensão de saída do inversor, chamada modulante. O resultado da comparação é um sinal de modulação que irá acionar as chaves do inversor, os pulsos possuem amplitude constante e ciclo de trabalho variado. O valor médio da onda gerada é praticamente senoidal e carrega as características do sinal modulante, por isso um filtro LC deve ser acoplado a saída do inversor para extrair o sinal senoidal desejado. Ainda, no caso do inversor de frequência, um estágio de retificação é adicionado para permitir a manipulação da frequência do sinal de alimentação de motores por exemplo, possibilitando o controle de velocidade de rotação do motor (HANNAN; ASLAM; GHAYUR, 2018; MOHAN; UNDERLAND; ROBBINS, 1995).

4.2.3 Motor de indução

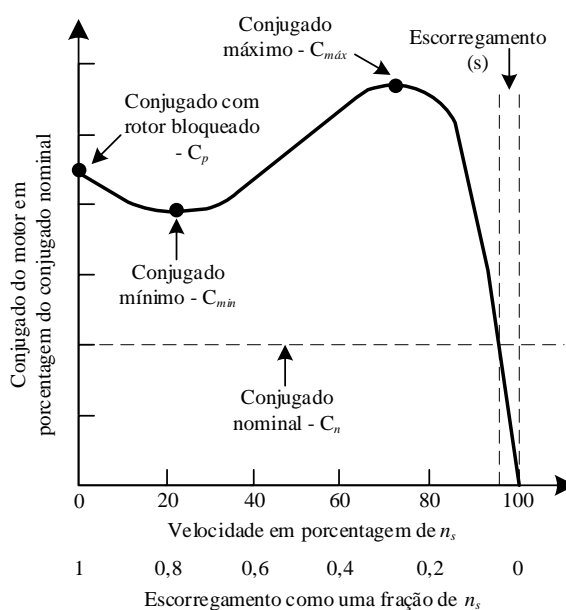
4.2.3.1 Principais características de um motor assíncrono

A velocidade de escorregamento é a diferença relativa entre a velocidade do rotor (n) e a velocidade síncrona dos campos magnéticos induzidos no estator (n_s). O escorregamento influencia diretamente na tensão produzida no rotor. A expressão que define o escorregamento (s) é dada pela Equação (4.4).

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4.4)$$

No momento da partida, como o rotor está parado ($n = 0$), o escorregamento é unitário ($s = 1$) e consequentemente a frequência do rotor (f_r) é igual a frequência do estator (f_e). Assim o campo induzido no rotor gira na velocidade síncrona (n_s). O conjugado de partida faz com que o rotor tenda a girar no sentido de rotação do campo de indução do estator. Se esse for maior do que a oposição da carga no eixo do motor, então este atingirá a velocidade de operação. É importante lembrar que a velocidade de operação não pode se igualar a velocidade síncrona, pois os condutores do rotor estariam estacionários do ponto de vista do campo do estator, e portanto, não ocorreria indução e consequentemente conjugado (UMANS, 2014). A Figura 4.6 mostra a curva conjugado *versus* velocidade de um motor de indução operando com tensão e frequência constantes.

Figura 4.6 – Curva típica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução



Fonte: Adaptado de Fitzgerald (2014).

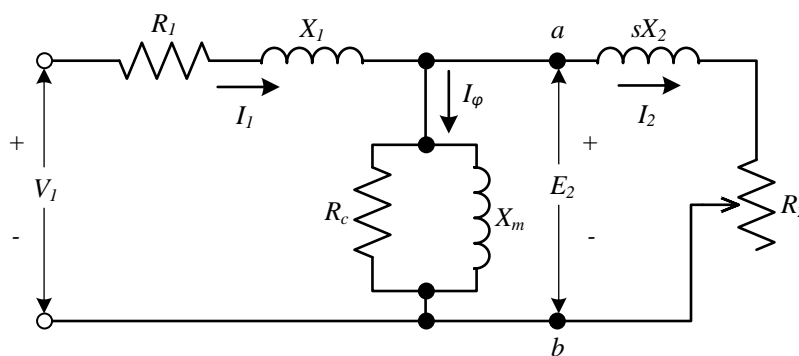
Observando a curva percebe-se que para valores pequenos de escorregamento, o conjugado se comporta de forma proporcional, isso porque a impedância do rotor é bastante resistiva e independente de s . No entanto, à medida que s aumenta a impedância do rotor passa a ter mais influência de s , devido a parcela da reatância de dispersão do rotor, e o conjugado diminui sua proporcionalidade. À medida que s aumenta o conjugado cresce até atingir o seu valor máximo. Para motores de indução em operação normal os valores de escorregamento costumam variar de 2 a 10%, conseqüentemente a frequência de rotor fica em torno de 1 a 6 Hz, considerando motores de frequência 60 Hz (UMANS, 2014).

Os motores elétricos convertem a energia elétrica em energia mecânica para posterior acionamento de uma bomba. A potência (P_1) é a energia elétrica consumida pelo motor. A potência (P_2) representa a energia transferida ao eixo do motor e é sempre menor do que P_1 , devido as perdas elétricas nos enrolamentos e as perdas por atrito mecânico. A razão entre P_2 e P_1 é a definida como a eficiência do motor. A potência (P_3) é a responsável por acionar a bomba e geralmente é igual a P_2 , mas no caso de bombas com eixo longo, o atrito no rolamento do eixo pode ser significativo, então P_3 é menor do que P_2 . A potência hidráulica (P_4) é a energia hidráulica final entregue pela bomba, definida como o produto da vazão pela pressão (CHAPMAN, 2013; GRUNDFOS, 2020).

4.2.3.2 *Circuito equivalente do motor de indução*

Para facilitar a expressão de um circuito equivalente de uma máquina polifásica é usual supor que uma ligação em Y, em que as tensões e correntes são expressas por seus valores de fase. Deste modo, um circuito pode ser determinado para uma fase e posteriormente replicado para as demais fases, com seus respectivos deslocamentos e fase. Assim, pode-se definir o circuito equivalente do motor de acordo com a Figura 4.7.

Figura 4.7 – Circuito equivalente do motor de indução



Fonte: Adaptado de Fitzgerald (2014).

Sendo V_1 a tensão de terminal do estator, E_2 a força eletromotriz de fase gerada pelo fluxo de entreferro resultante, que se diferem entre si devido as perdas no estator, resultado da queda de tensão na impedância de dispersão do estator ($Z_1 = R_1 + jX_1$).

A corrente do estator (I_1) é composta pela componente de carga e de magnetização. A componente de carga I_2 gera a força eletromotriz corresponde ao rotor. Já a componente de excitação I_ϕ é a corrente de magnetização do núcleo. Esta por sua vez é formada pela componente de perdas no núcleo (I_c) e pela componente de magnetização (I_m).

Sabendo que o rotor opera em uma frequência menor do que a do estator, determinada pelo escorregamento, $f_r = sf_e$, e que a modelagem considera o motor assíncrono operando na frequência de escorregamento, define-se a impedância de dispersão do rotor referida ao estator $Z_2 = R_2 + jsX_2$.

Define-se ainda:

R_1 – Resistência efetiva do estator (Ω);

X_1 – Reatância de dispersão do estator (Ω);

R_c – Resistência de perdas no núcleo (Ω);

X_m – Reatância de magnetização (Ω);

R_2 – Resistência do rotor referida (Ω);

X_2 – Reatância de dispersão do rotor referida, na frequência de escorregamento (Ω).

4.2.4 Bomba centrífuga

4.2.4.1 Parâmetros hidráulicos de um sistema de recalque

A seguir serão descritos os principais parâmetros hidráulicos que compõem um sistema de recalque.

4.2.4.2 Altura manométrica

A altura manométrica representa a energia absorvida por um fluido ao atravessar uma bomba hidráulica, é definida como:

$$H_m = z_2 - z_1 + \Delta h = H_g + \Delta h \quad (4.5)$$

Onde:

$z_2 - z_1$ – Altura geométrica entre dois pontos determinados;

Δh – Perda de carga nas tubulações que interligam os pontos 1 e 2.

4.2.4.3 Potência hidráulica

A potência hidráulica (P_H) é o trabalho realizado sobre o fluido ao passar pela bomba, é dada pela Equação (4.6):

$$P_H = \gamma \cdot Q \cdot H_m \quad (4.6)$$

Em que:

γ – Peso específico da água (~9806 N/m³);

Q – Vazão que passa pela bomba (m³/s);

H – Altura útil do sistema (m);

O rendimento da bomba (η_b) é dado pela razão entre a potência hidráulica e a potência absorvida pela bomba (P_b). Esse rendimento representa as perdas no interior da bomba e varia bastante de acordo com a vazão (Q), altura manométrica (H_m) e tipo de bomba. A fim de obter o rendimento do conjunto motor-bomba é preciso incluir o rendimento do motor elétrico (η_M) que determina a porcentagem de potência que é transferida em relação a potência recebida da fonte de energia (BAPTISTA; COELHO, 2014).

Assim, determina-se o rendimento do conjunto motor-bomba (η):

$$\eta = \eta_b \cdot \eta_M \quad (4.7)$$

Logo, a potência do conjunto motor-bomba (P), em W , é dada por:

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{\eta} \quad (4.8)$$

4.2.4.4 Semelhança hidráulica

A semelhança mecânica permite a determinação de parâmetros de um protótipo de acordo com os parâmetros de um modelo, desde que exista semelhança geométrica, cinemática e dinâmica entre modelo e protótipo. Assim, submetidos a mesma situação terão comportamentos idênticos. As seguintes equações (*Rateaux*) definem as relações de semelhança de acordo com as grandezas de interesse (BAPTISTA; COELHO, 2014):

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \frac{n_p}{n_m} \quad (4.9)$$

$$\frac{H_p}{H_m} = \left(\frac{n_p}{n_m} \right)^2 \quad (4.10)$$

$$\frac{P_p}{P_m} = \left(\frac{n_p}{n_m} \right)^3 \quad (4.11)$$

Em que:

m – Indicativo de grandeza do modelo;

p – Indicativo de grandeza do protótipo.

4.3 Dimensionamento e aplicação em um estudo de caso

Nesta seção, o dimensionamento de um sistema de irrigação por gotejamento alimentado por fonte solar fotovoltaica e motor de indução CA será descrito. O estudo de caso escolhido é um sistema de pequeno porte para irrigação de monocultura em uma área de aproximadamente 2 ha. O escopo do dimensionamento, baseado em dados predefinidos, passará pela determinação do manejo da irrigação, cálculo da potência do conjunto motor-bomba, disposição do arranjo fotovoltaico e do conjunto de tubulações.

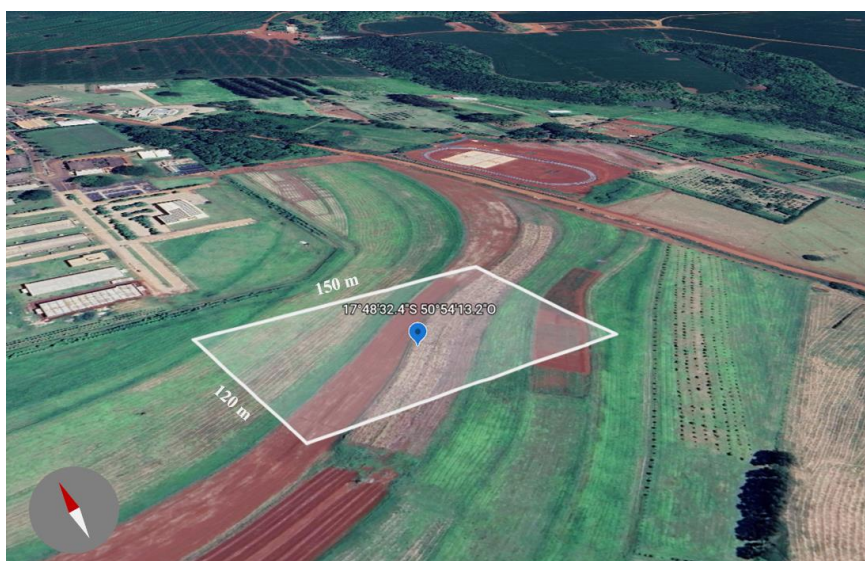
4.3.1 Parâmetros de projeto e estudo de caso

O problema definido é para exemplificar a aplicação de um sistema de bombeamento solar para irrigação, na região do Centro-Oeste brasileiro, implantado em propriedades destinadas a agricultura familiar. A cultura foi escolhida com base em produções comuns nos estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, região foco deste estudo. A área a ser irrigada possui 1,8 hectares em formato retangular e será destinada inteiramente a plantação. O sistema de irrigação será alimentado exclusivamente pelo arranjo fotovoltaico, e será dimensionado para funcionamento durante todas as épocas do ano. O tipo de irrigação selecionado é o por gotejamento, por apresentar diversas vantagens de eficiência de aplicação da água, de forma a alinhar ao proposito sustentável e de baixa manutenção da proposta.

4.3.1.1 Caracterização do local de instalação

O local de instalação definido irá considerar a localização no município de Rio Verde – Goiás, com comprimento de 150 metros e largura de 120 metros, totalizando 1,8 hectares (18000 m²) em área útil. O terreno encontra-se em local com exposição solar voltada para o Norte, como mostra a Figura 4.8.

Figura 4.8 - Local de instalação do sistema de irrigação



Fonte: Autora (2022).

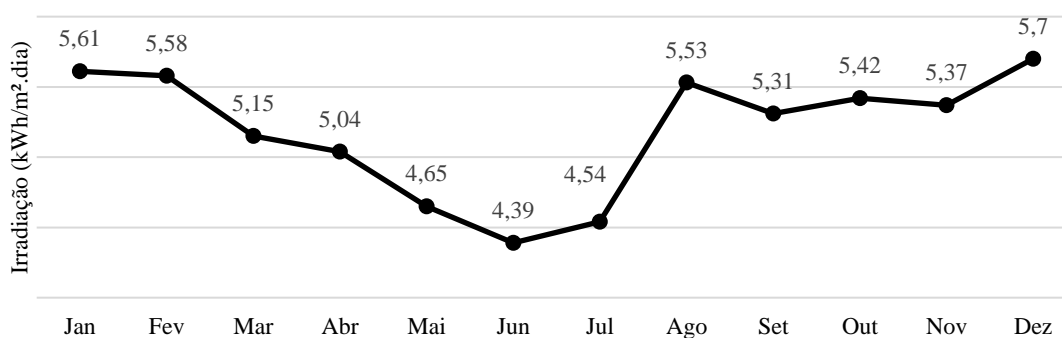
Todo o terreno será utilizado para cultivo em área aberta, irrigada por um sistema de gotejamento, formada por linhas laterais igualmente espaçadas de fitas gotejadoras. As fitas serão ligadas as linhas de distribuição, que por sua vez, serão conectadas a linha principal, que receberá a água da tubulação de recalque.

As coordenadas do local de instalação são 17°48'32.4"S 50°54'13.2"O. Essa informação permitiu o levantamento da exposição solar, umidade relativa do ar e temperatura média da região.

4.3.1.2 Irradiação solar

A Figura 4.9 mostra irradiação solar no plano horizontal para o município de Rio Verde – GO, retiradas do *site* do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB).

Figura 4.9 – Irradiação solar no plano horizontal para Rio Verde - GO



Fonte: CRESESB (2022).

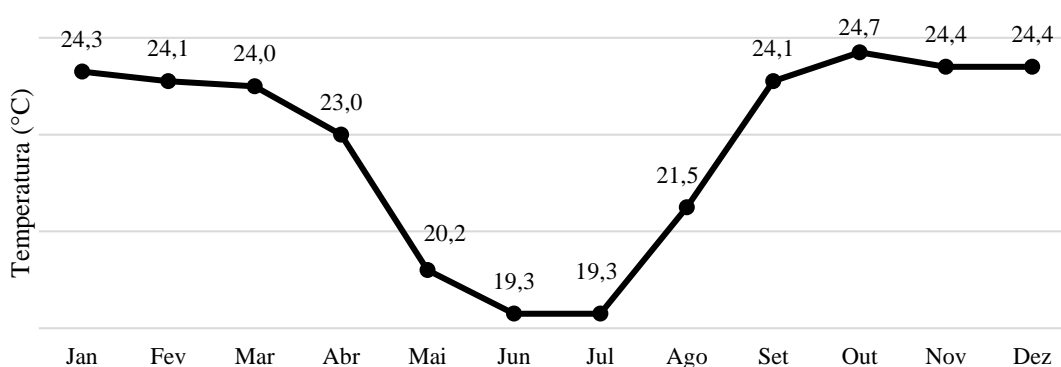
Percebe-se que os meses com os menores níveis de irradiação são maio, junho e julho, sendo o menor índice diário no valor de 4,39 kWh/m²·dia. Esse valor será importante no dimensionamento do arranjo fotovoltaico, já que é equivalente ao índice de Horas de Sol Pleno (HSP) da região de instalação, conforme a equação (4.12). Esse índice é definido como o intervalo de tempo médio, em horas, em que a irradiância permaneceria em 1000 W/m² (valor da irradiação no STC – *Standard Test Conditions*), durante o dia.

$$HSP = \frac{4,39(\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia})}{1000(\text{W/m}^2)} = 4,39 \text{ horas} \quad (4.12)$$

4.3.1.3 Temperatura média e umidade relativa do ar

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar foram retiradas do Normais Climatológicas do Brasil do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o município de Jataí – GO, o mais próximo da região de instalação com estação encontrado. A Figura 4.10 mostra a temperatura média compensada para cada mês do ano. Percebe-se que os meses que possuem menor temperatura coincidem com os meses de menor incidência de luz solar. Observando os dados, tem-se o valor médio anual de 22,8 °C.

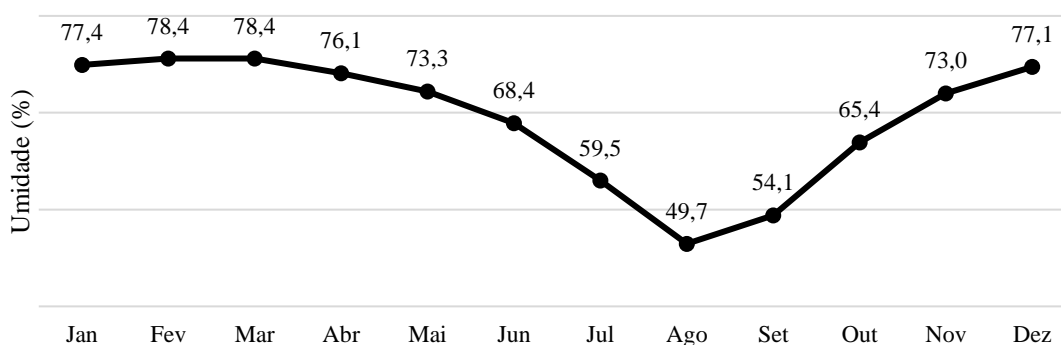
Figura 4.10 – Temperatura média compensada mensal em Jataí – GO



Fonte: INMET (2022).

Já a Figura 4.11 mostra a umidade relativa do ar compensada mensal, percebe-se que os meses com menor umidade são julho, agosto e setembro. A média anual dos meses apresentados é de 69,2%.

Figura 4.11 – Umidade relativa do ar compensada mensal em Jataí – GO



Fonte: INMET (2022).

Com base nos dados apresentados será possível determinar o manejo e dimensionar o sistema de irrigação e o bombeamento fotovoltaico.

4.3.1.4 *Cultura selecionada*

A cultura selecionada é o tomateiro, devido ao fato que o Brasil é um grande produtor do fruto, sendo Goiás o maior produtor de tomate para processamento no país, responsável em 2010 por quase 80% da produção nacional. Outro fator que contribuiu para sua escolha do tomateiro como cultura é que a sua produção é realizada durante a estação de seca do ano, entre março e setembro, o que faz a aplicação suplementar de água indispensável para o correto desenvolvimento do fruto (MAROUELLI; SILVA; SILVA, 2012).

O sistema de irrigação por gotejamento foi escolhido, embora menos comum, porque apresenta inúmeras vantagens em relação a eficiência de irrigação, quando comparada ao uso de aspersores. A utilização de gotejadores promove uma eficiência no uso da água, aumento de produtividade, menor gasto com energia e mão de obra, redução no uso de fungicidas, evita pragas nas folhagens e frutos por não serem molhadas diretamente e oferecem maior receita ao produtor. As principais desvantagens são relacionadas ao custo de implementação inicial e possível entupimento dos gotejadores (MAROUELLI; SILVA, 1998).

Figura 4.12 – Exemplo de cultivo do tomate



Fonte: HORA (2022).

Para os sistemas de irrigação por gotejamento do tomateiro para processamento, o espaçamento recomendado entre linhas laterais, no plantio em fileiras simples, fica entre

120 e 150 cm. Já em relação ao espaçamento entre gotejadores, é comum a utilização de 10 a 20 cm, para solos típicos do cerrado (MAROUELLI; SILVA; SILVA, 2012).

4.3.2 *Manejo de irrigação*

A determinação do manejo de irrigação será realizada de acordo com o dimensionamento proposto na circular técnica 30 da Embrapa. Dentre os métodos apresentados o método do turno de rega simplificado foi o escolhido para este exemplo. Esse método possui a vantagem de não utilizar equipamentos de medição para determinação de parâmetros climáticos, utilizando em seu lugar dados médios históricos da região. A configuração de plantio será determinada de acordo com os espaçamentos recomendados de maneira adequada ao terreno e método de irrigação.

O método é dividido em passos que determinam valores de evapotranspiração, turno de rega, tipo de solo e eficiência de irrigação. Os dados para dimensionamento são:

- Solo: Classe textura I, argila (cerrado);
- Mês: julho;
- Temperatura média do ar: 19,3°C;
- Umidade relativa do ar: 59,5%;
- Estádio: frutificação (início);
- Área irrigada: 1,8 ha;
- Espaçamento entre linhas de gotejadores: 1,2 m;
- Espaçamento entre gotejadores: 0,2 m;
- Vazão do gotejador: 1,1 L/h.

A seguir serão descritos os passos para dimensionamento do manejo de irrigação que irá determinar a evapotranspiração de referência (E_{To}), o coeficiente da cultura (K_C), a evapotranspiração da cultura (E_{Tc}), a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (Z), o tipo de solo, o turno de rega (TR), a eficiência de irrigação (U_e), a lâmina de água total necessária (LTN); o volume total de água (V_T) e o tempo de irrigação (T_i).

4.3.2.1 *Evapotranspiração de referência (E_{To})*

Para obter a evapotranspiração de referência (E_{To}), utiliza-se a Tabela 4.1 e os valores de umidade relativa do ar e temperatura média do local de instalação.

Tabela 4.1 – Evapotranspiração de referência (ET_o), em mm/dia

Temp (°C)	Umidade relativa do ar (%)									
	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
18	6,7	6,1	5,5	5,0	4,4	3,9	3,3	2,8	2,2	1,7
20	7,3	6,7	6,1	5,5	4,9	4,3	3,6	3,0	2,4	1,8
22	8,0	7,3	6,6	6,0	5,3	4,6	4,0	3,3	2,7	2,0
24	8,6	7,9	7,2	6,5	5,8	5,0	4,3	3,6	2,9	2,2
26	9,4	8,6	7,8	7,0	6,2	5,5	4,7	3,9	3,1	2,3
28	10,1	9,3	8,4	7,6	6,7	5,9	5,1	4,2	3,4	2,5
30	10,9	10,0	9,1	8,2	7,3	6,4	5,4	4,5	3,6	2,7
32	11,7	10,7	9,7	8,8	7,8	6,8	5,8	4,9	3,9	2,9

Fonte: Adaptado de Marqueili e Silva (2001).

Com base na Tabela 4.1, considerando que a umidade relativa do ar é 59,5% e a temperatura média é de 19,3°C, obtém-se o valor de ET_o = 4,9 mm/dia.

4.3.2.2 Coeficiente da cultura (K_C)

O segundo passo é encontrar o coeficiente de cultura (K_C) para cada estágio de desenvolvimento da planta, através da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores médios de turno de rega (TR), tensão crítica de água no solo (T_s), coeficiente da cultura (K_C) e profundidade efetiva do sistema radicular do tomateiro (Z)

Estádio	Duração (dias)	TR (dias)	T _s (kPa)	K _C		Z (cm)
				Normal	Direto	
Inicial	6 - 8	1 - 2	-	0,45	0,35	10
Vegetativo	23 - 27	4 - 6	70	0,40	0,35	20 - 30
Frutificação	50 - 60	1 - 2	15	0,95	0,85	30 - 40
Maturação	26 - 30	2 - 4	40	0,70	0,65	40

Fonte: Adaptado de Marqueili e Silva (2001).

Os dados consideram a irrigação do tomateiro por gotejamento nos diferentes estágios de desenvolvimento da cultura. Além disso, os valores de turno de rega (TR) são os recomendados para a região do cerrado, o coeficiente da cultura (K_C) é dado para plantio convencional (normal) e direto de mudas em palhada (direto). Ainda, deve-se considerar o menor valor referente ao início do estágio.

Assim, considerando o estágio de desenvolvimento de frutificação inicial e plantio normal, tem-se o valor de K_C = 0,95.

4.3.2.3 *Evapotranspiração da cultura (ET_c)*

O terceiro passo é calcular a evapotranspiração da cultura (ET_c) para cada estágio de desenvolvimento do tomateiro. Considerando que $K_C = 0,95$ e $ET_0 = 4,9$ mm/dia, o valor de ET_c para o estágio de frutificação é:

$$ET_c = K_C \cdot ET_0 = 0,95 \cdot 4,9 = 4,65 \text{ mm/dia} \quad (4.13)$$

4.3.2.4 *Profundidade efetiva do sistema radicular (Z)*

A profundidade efetiva do sistema radicular (Z) deve ser determinada pela Tabela 4.2 de acordo com cada estágio da cultura. A profundidade efetiva corresponde a camada onde encontram-se cerca de 80% das raízes.

De acordo com a Tabela 4.2, os valores de Z variam de 30 a 40 centímetros, como deve-se considerar o menor valor para o estágio de frutificação inicial, $Z = 30$ cm.

4.3.2.5 *Tipo de solo*

Conhecer o tipo de solo é essencial para dimensionamento do manejo de irrigação, já que a capacidade de armazenamento de água solo determina o intervalo entre as irrigações de cada estágio de desenvolvimento das plantas. O tipo de solo pode ser caracterizado de acordo com a sua textura e estrutura. Os critérios de tipo de solo estão apresentados em Marouelli e Silva (2002), que recomenda que os solos do cerrado de textura fina devem ser considerados como do tipo II, para efeito de cálculo.

4.3.2.6 *Turno de rega (TR)*

O turno de rega (TR) pode ser encontrado de duas formas. A Tabela 4.2 mostra os valores médios de turno de rega para cada estágio de desenvolvimento do tomateiro. Também é possível determinar TR através da Tabela 4.3, com base nos valores de ET_c, Z e textura do solo.

De acordo com a Tabela 4.3, considerando o estágio de frutificação, evapotranspiração da cultura, $ET_c = 4,65$ mm/dia, profundidade efetiva das raízes da cultura, $Z = 30$ cm e a textura do solo tipo II, tem-se que o turno de rega, $TR = 1$ dia, para o mês de julho.

Tabela 4.3 – Sugestão de turno de rega (dias) para o tomateiro irrigada por gotejamento

Etc (mm/dia)	Profundidade efetiva das raízes (Z)											
	10 cm			20 cm			30 cm			40 cm		
	Solo tipo			Solo tipo			Solo tipo			Solo tipo		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Estádio inicial e de frutificação												
2	1/2	1	2	1	2	3	2	3	5	-	-	-
3	1/3	1	1	1	1	2	1	2	4	1	3	5
4	1/4	1/2	1	1/2	1	2	1	2	3	1	2	4
5	1/4	1/2	1	1/2	1	1	1/2	1	2	1	2	3
6	1/5	1/3	1/2	1/3	1	1	1/2	1	2	1	1	2
7	1/6	1/3	1/2	1/3	1/2	1	1/2	1	1	1/2	1	2
8	1/7	1/3	1/2	1/4	1/2	1	1/2	1	1	1/2	1	2
9	1/8	1/4	1/2	1/4	1/2	1	1/3	1	1	1/2	1	1
10	-	-	-	1/5	1/2	1	1/3	1/2	1	1/2	1	1
11	-	-	-	1/5	1/2	1/2	1/3	1/2	1	1/3	1	1
12	-	-	-	1/5	1/3	1/2	1/4	1/2	1	1/3	1	1
Estádio vegetativo												
2	-	-	-	2	5	8	3	7	12	-	-	-
3	-	-	-	1	3	5	2	5	8	-	-	-
4	-	-	-	1	2	4	1	4	6	-	-	-
5	-	-	-	1	2	3	1	3	5	-	-	-
6	-	-	-	1/2	2	3	1	2	4	-	-	-
7	-	-	-	1/2	1	2	1	2	3	-	-	-
8	-	-	-	1/2	1	2	1	2	3	-	-	-
9	-	-	-	1/2	1	2	1/2	2	3	-	-	-
10	-	-	-	1/2	1	1	1/2	1	2	-	-	-
11	-	-	-	1/3	1	1	1/2	1	2	-	-	-
12	-	-	-	1/3	1	1	1/2	1	2	-	-	-
Estádio de maturação												
3	-	-	-	-	-	-	1	3	6	2	4	8
4	-	-	-	-	-	-	1	2	4	1	3	6
5	-	-	-	-	-	-	1	2	3	1	3	5
6	-	-	-	-	-	-	1	2	3	1	2	4
7	-	-	-	-	-	-	1/2	1	2	1	2	3
8	-	-	-	-	-	-	1/2	1	2	1	2	3
9	-	-	-	-	-	-	1/2	1	2	1/2	1	2
10	-	-	-	-	-	-	1/2	1	2	1/2	1	2
11	-	-	-	-	-	-	1/2	1	1	1/2	1	2
12	-	-	-	-	-	-	1/3	1	1	1/2	1	2

Fonte: Marouelli e Silva (2001).

4.3.2.7 Eficiência de irrigação (U_e)

A eficiência de irrigação (U_e) está ligada a uniformidade dos emissores, nesse caso os gotejadores, visa mensurar as perdas decorrentes de percolação, escoamento superficial, vazamentos e irrigações inadequadas. Para sistemas dimensionados corretamente, a eficiência gira em torno de 0,85 a 0,90. No entanto, em campo é comum observar eficiências de 0,50 a 0,75, geralmente relacionado a entupimento dos gotejadores, devido a sistemas mal dimensionados, equipamentos de baixa qualidade e manutenção inadequada. Para esse exemplo, considera-se $U_e = 0,85$.

As perdas por percolação profunda não controlável podem ocorrer mesmo em sistemas bem manejados. A eficiência associada a esses tipos de perdas (E_s) está diretamente relacionada ao tipo do solo. Para solos tipo I, $E_s = 0,90$, tipo II, $E_s = 0,95$ e tipo III, $E_s = 1,00$. Portanto, considera-se $E_s = 0,95$ para este exemplo.

4.3.2.8 Lâmina total de água necessária por irrigação (LTN)

A determinação da lâmina total de água a ser aplicada por irrigação (LTN) para cada estágio de desenvolvimento da cultura é dada pela Equação (4.14)

$$LTN = \frac{ETc \cdot TR}{U_e \cdot E_s} = \frac{4,65 \cdot 1}{0,85 \cdot 0,95} = 5,76 \text{ mm} \quad (4.14)$$

4.3.2.9 Volume de água a ser aplicado por irrigação (V_i)

O volume de água total a ser aplicado por irrigação (V_i) é determinado pela lâmina total de água (LTN) e a área irrigada (A_i). Como a área é igual a 1,8 ha e LTN = 5,76 mm, tem-se:

$$V_i = 10 \cdot LTN \cdot A_i = 10 \cdot 5,76 \cdot 1,8 = 103,68 \text{ m}^3 \quad (4.15)$$

4.3.2.10 Tempo de irrigação (T_i)

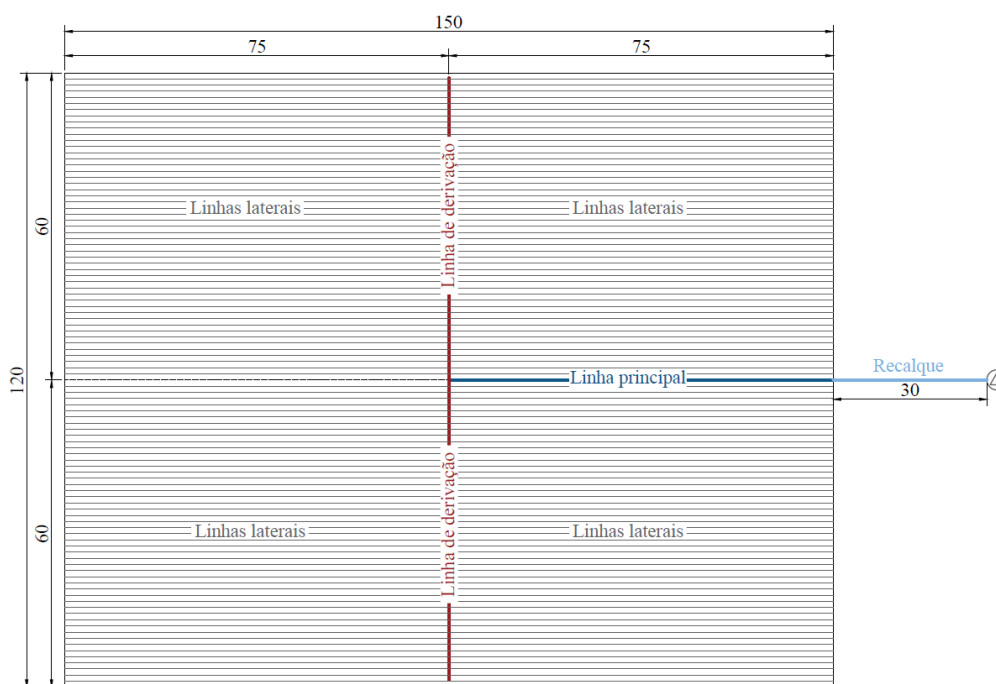
A determinação do tempo de irrigação é dada pela lâmina total de água (LTN), a vazão do gotejador (V_g) e os espaçamentos entre linhas laterais (S_l) e entre emissores (S_g). Considerando que LTN = 5,76 mm, a vazão do gotejador é 1,1 L/s, o espaçamento entre linhas laterais é 1,2 metros e entre gotejadores é 20 centímetros, tem-se:

$$T_i = 60 \cdot \frac{LTN \cdot S_l \cdot S_g}{V_g} = 60 \cdot \frac{5,76 \cdot 1,2 \cdot 0,2}{1,1} = 75,40 \text{ min} \quad (4.16)$$

4.3.2.11 Configuração de plantio

A área de plantio foi dividida em duas subáreas de 60 por 150 metros. A linha principal é a responsável por direcionar a água até as linhas de derivação, com comprimento de 75 metros. As duas linhas de derivação têm 60 metros de comprimento cada e tem a função de alimentar as linhas laterais. Já as linhas laterais são formadas por fitas de gotejamento, espaçadas entre si em 1,2 metros, com 75 metros de comprimento cada. A tubulações de recalque tem 30 metros. A Figura 4.13 mostra o diagrama de plantio detalhando a disposição das tubulações de água.

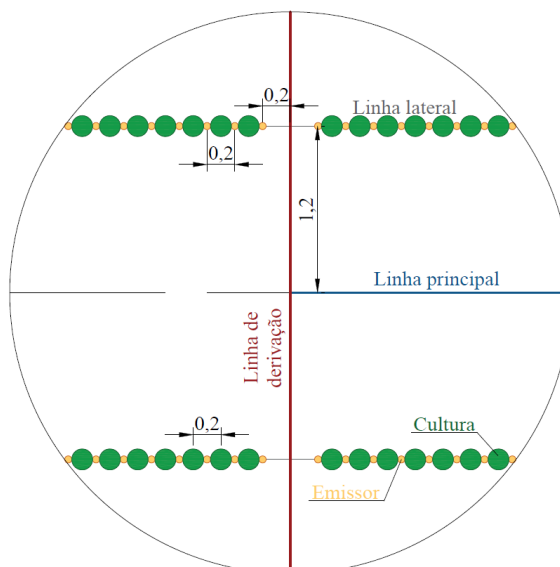
Figura 4.13 – Diagrama de plantio



Fonte: Autora (2022).

Os tomateiros estão espaçados em 0,2 metros entre si, assim como os emissores da fita de gotejamento. As fitas estão espaçadas em 1,2 metros espalhadas por toda a área de plantio. Para cada tomateiro existem dois gotejadores a 0,1 metros do centro da cultura, permitindo uma maior uniformidade na irrigação. A Figura 4.14 mostra o detalhe ampliado do diagrama de plantio, os espaçamentos entre culturas, emissores, linha principal, linhas de derivação e linhas laterais (fitas gotejadoras).

Figura 4.14 – Detalhe de espaçamentos das culturas e emissores



Fonte: Autora (2022).

No total, são 196 fitas gotejadoras de 75 metros cada, 2 linhas de derivação de 60 metros e 1 linha principal de 75 metros. Deste modo, a área de 1,8 ha permite o plantio de mais de 73 mil culturas de tomateiro.

4.3.3 Dimensionamento das tubulações

O dimensionamento das tubulações é realizado de acordo com os dados hidráulico e tipos de materiais a serem utilizados. A vazão necessária para o projeto (Q_n) é dada pela seguinte equação, considerando 2 unidades operacionais de projeto (N_{op}), como mostra a configuração de plantio:

$$Q_n = 10 \cdot \frac{A_i \cdot LTN}{N_{op} \cdot T_i} = 10 \cdot \frac{1,8 \cdot 5,76}{2 \cdot 1,26} = 41,3 \text{ m}^3/\text{h} \quad (4.17)$$

4.3.3.1 Perda de carga nas tubulações

A perda de carga nas tubulações representa as transformações de energia cinética e potencial de um líquido em calor. Existem duas classificações principais as perdas de carga distribuídas, ao longo da tubulação, e localizadas, perdas devido a conexões e aparelhos em pontos específicos. A equação de *Hazen-Williams* tem sido amplamente utilizada para cálculo da perda de carga em tubulações que conduzem água.

$$J = 10,64 \cdot \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \quad (4.18)$$

Em que:

J – Perda de carga unitária na tubulação (m/m);

Q – Vazão na tubulação (m³/s);

D – Diâmetro da tubulação (m);

C – Coeficiente de perda de carga (depende do material da tubulação).

O fator de correção de *Christiansen* (F) é usado para incluir o efeito dos gotejadores na perda de carga da tubulação. Depende do número de gotejadores (n) e da constante de Blasius (m) que é 1,852.

$$F = \frac{1}{1+m} + \frac{1}{2n} + \frac{\sqrt{m-1}}{6n^2} \quad (4.19)$$

Já a perda de carga na tubulação lateral (h_f) é dada pela seguinte equação, corrigida por F , e que leva em consideração o comprimento da tubulação e o coeficiente para tubulação com emissor ($C_e = 100$).

$$h_f = J \cdot L \cdot F \cdot \left(\frac{C}{C_e} \right)^{1,852} \quad (4.20)$$

Conhecendo-se o valor máximo permitido para cada tubulação, nesse caso, as linhas laterais, linhas de derivação e linhas principais, é possível obter o diâmetro recomendado para cada linha.

4.3.3.2 Dimensionamento das linhas laterais

A linha lateral (LL) é a que contém os emissores de água responsáveis pela irrigação localizada das culturas. Como o comprimento da linha lateral é 75 metros e o espaçamento entre emissores é 0,2 metros, o número de emissores (N_e) por linha lateral é 375. Já a vazão da linha lateral (Q_{LL}) é dada pela multiplicação do número de emissores (N_e) pela vazão de cada emissor, 1,1 L/s. Assim, $Q_{LL} = 412,5$ L/h ou 0,000115 m³/s.

O modelo de fita gotejadora escolhido foi a *Streamline™ X 16060 (6 mil)*, da marca *Netafim*, que possui pressão de trabalho de 1 bar, vazão de 1,1 L/h, espaçamento de 20 cm e diâmetro interno de 16 mm. A perda de carga admitida no emissor é calculada como uma porcentagem da pressão de serviço, nesse caso de 1 bar ou 10 m.c.a., considerando que ela não deve passar de 20% da pressão de serviço, a perda de carga na linha lateral permitida (h_{fTL}) é 2 m.c.a. A Tabela 4.4 mostra o dimensionamento das linhas laterais considerando os dados da fita gotejadora escolhida.

Tabela 4.4 – Dimensionamento das linhas laterais (LL)

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Diâmetro da fita gotejadora	D_{TL}	0,016	m
Vazão da linha lateral	Q_{TL}	$1,15 \cdot 10^{-4}$	m^3/s
Coefficiente de rugosidade	C_{PBD}	144	-
Perda de carga unitária da linha lateral	J_{TL}	0,0300	m/m
Constante de <i>Christiansen</i>	M	1,852	-
Número de emissores	N_e	375	-
Fator de correção	F	0,3520	-
Comprimento total da linha lateral	L_{TL}	75	m
Coefficiente para tubulação com emissor	C_e	100	-
Perda de carga da tubulação lateral	h_{rTL}	1,5566	m

Fonte: Autora (2022).

4.3.3.3 Dimensionamento das linhas de derivação

A determinação do diâmetro das linhas de derivação (LD) é feita de maneira semelhante à das linhas laterais (LL). A vazão da linha de derivação é dada pela soma das vazões de todas as linhas laterais alimentadas por essa. Como a linha de derivação tem 60 metros alimentando linhas laterais com espaçamento de 1,2 metros, têm-se um total de 50 linhas laterais em cada lado da linha de derivação. Considerando que a vazão total dos emissores de uma linha é 412,5 L/h, conclui-se que cada linha de derivação tem vazão de 41.250 L/h ou 0,01146 m^3/s .

A perda de carga máxima admitida (h_{rTD}), levando em conta que o terreno é plano, é de 30% da pressão das linhas laterais, ou seja, 3 m.c.a. A tubulação de derivação será de polietileno de baixa densidade com diâmetro nominal de 90 mm, própria para aplicações em saneamento e irrigação. A Tabela 4.5 mostra o dimensionamento das linhas de derivação conforme os dados apresentados.

Tabela 4.5 – Dimensionamento das linhas de derivação (LD)

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Diâmetro da tubulação de derivação	D_{TD}	0,09	m
Vazão da linha de derivação	Q_{TD}	$1,15 \cdot 10^{-2}$	m^3/s
Coefficiente de rugosidade	C_{PBD}	144	-
Perda de carga unitária da linha de derivação	J_{TD}	0,0338	m/m
Constante de <i>Christiansen</i>	m	1,852	-
Número de derivações	N_e	60	-
Fator de correção	F	0,3590	-
Comprimento total da linha de derivação	L_{TD}	60	m
Coefficiente para tubulação com emissor	C_e	100	-
Perda de carga da tubulação de derivação	h_{rTD}	1,4285	m

Fonte: Autora (2022).

4.3.3.4 Dimensionamento da linha principal

A linha principal (LP) deve alimentar as linhas de derivação a fim de entregar água a todos os emissores da área irrigada. Considerando 2 linhas de derivação, tem-se que a vazão da linha principal (Q_{TP}) deve ser de $0,0229 \text{ m}^3/\text{s}$. Para linhas principais adota-se velocidade de escoamento (v_{TP}) entre 1,0 e 2,0 m/s. Assim, pode-se determinar pela Equação (4.21) o diâmetro da tubulação principal (D_{TP}).

$$D_{TP} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{TP}}{\pi \cdot v_{TP}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,29 \cdot 10^{-2}}{\pi \cdot 1,9}} = 0,124 \text{ m} \quad (4.21)$$

A melhor configuração considerando custo-benefício encontrada foi para $v_{TP} = 1,9 \text{ m/s}$ e $D_{TP} = 125 \text{ mm}$. Já a perda de carga da a linha principal (h_{fTP}), para tubulação de PVC ($C = 150$) é dada pela Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Perda de carga da linha principal (LP)

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Diâmetro da tubulação principal	D_{TP}	0,125	m
Vazão da tubulação principal	Q_{TP}	$2,29 \cdot 10^{-2}$	m^3/s
Coefficiente de rugosidade	C_{PVC}	150	
Perda de carga unitária da linha principal	J_{TP}	0,0228	m/m
Comprimento total da linha principal	L_{TP}	75	m
Perda de carga da tubulação principal	h_{fTP}	1,7112	m

Fonte: Autora (2022).

4.3.3.5 Perdas de carga da tubulação de recalque e sucção

A tubulação de recalque deve ter diâmetro igual ou superior ao diâmetro da linha principal. Da Figura 4.13 temos que o comprimento da tubulação de recalque é de 30 metros, considerando um material de aço zincado para a tubulação ($C = 120$), tem-se a perda de carga no recalque, conforme a Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Perda de carga na tubulação de recalque (TR)

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Diâmetro da tubulação de recalque	D_{TR}	0,125	m
Vazão da tubulação de recalque	Q_{TR}	$2,29 \cdot 10^{-2}$	m^3/s
Coefficiente de rugosidade	C_{AZN}	120	
Perda de carga unitária na tubulação de recalque	J_{TR}	0,0345	m/m
Comprimento total da tubulação de recalque	L_{TR}	30	m
Diferença de nível na linha de recalque	DN_f	2	m
Perda de carga da tubulação de recalque	h_{fTR}	3,0347	m

Fonte: Autora (2022).

De forma semelhante, obtém-se a perda de carga na tubulação de sucção, caso exista, de acordo com o comprimento e diferença de nível correspondentes.

4.3.3.6 Altura manométrica do conjunto motor-bomba

A altura manométrica parcial (H_{mp}) é determinada somando-se as perdas de carga da linha principal, recalque e sucção e da pressão requerida no início da linha lateral, como mostra a equação (4.22).

$$H_{mp} = P_{LL} + h_{fTD} + h_{fTP} + h_{fTR} + h_{fTS} \quad (4.22)$$

A pressão requerida no início da linha lateral (P_{LL}) depende da pressão de serviço do emissor e da perda de carga na linha lateral:

$$P_{LL} = PS + 0,75 \cdot h_{TL} = 10 + 0,75 \cdot 1,5566 = 11,167 \text{ m} \quad (4.23)$$

Ainda, deve-se considerar as perdas de carga localizadas (h_{loc}) que podem ser calculadas como uma parcela (3 a 5%) da altura manométrica parcial. Desta forma, obtém-se a altura manométrica total (H_m) do sistema.

Tabela 4.8 – Altura manométrica total (H_m)

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Pressão necessária no início da linha lateral	P_{LL}	11,167	m
Perda de carga da tubulação de derivação	h_{fTD}	1,4285	m
Perda de carga da tubulação principal	h_{fTP}	1,7112	m
Perda de carga da tubulação de recalque	h_{fTR}	3,0347	m
Altura manométrica parcial	H_{mp}	17,3414	m
Perdas de carga localizadas (4% de H_{mp})	h_{loc}	0,6936	m
Altura manométrica total	H_m	18,0350	m

Fonte: Autora (2022).

4.4 Demanda energética

A demanda energética do projeto irá determinar a potência do conjunto motor-bomba, as características do arranjo fotovoltaico e escolha do inversor de frequência.

4.4.1.1 Potência do conjunto motor-bomba

Para dimensionar a potência do conjunto motor-bomba é necessário obter os valores da altura manométrica do sistema e da vazão volumétrica da bomba (Q_{mb}). O

valor da altura manométrica do sistema, já foi calculada, de 18,2 metros. Já a vazão volumétrica da bomba será obtida com base no volume diário a ser bombeado ($V_t = 103,68 \text{ m}^3$) e do valor de horas de sol pleno da região ($HSP = 4,39 \text{ h}$).

$$Q_{mb} = \frac{V_t}{HSP} = \frac{103,68}{4,39} = 23,62 \text{ m}^3/\text{h} \quad (4.24)$$

Assim, a potência do conjunto motor-bomba (P_{mb}) é dada por:

$$P_{mb} = \frac{g \cdot H_m \cdot \rho_a}{\eta_{mb}} \cdot \frac{Q_{mb}}{3600} = \frac{9,81 \cdot 18,2 \cdot 997}{0,40} \cdot \frac{23,62}{3600} = 2919,8 \text{ W} \quad (4.25)$$

Em que:

g – Aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$);

ρ_a – Densidade volumétrica da água (997 kg/m^3);

η_{mb} – Rendimento do motor-bomba (40%).

Deste modo, é necessário um motor de 4 cv para alimentar o sistema de irrigação. Com os dados de potência, vazão e altura manométrica é possível encontrar o modelo de bomba ideal para o projeto. A marca Schneider possui uma família de motobombas submersíveis, a tabela de seleção em anexo, mostrou que o modelo BCS-320 de 4 cv é apropriado ao projeto. A Tabela 4.9 mostra as principais características dessa motobomba.

Tabela 4.9 – Dados técnicos da motobomba

Descrição	Símbolo	Unidade	Valor
Potência nominal	P_{mb}	cv	4
Número de polos	p	-	2
Frequência	f_{el}	Hz	60
Rotação nominal	n_n	rpm	3340
Tensão nominal	V_n	V	220/380
Corrente nominal	I_n	A	13,5/7,82

Fonte: Autora (2022).

4.4.1.2 Escolha do inversor de frequência

O inversor de frequência deve ser escolhido baseado na potência e tensão de alimentação da motobomba. Considerando os dados técnicos da motobomba, optou-se pelo *drive* CA, modelo ACS880, da marca ABB, com 4 cv de potência e tensão de alimentação trifásica de 380 a 480 V.

4.4.1.3 Determinação do sistema fotovoltaico

A potência de pico do sistema fotovoltaico (P_{mpp}) é dada pelos dados de placa no motor e pela taxa de desempenho do sistema (PR) que gira em torno de 80% para sistemas eficientes.

$$P_{mpp} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{mb} \cdot I_{mb}}{PR} = \frac{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 13,5}{0,80} = 6430,24 \text{ Wp} \quad (4.26)$$

A quantidade mínima de módulos para atender a potência de pico do sistema, considerando o módulo da marca *Canadian Solar*, modelo CS6X-335P-PLUS, de 335 W.

$$N_p = \frac{P_{mpp}}{P_{mpp_mod}} = \frac{6430,24}{335} = 19,19 \approx 19 \text{ módulos} \quad (4.27)$$

Para definir a quantidade ideal de módulos do sistema, deve-se conhecer as tensões máximas e mínimas de operação. Considerando a tensão de circuito aberto ($V_{oc(StC)}$) do módulo, 46,3 V, o coeficiente de temperatura de V_{oc} (β_{voc}), -0,26%/°C e a temperatura mínima de operação (T_{min}), 0 °C. Assim, tem-se a tensão de circuito aberto do módulo (V_{oc_mod}):

$$V_{oc_mod} = V_{oc(StC)} \cdot \left(1 + (T_{min} - 25) \cdot \frac{\beta_{voc}}{100} \right) = 46,3 \cdot \left(1 + (0 - 25) \cdot \frac{-0,26}{100} \right) = 49,31 \text{ V} \quad (4.28)$$

Já a tensão de máxima operação do módulo (V_{mpp_mod}) é dada pela tensão nominal do módulo (V_{mpp}), 38,9 V, pela temperatura máxima de operação ($T_{máx}$), 70 °C e pelo coeficiente de temperatura de P_{mpp} , -0,34 %/°C.

$$V_{mpp_mod} = V_{mpp(StC)} \cdot \left(1 + (T_{máx} - 25) \cdot \frac{\beta_{voc}}{100} \right) = 38,9 \cdot \left(1 + (70 - 25) \cdot \frac{-0,34}{100} \right) = 32,95 \text{ V} \quad (4.29)$$

A faixa de variação de tensão no barramento CC do inversor é de 279 a 431 V, assim obtém-se o número mínimo e máximo de módulos conectados em serie em cada arranjo.

$$N_{p_max} = \frac{V_{CC_max}}{V_{oc_mod}} = \frac{431}{49,31} = 8,76 \quad (4.30)$$

$$N_{p_min} = \frac{V_{CC_min}}{V_{mpp_mod}} = \frac{279}{32,95} = 8,47 \quad (4.31)$$

Deste modo, o número ideal de módulos para atender todos os critérios de tensão o número de módulos em série deve ficar entre 8 e 9. Adota-se dois arranjos com 9 módulos cada, totalizando 18 módulos para o sistema fotovoltaico. Assim, foi possível calcular os valores de operação do sistema, como mostra a Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Características do sistema fotovoltaico

Descrição	Símbolo	Unidade	Valor
Número de módulos em série	N_s	-	9
Número de arranjos em paralelo	N_p	-	2
Número total de módulos	N_t	-	18
Tensão no ponto de máxima potência	V_{mpp}	V	296,55
Corrente no ponto de máxima potência	I_{mpp}	A	19,24
Potência de saída nominal	P_{mpp}	W	6.030
Tensão de circuito aberto	V_{oc}	V	449,73
Corrente de curto-circuito	I_{sc}	A	18,46

Fonte: Autora (2022).

Portanto foi possível dimensionar e determinar os principais componentes do sistema de irrigação alimentado por bombeamento fotovoltaico, passando pelas tubulações laterais, de derivação e principais do manejo de irrigação, pelo conjunto motor-bomba, inversor de frequência e arranjo fotovoltaico.

4.5 Viabilidade financeira

O levantamento do custo de implementação do sistema de irrigação por gotejamento está descrito na Tabela 4.11 Os principais itens estão listados com seus respectivos quantitativos e preços. Considerou-se a cotação em dólar para possibilitar uma estimativa mais estável para futuras consultas.

Tabela 4.11 – Estimativa de custo de implantação do sistema (US\$ 1 = R\$ 5,25)

Descrição	Marca	Quant.	Unid.	R\$	US\$
Inversor de frequência (4cv/380-480V)	ABB	1	un.	1.832,25	349,00
Módulo fotovoltaico (335W)	Canadian	18	un.	15.637,86	2.978,64
Motobomba submersível (4cv)	Schneider	1	un.	7.097,45	1.351,90
String Box, proteções, DPS e chave seccion.	Clamper	1	un.	262,50	50,00
Fita gotejadora (DN 16mm 20cm)	Netafim	14.700	m	5.784,96	1.101,90
Tubo polietileno (DN 90mm)	-	120	m	8.908,80	1.696,91
Tubo PVC (DN 125mm)	-	75	m	11.049,88	2.104,74
Tubo aço zincado (DN 125mm)	-	35	m	6.148,33	1.171,11
Total				56.722,03	10.804,20

Fonte: Autora (2022).

A circular técnica 98 da Embrapa de 2010 realiza o estudo de seleção de sistemas de irrigação pela viabilidade econômica, comparando os custos iniciais, de manutenção, operação e receitas de vários métodos de irrigação. A Tabela 4.12 mostra alguns fatores importantes a considerar em um estudo de viabilidade.

Tabela 4.12 - Fatores considerados para viabilidade econômica para sistemas de irrigação por gotejamento

Componentes/fatores	Gotejamento
Custo do sistema (R\$/ha)	6500/3500
Vida útil (anos)	12/5
Valor de sucata (% custo)	5/0
Uso de energia (kWh/m ³)	0,2
Eficiência de irrigação (%)	85
Lâmina líquida de água (mm/ha)	410
Mão de obra (h/ha/irrigação)	0,5
Número de irrigações por ciclo	54
Custo de manutenção (% inv.)	4/10
Custo de produção (R\$/ha)	7000
Produtividade (t/ha)	95

Fonte: Marouelli *et al.* (2010).

Para realizar a análise de viabilidade econômica do sistema de bombeamento fotovoltaico, faz-se uma comparação dos custos de implementação e operação do modelo convencional com o que utiliza fonte alternativa. Vale lembrar que os preços de referência devem ser atualizados para os dias atuais, assim, utiliza-se o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), fornecido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), entre dezembro/2010 e junho/2022, no valor de 91,061460%.

A Tabela 4.13 mostra os custos e receitas do sistema de irrigação por gotejamento utilizando gerador a diesel como fonte de energia. Foi considerado que um gerador consome 0,26 litros de diesel por kWh gerado e o valor do litro do diesel de R\$ 1,978 para o ano de 2010. Com isso o sistema alimentado por gerador a diesel tem um tempo de retorno de 5,9 anos.

Da mesma forma, na Tabela 4.14, os custos e receitas do sistema com gerador fotovoltaico foram levantados, em que o investimento inicial foi considerado de acordo com a Tabela 4.11, excluindo-se o preço da fita gotejadora e dividindo-se pela área irrigada (1,8 ha). Além disso, os custos com energia foram zerados. O tempo de retorno para o sistema alimentado por gerador fotovoltaico é de 9,9 anos.

Tabela 4.13 – Custos e receita do sistema de irrigação por gotejamento por hectare (fonte de energia por gerador a diesel)

Custos e Receita	R\$ (2011)	R\$ (2022)	US\$ (2022)
Custo de investimento	R\$ 10.000,00	R\$ 19.106,15	\$ 3.639,27
Custo de implantação s/ as linhas laterais	R\$ 6.500,00	R\$ 12.418,99	\$ 2.365,52
Custo de implantação das linhas laterais	R\$ 3.500,00	R\$ 6.687,15	\$ 1.273,74
Custo fixo anual de irrigação	R\$ 1.524,33	R\$ 2.912,41	\$ 554,74
Depreciação média anual s/ as linhas laterais	R\$ 514,58	R\$ 983,16	\$ 187,27
Depreciação média anual das linhas laterais	R\$ 700,00	R\$ 1.337,43	\$ 254,75
Custo de oportunidade médio anual	R\$ 309,75	R\$ 591,81	\$ 112,73
Custo operacional	R\$ 761,67	R\$ 1.455,26	\$ 277,19
Custo com Energia	R\$ 496,11	R\$ 947,99	\$ 180,57
Custo de mão de obra	R\$ 265,50	R\$ 507,27	\$ 96,62
Custo de manutenção	R\$ 610,00	R\$ 1.165,47	\$ 222,00
Custo manutenção s/ as linhas laterais	R\$ 260,00	R\$ 496,76	\$ 94,62
Custo manutenção das linhas laterais	R\$ 350,00	R\$ 668,72	\$ 127,37
Custo de colheita e transporte	R\$ 4.560,00	R\$ 8.712,40	\$ 1.659,51
Custo de produção	R\$ 7.000,00	R\$ 13.374,30	\$ 2.547,49
Custo total anual	R\$ 14.456,00	R\$ 27.619,84	\$ 5.260,92
Receita bruta	R\$ 16.150,00	R\$ 30.856,43	\$ 5.877,41
Receita líquida	R\$ 1.694,00	R\$ 3.236,43	\$ 616,49
Tempo de retorno (anos)		5,9	

Fonte: Adaptado de Marouelli e Silva (2011).

Tabela 4.14 – Custos e receita do sistema de irrigação por gotejamento por hectare (fonte de energia por gerador fotovoltaico)

Custos e receita	R\$ (2011)	R\$ (2022)	US\$ (2022)
Custo de investimento	-	R\$ 34.985,52	\$ 6.663,91
Custo de implantação sem as linhas laterais	-	R\$ 28.298,37	\$ 5.390,17
Custo de implantação das linhas laterais	R\$ 3.500,00	R\$ 6.687,15	\$ 1.273,74
Custo fixo anual de irrigação	R\$ 1.524,33	R\$ 2.912,41	\$ 554,74
Depreciação média anual sem as linhas laterais	R\$ 514,58	R\$ 983,16	\$ 187,27
Depreciação média anual das linhas laterais	R\$ 700,00	R\$ 1.337,43	\$ 254,75
Custo de oportunidade médio anual	R\$ 309,75	R\$ 591,81	\$ 112,73
Custo operacional	R\$ 265,50	R\$ 507,27	\$ 96,62
Custo com Energia	R\$ -	R\$ -	\$ -
Custo de mão de obra	R\$ 265,50	R\$ 507,27	\$ 96,62
Custo de manutenção	R\$ 350,00	R\$ 1.800,65	\$ 342,98
Custo manutenção sem as linhas laterais	-	R\$ 1.131,93	\$ 215,61
Custo manutenção das linhas laterais	R\$ 350,00	R\$ 668,72	\$ 127,37
Custo de colheita e transporte	R\$ 4.560,00	R\$ 8.712,40	\$ 1.659,51
Custo de produção	R\$ 7.000,00	R\$ 13.374,30	\$ 2.547,49
Custo total anual	R\$ 13.699,83	R\$ 27.307,03	\$ 5.201,34
Receita bruta	R\$ 16.150,00	R\$ 30.856,43	\$ 5.877,41
Receita líquida	R\$ 2.450,17	R\$ 3.549,40	\$ 676,08
Tempo de retorno (anos)		9,9	

Fonte: Adaptado de Marouelli e Silva (2011).

De modo geral, mesmo que o tempo de retorno do sistema fotovoltaico seja 4 anos maior do que o sistema com gerador a diesel, vale ressaltar que não foi considerado o aumento do valor do diesel ao longo dos anos para fins de cálculo. Ainda, não foram incluídos os custos com manutenção do gerador a diesel, que tendem a ser maiores do que os do gerador fotovoltaico, já que a baixa manutenção é uma das principais vantagens dos sistemas fotovoltaicos. Por fim, a vida útil dos sistemas fotovoltaicos gira em torno de 25 anos, tempo esse equivalente a mais do que o dobro da vida útil de sistemas de irrigação por gotejamento. Isso significa que em um próximo ciclo de investimentos, não seria necessário a aquisição dos itens do sistema fotovoltaico. Se o fator vida útil for levado em conta, o tempo de retorno seria reduzido consideravelmente, tornando o investimento mais viável.

4.6 Conclusões

A caracterização do sistema de bombeamento fotovoltaico que utiliza inversor de frequência em conjunto com motor de indução trifásico pode contribuir para o aumento dos estudos e utilização dessa configuração. Várias vantagens podem ser citadas, mas a viabilidade financeira é provavelmente a mais importante, permitindo que conjuntos motor-bomba difundidos no mercado possam ser utilizados ligados a arranjos fotovoltaicos por inversores de frequência, responsável por realizar o condicionamento de energia.

O trabalho apresentou a caracterização matemática de cada componente do sistema: arranjo fotovoltaico, inversor de frequência e conjunto motor-bomba. O circuito equivalente de cada estágio foi apresentado, assim como os principais parâmetros de calibração. O comportamento das principais variáveis, sob diferentes condições de entrada, também é evidenciado, demonstrando o que se espera de cada componente para cada caso.

Um exemplo de dimensionamento de um sistema de bombeamento solar para irrigação que utiliza motor de indução CA é demonstrado. Considerou-se uma produção de tomate para processamento como cultura, na região do sudoeste goiano, em uma área de 1,8 hectares, alimentada por arranjo fotovoltaico. O dimensionamento passa pelo manejo da irrigação, volume necessário de água, potência hidráulica, escolha da motobomba, inversor de frequência e dimensionamento do conjunto fotovoltaico.

Por fim, um estudo simplificado da viabilidade econômica é apresentado comparando sistema alimentado por gerador a diesel, com o sistema de bombeamento proposto neste trabalho. Constatou-se que, mesmo que o tempo de retorno do sistema fotovoltaico seja superior ao a diesel, alguns fatores quando levados em conta o viabilizam. Como a vida útil dos componentes fotovoltaicos é equivalente ao dobro da vida útil dos componentes de irrigação, a reutilização desses itens em outro ciclo de irrigação reduziria consideravelmente o tempo de retorno calculado. Além disso, outros fatores como a reduzida necessidade de manutenção dos sistemas fotovoltaicos e aumento do valor do litro do diesel não foram considerados, o que possivelmente contribuiria para a redução do tempo de retorno do investimento no sistema fotovoltaico. Isso sem contar a vantagem ambiental da utilização de uma fonte renovável e limpa.

As ferramentas matemáticas e circuitos equivalentes descritos devem fomentar a realização de estudos mais detalhados e difusão desse tipo de sistema. Considerando a dificuldade em encontrar estudos que utilizam essa configuração de conjunto fotovoltaico com motor de indução, e ainda, como a modelagem computacional no domínio do tempo e frequência permite a previsão de comportamentos dos elementos e variáveis elétricas, destaca-se a importância desse estudo no âmbito dos sistemas de bombeamento fotovoltaico, com aplicações principalmente voltadas a irrigação agrícola.

4.7 Referências bibliográficas (Capítulo 1 – Artigo 1)

AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. 1. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2000.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

CHAIBI, Y.; SALHI, M.; EL-JOUNI, A.; ESSADKI, A. A new method to extract the equivalent circuit parameters of a photovoltaic panel. **Solar Energy**, v. 163, n. February, p. 376–386, 2018.

CHANDEL, S.; NAIK, M.; ENERGY, R. C.-R. AND S.; 2015, U. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation...: Heriot-Watt University Library Resources. **Elsevier: Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 1084–1099, 2015.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito - CRESESB. **Potencial Solar - SunData v 3.0**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 20 set. 2022.

FAM, W. Z.; BALACHANDER, M. K. Dynamic performance of a DC shunt motor connected to a photovoltaic array. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 3, n. 3, p. 613–617, 1988.

Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. **Normais climatológicas do Brasil**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais>>. Acesso em: 20 set. 2022.

GHONEIM, A. A. Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems. **Energy Conversion and Management**, v. 47, n. 11–12, p. 1449–1463, 2006.

GRUNDFOS HOLDING A/S. Irrigation Pump Handbook. Disponível em: <www.grundfos.com>. Acesso em: 6 ago. 2020.

HANNAN, S.; ASLAM, S.; GHAYUR, M. Design and real-time implementation of SPWM based inverter. **2018 International Conference on Engineering and Emerging Technologies, ICEET 2018**, v. 2018- January, p. 1–6, 2018.

HORA, R. C. Manejo da poda apical no tomateiro. Disponível em: <<https://revistacampoenegocios.com.br/manejo-da-poda-apical-no-tomateiro/>>. Acesso em: 20 set. 2022.

KOUTROULIS, E.; CHATZAKIS, J.; KALAITZAKIS, K.; VOULGARIS, N. C. A bidirectional, sinusoidal, high-frequency inverter design. **IEE Proceedings-Electric Power Applications**, v. 148, n. 4, p. 315–321, 2001.

LI, W.; ZHENG, Y.; LI, W.; ZHAO, Y.; HE, X. A smart and simple PV charger for portable applications. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE. **Anais...2010**.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Seleção de sistemas de irrigação para hortaliças. **Embrapa Hortaliças-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 1998.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Resposta do tomateiro industrial, sob irrigação por gotejamento, a diferentes tensões de água no solo. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 19, 2001.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Tomateiro para processamento industrial: irrigação e fertirrigação por gotejamento. **Embrapa Hortaliças-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2002.

MAROUELLI, W. A.; DA SILVA, H. R.; SILVA, WL de C. Irrigação do tomateiro para processamento. **Embrapa Hortaliças-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2012.

MOHAN, N.; UNDERLAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power Electronics**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.

ROHIT, K. B.; KARVE, G. M.; KHATRI, M. Solar water pumping system. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. 7, p. 323–337, 2013.

SHINDE, V. B.; WANDRE, S. S. Solar photovoltaic water pumping system for irrigation: A review. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 22, p. 2267–2273, 2015.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2014.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. **IEEE Transactions on power electronics**, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009.

XIAO, W. **Photovoltaic Power System Modeling, Design, and Control**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017.

YADAV, K.; SASTRY, O. S.; WANDHARE, R.; SHETH, N.; KUMAR, M.; BORA, B.; SINGH, R.; RENU; KUMAR, A. Performance comparison of controllers for solar PV water pumping applications. **Solar Energy**, v. 119, p. 195–202, 2015.

5 CAPÍTULO 2 – ARTIGO 2

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
UTILIZANDO MOTOR DE INDUÇÃO COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA
CONVENCIONAL

RESUMO

Em resposta a necessidade de sistemas que preservem o meio ambiente e ao mesmo tempo promovam o desenvolvimento econômico, cresce o interesse pela energia solar fotovoltaica. Em produções agrícolas, tal tecnologia tem sido amplamente empregada para o bombeamento de água para irrigação, possibilitando o aproveitamento energético para suprir a demanda crescente por alimento, inclusive em áreas de difícil acesso ou remotas. Dentre as topologias existentes, a que utiliza motores de indução integrados a conversores de potência para condicionamento de energia, apresenta vantagens em relação a utilização de motor de corrente contínua diretamente ligados ao arranjo fotovoltaico. Além de serem amplamente acessíveis em território nacional, exigem menos manutenção, já que não possuem escovas. Este trabalho propõe a modelagem matemática e implementação computacional de um sistema de bombeamento fotovoltaico, utilizando um motor de indução trifásico e um conversor de frequência convencional para adequar a energia dos módulos fotovoltaicos, em corrente contínua, para possibilitar a ligação de um motor em corrente alternada. Foram obtidos resultados de simulação, através do *software Matlab/Simulink*, possibilitando a análise do comportamento do sistema quando submetido a diferentes condições de radiação solar e *set-point* de velocidade de rotação. Os resultados mostram um comportamento satisfatório para faixas de rotação menores que 80% da velocidade nominal. Além disso, foi realizada a comparação entre os resultados de simulação e experimentais. Foi identificado um comportamento semelhante das variáveis monitoradas, embora os valores experimentais tenham sido sempre superiores aos simulados. Por fim, espera-se contribuir para a difusão de sistemas fotovoltaicos, aumentar a confiabilidade e segurança das atividades de irrigação, promover o acesso à energia elétrica a produtores rurais que estejam em locais remotos e oferecer uma ferramenta computacional que descreva o comportamento desse tipo de sistema sob diversas condições de entrada.

Palavras-chave: Simulação computacional; Bombeamento solar; Inversor de frequência, Motor CA.

ABSTRACT

In response to the need for systems that preserve the environment and at the same time promote economic development, interest in the use of photovoltaic solar grows. In agricultural production, this technology has been widely used for pumping water for irrigation, making it possible to use energy to supply a growing demand for food, including in areas of difficult access or remote. Among the existing topologies, the one that uses integrated induction motors for power converters for energy conditioning, presents advantages in relation to the use of direct current motor directly connected to the photovoltaic arrangement. In addition to being conquered in the national territory, less maintenance, since they do not have brushes. This work proposes a mathematical modeling and computational implementation of a photovoltaic pumping system, using a three-phase induction motor and a conventional frequency converter to adapt the energy of the photovoltaic modules, in direct current, to enable the connection of an alternating current motor. It is intended: analysis of the behavior of the system when subjected to different conditions of solar radiation and temperature; evaluate the consequences of the various configurations of the frequency inverter have on the system performance; understand the influence that hydraulic pressure losses can bring about an efficiency of solar pumping. In addition, it is expected to obtain simulation results, through the Matlab/ Simulink software, of some possible configurations of systems used for pumping water for irrigation. Therefore, some of the hydraulic pumps that use a three-phase induction motor will be evaluated in a comparative way, giving a more publicized forecasting tool. Finally, the aim is to contribute to the diffusion of photovoltaic systems, to increase the reliability and safety of irrigation activities, to promote access to electrical energy to producers that are allowed in remote locations and to offer a computational tool that describes the behavior of this type of system. system under various input conditions.

Keywords: Computer simulation; Solar pumping; Frequency inverter, AC motor.

5.1 Introdução

Os sistemas de bombeamento de água são geralmente alimentados pela rede elétrica ou por diesel em locais de difícil acesso. Os custos da energia elétrica devem aumentar de forma significativa nos próximos anos, considerando o crescimento da demanda energética. Além disso, a queima de combustíveis fósseis causa a emissão de gases poluentes, não sendo uma solução que leva em conta o desenvolvimento sustentável. A energia solar fotovoltaica vem sendo utilizada como fonte alternativa para produção de energia limpa, mesmo em locais remotos, podendo ser aproveitada para o bombeamento de água para consumo humano ou irrigação de culturas (OZGENER; HEPBASLI, 2007; RAZAVI; AHMADI; ZAHEDI, 2018; ROHIT; KARVE; KHATRI, 2013).

É comum o emprego de bombas hidráulicas que utilizam motores CC como fonte de energia, devido a simplicidade da topologia, sem a necessidade de estágios de condicionamento de energia, já que os módulos fotovoltaicos geram em corrente contínua. No entanto, o acesso a manutenção e assistência técnica desse tipo de bomba é oneroso, porque são equipamentos produzidos fora do país. Além disso, as escovas dos motores CC precisam frequentemente serem trocadas, devido ao desgaste natural devido ao atrito causado pelo contato. Assim, a utilização de motores de indução pode trazer a vantagem de baixa manutenção, além de serem amplamente encontrados em território nacional, facilitando a substituição de peças e acesso a mão de obra especializada (ASGARI; JANNATI; IDRIS, 2014; ERROUHA et al., 2019).

Nas topologias que utilizam um motor de indução ao invés de um motor CC, uma unidade de condicionamento de energia faz-se necessária. Essa unidade é formada por um conversor CC-CA, responsável por permitir a conexão do arranjo fotovoltaico com as bombas CA. O bombeamento de água para um reservatório elevado permite o armazenamento de energia, em forma potencial gravitacional, para uso em horários de pouca radiação solar ou durante a noite. Um banco de baterias pode ser empregado para esse fim, porém os custos tendem a aumentar e os intervalos de manutenção diminuirão. Assim, a utilização de baterias para condições de baixa ou ausência de radiação, ainda não é muito comum (NAYAK; RAJASHEKARA; PRAMANICK, 2019; WANG et al., 2019).

Embora existam trabalhos como o de Campos (2020) que utilizam um conversor de frequência convencional como unidade condicionadora de energia em conjunto com um motor de indução, algumas questões ainda não foram respondidas. Dentre elas, a influência de condições atmosféricas, como radiação solar e temperatura, no desempenho do sistema. Além

disso, as consequências das perdas de carga hidráulica e ainda como as configurações e parâmetros do inversor de frequência afetam a performance desse tipo de solução de bombeamento (MUDLAPUR et al., 2019; NOUR; THIRUGNANAM, 2017).

A modelagem computacional é de suma importância para a previsão do comportamento de sistemas e redes elétricas. O modelo matemático de conversores eletrônicos, painéis fotovoltaicos e outros dispositivos possibilita uma análise prévia das características de um sistema, antes de sua implantação. Esses modelos podem ser utilizados para simulação computacional, implementação de técnicas de controle sofisticadas e para obtenção de respostas dinâmicas e estacionárias das variáveis de saída mediante perturbações de entrada (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009a).

Deste modo, este trabalho visa a implementação computacional, através da utilização de modelos do *Matlab/Simulink*, de um sistema de bombeamento fotovoltaico para irrigação, visando o atendimento de produtores rurais de médio porte, especialmente aqueles que estão em áreas isoladas. O sistema será composto por: arranjo fotovoltaico, conversor de frequência, motor de indução e sistema hidráulico. Pretende-se avaliar o desempenho e as principais características do sistema sob diversas condições de entrada, a fim de compreender a influência de diversos fatores externos e internos em seu funcionamento. Por fim, espera-se que o desenvolvimento desta ferramenta aumente a demanda por fontes de energia renováveis para aplicação agrícolas e possibilite seu total entendimento.

5.2 Materiais e métodos

Visando a obtenção dos resultados, foi realizada a especificação dos parâmetros a serem utilizados e a implementação via simulação computacional do sistema de bombeamento fotovoltaico, bem como à realização de testes sob diversas condições ambientais e de carga.

O sistema completo, simulado para testar a eficácia do bombeamento solar para uso na irrigação, será composto por um arranjo fotovoltaico, por um conversor de frequência convencional, por um motor de indução e por uma bomba hidráulica. Com o intuito de verificar o desempenho de diversas configurações do sistema, os resultados experimentais obtidos por Campos (2020) foram utilizados para montar as configurações e estudos de caso pretendidas. Para que se possa prever o comportamento do sistema proposto via simulação computacional, é necessário que se descreva computacionalmente cada agente que compõe o sistema completo

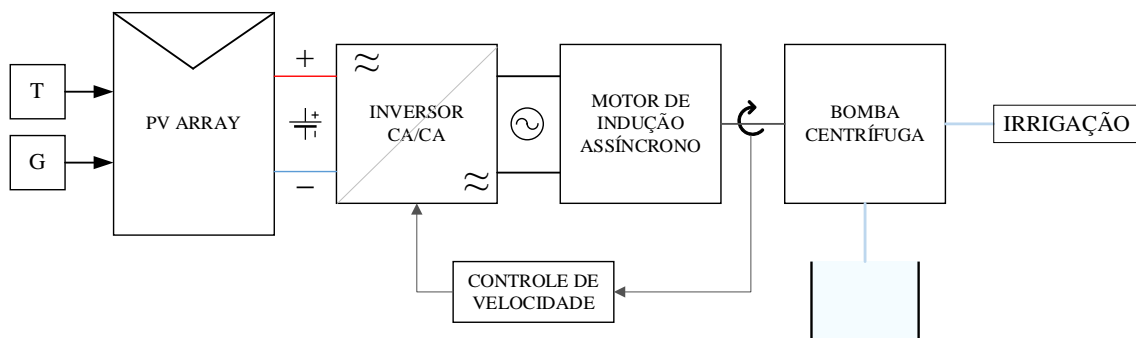
(ASGARI; JANNATI; IDRIS, 2014; NOUR; THIRUGNANAM, 2017; RAZAVI; AHMADI; ZAHEDI, 2018; TRIPATHI, 2017).

No caso específico deste trabalho, o arranjo fotovoltaico foi descrito por um circuito equivalente com característica de fonte de corrente, conhecido como modelo de um único diodo, amplamente utilizado na literatura (AGRAWAL; AWARE, 2016; BRITO et al., 2013; CHIN et al., 2011; KECHICHE et al., 2017; LODHI et al., 2017; PARK; YU, 2004; SAH; KUMAR, 2016; VISWAMBARAN; GHANI; ZHOU, 2016). O modelo utilizado é o modelo nativo do *software Matlab/Simulink PVarray*. O conversor de frequência foi modelado para execução do sistema de controle de velocidade (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2004; RASHID, 1999). Foi utilizado o modelo de conversor de tensão trifásico CC-CA de três braços, composto por dispositivos IGBT para comutação presente no *Simulink*. O motor de indução trifásico foi modelado conforme o seu circuito equivalente para implementação computacional (CHAPMAN, 2013; UMANS, 2014). O *Simulink* possui um modelo de máquina de indução assíncrona trifásica tipo gaiola de esquilo que permite a alteração de parâmetros internos e acesso a conexões do estator e do rotor. Os parâmetros e comportamentos hidráulicos foram modelados conforme as equações matemáticas amplamente utilizadas na literatura para descrever sistemas hidráulicos e de bombeamento (ABNT, 1998; BAPTISTA; COELHO, 2010; NETTO, 1998; TSUTIYA, 2006). Os modelos citados foram escolhidos devido a ampla utilização na literatura, possibilitando certa facilidade de validação.

5.2.1 Parametrização do modelo

A seguir o diagrama do sistema completo (Figura 5.1). Nesta seção serão descritos e parametrizados todos os subsistemas que compõem o sistema de bombeamento, em que os parâmetros de entrada são temperatura (T, em °C) e irradiação solar (G, em W/m²).

Figura 5.1 – Diagrama de modelagem computacional



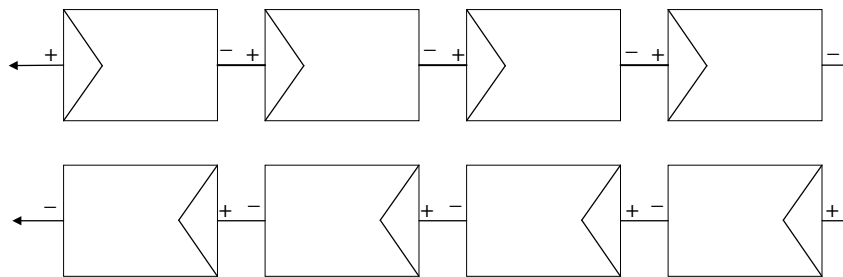
Fonte: Autora (2022).

Os subsistemas serão descritos nas seções 5.2.1.1 a 5.2.1.5.

5.2.1.1 Arranjo fotovoltaico

O arranjo fotovoltaico utilizado é composto por 8 módulos ligados em série, conforme a Figura 5.2.

Figura 5.2 – Arranjo fotovoltaico em estudo



Fonte: Autora (2022).

Os principais dados do módulo CS6X-335P-PLUS da marca *Canadian Solar*, retirados do *datasheet*, estão listados na Tabela 5.1.

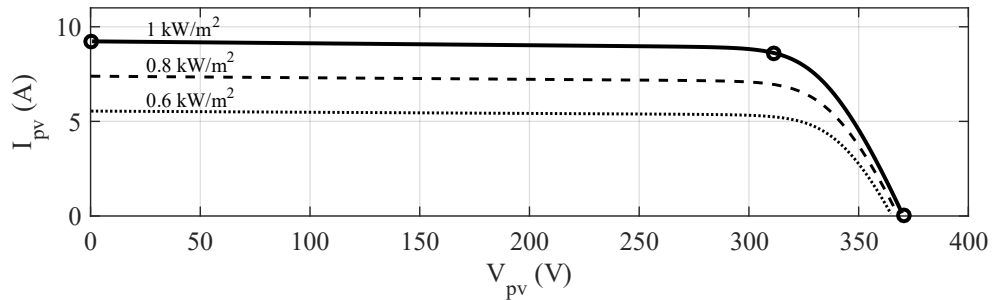
Tabela 5.1 – Dados do módulo fotovoltaico

Descrição	Símbolo	Unidade	Valor
Potência no MPP	P_{mp}	W	335
Corrente de curto-circuito	I_{SC}	A	9,23
Tensão de circuito aberto	V_{OC}	V	46,3
Corrente no MPP	I_{mp}	A	8,62
Tensão no MPP	V_{mp}	V	38,9
Coefficiente de temperatura (V_{OC})	α	%/°C	-0,26
Coefficiente de temperatura (I_{SC})	β	%/°C	0,05
Número de células	N_s	-	136

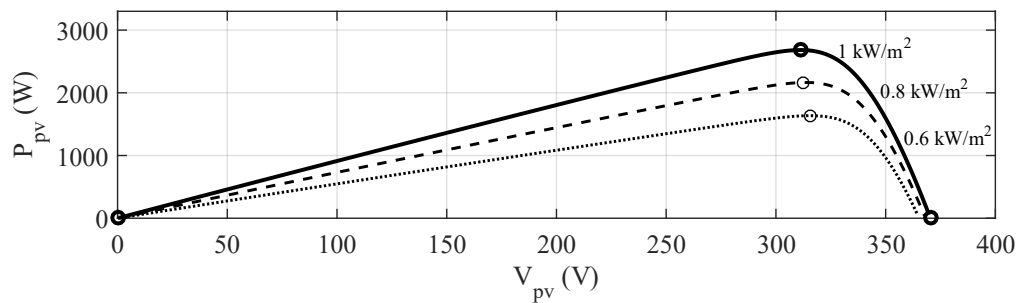
Fonte: CSI Solar Co. (2021).

Foi utilizado o bloco *PV_array* do *Matlab/Simulink*, que utiliza o modelo do *System Advisor do National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, de janeiro de 2014, Anexo D. Os parâmetros calculados pelo modelo foram os seguintes: (a) corrente fotovoltaica ($I_{ph} = 9,2575$ A); (b) corrente de saturação do diodo ($I_0 = 8,1486 \cdot 10^{-16}$ A); (c) fator de idealidade do diodo ($\eta_d = 0,35884$); (d) resistência shunt ($R_p = 121,5309 \Omega$); e (e) resistência série ($R_s = 0,36169 \Omega$). A Figura 5.3a mostra as curvas I-V e a Figura 5.3b mostra a curva P-V do arranjo modelado sobre a incidência de irradiação (G) de 1000 W/m^2 , 800 W/m^2 e 600 W/m^2 .

Figura 5.3 – Curva I-V e P-V do arranjo modelado



(a) Curva I-V



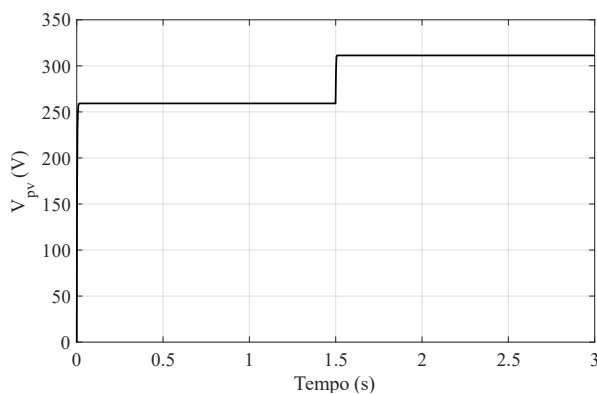
(b) Curva P-V

Fonte: Autora (2022).

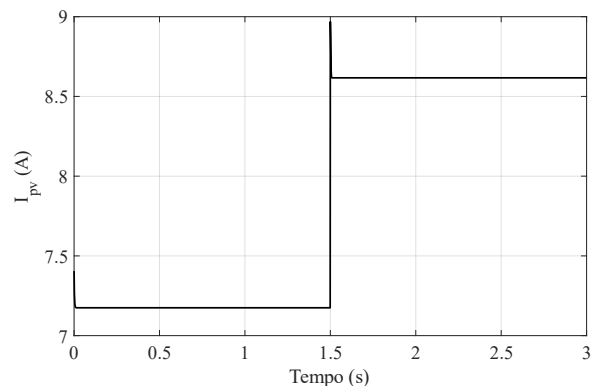
Percebe-se que o comportamento do arranjo mediante a diminuição da irradiação segue o previsto, já que os valores de tensão não sofrem grandes alterações, enquanto os valores de corrente diminuem de forma proporcional.

Para validação do modelo, foi realizada uma simulação em que o arranjo fotovoltaico foi ligado a uma carga resistiva ($36,13 \Omega$) para emular a carga e submetida a variação do nível de irradiação, calculada a partir dos dados de potência e tensão nominal do sistema fotovoltaico. Um degrau foi aplicado na metade da simulação, de 1000 W/m^2 para 800 W/m^2 , mantendo a temperatura em $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Os valores de V_{pv} e I_{pv} foram obtidos, conforme Figura 5.4.

Figura 5.4 – Tensão (V_{pv}) e corrente (I_{pv}) para degrau de irradiação



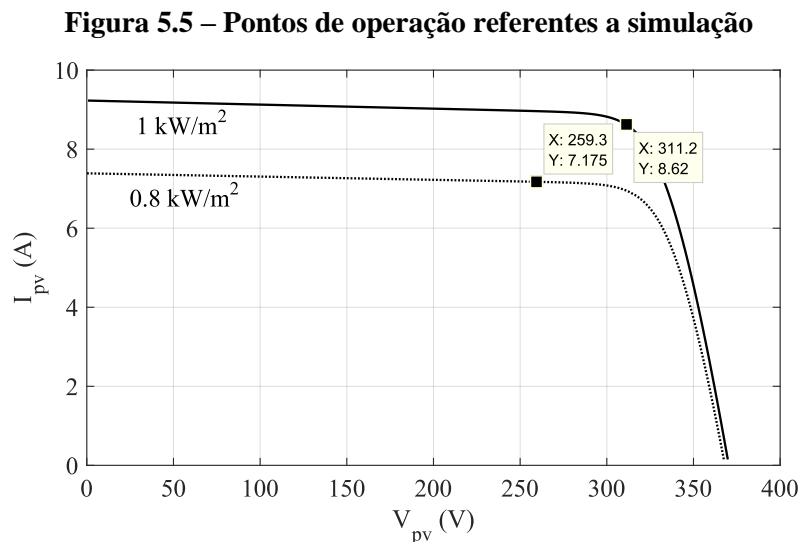
(a) Tensão V_{pv}



(b) Corrente I_{pv}

Fonte: Autora (2022).

Observando a Figura 5.4a, na primeira parte da simulação o valor de V_{pv} é aproximadamente 259,2 V, enquanto na segunda parte é aproximadamente 311,3 V. Já na Figura 5.4b, os valores I_{pv} é de 7,18 A na primeira parte e 8,62 A na segunda. A Figura 5.5 nos permite analisar que o arranjo está operando em seu modo de fonte de corrente na primeira parte da simulação e muito próximo ao MPP na segunda parte.



Fonte: Autora (2022).

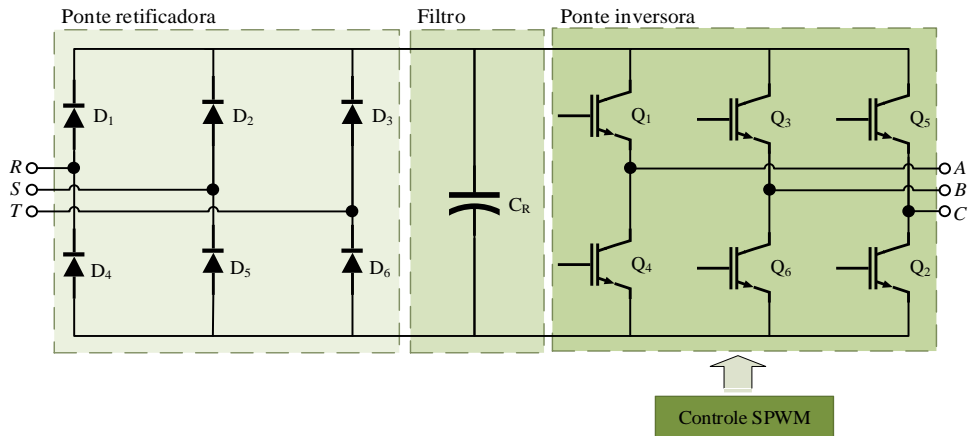
Ainda, percebe-se que o ponto de operação [259,2 V;7,18 A] pertence a curva I-V para $G = 800 \text{ W/m}^2$ e o ponto [311,3;8,62] pertence a curva I-V para $G = 1000 \text{ W/m}^2$. Logo, pode-se concluir que o modelo representa bem o comportamento esperado de um arranjo fotovoltaico. Vale lembrar que não existe um controle de rastreamento do MPP implementado, portanto o sistema não necessariamente entrega os valores ótimos de potência.

5.2.1.2 Inversor de frequência

O conversor CC/CA, conhecido como inversor, é amplamente utilizado em sistemas de alimentação ininterrupta, acionamentos de motores CA, aquecimento por indução e fontes de energia renováveis. A Figura 5.6 mostra a configuração mais simples de um inversor de frequência, formado por uma ponte retificadora, um filtro capacitivo e uma ponte inversora. O funcionamento ideal de um inversor deve fornecer uma fonte de tensão com a forma mais próxima a uma senoide quanto possível. Para se aproximar desse resultado é comum a utilização da modulação por largura de pulso senoidal (SPWM). Quando é adicionado um estágio de retificação, é possível modificar e controlar os parâmetros de amplitude e frequência da tensão alternada. Como a velocidade de motores CA é controlada a partir da modificação desses

parâmetros esse tipo de dispositivo é amplamente usado em aplicações industriais no acionamento de motores CA (KOUTROULIS et al., 2001; LAKKA; KOUTROULIS; DOLLAS, 2014; TUNYASRIRUT; SRILAD; SUKSRI, 2008).

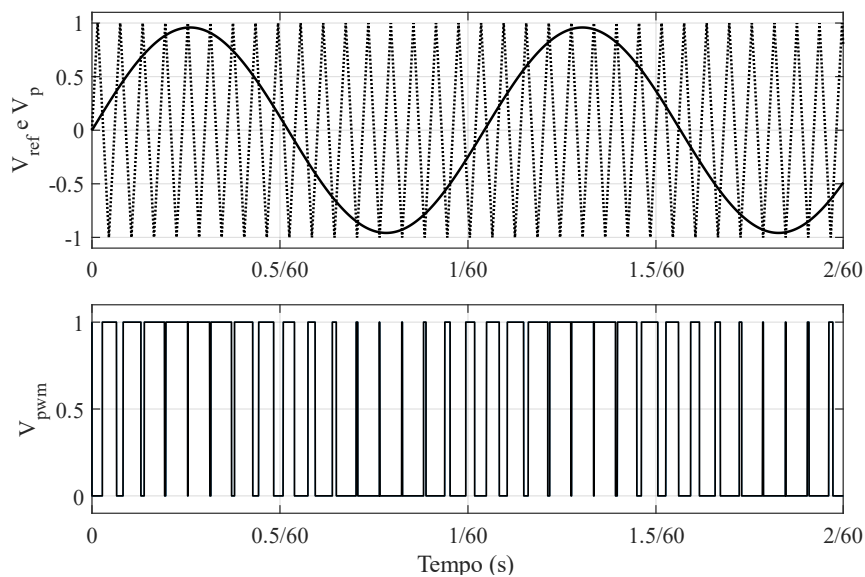
Figura 5.6 – Diagrama elétrico de um inversor de frequência



Fonte: Autora (2022).

O controle SPWM consiste na definição das chaves (MOSFETs, IGBTs, etc) como ligado ou desligado de acordo com a comparação de um sinal de referência senoidal com uma onda portadora triangular de alta frequência. Como duas chaves pertencentes ao mesmo braço não podem ser acionados ao mesmo tempo, três sinais de referência, defasados em 120° , podem ser usados alternadamente entre as chaves Q_1/Q_4 , Q_3/Q_6 e Q_5/Q_2 (LAKKA; KOUTROULIS; DOLLAS, 2014; RASHID, 1999).

Figura 5.7 – Exemplo de sinal de comparação SPWM



Fonte: Autora (2022).

Os sinais de referência possuem a frequência do sinal de saída do inversor e amplitude máxima unitária. Já a onda portadora possui formato triangular, frequência de comutação das chaves (f_{sw}) e amplitude máxima unitária. A Figura 5.7 mostra um exemplo de geração do sinal SPWM, sempre que o sinal de referência (V_{ref}) é maior do que a onda portadora (V_p), a chave é ligada, quando a chave é desligada. O somatório do tempo da chave ligada e desligada é sempre igual ao período da onda portadora ($T_{sw} = 1/f_{sw}$).

5.2.1.3 Controle de velocidade

A velocidade síncrona de um motor de indução pode ser alterada de diversas formas. Entre elas pode-se citar a variação do número de polos ou da frequência de alimentação. Ainda, é possível modificar o escorregamento alterando a tensão CA ou a resistência do rotor. A frequência do inversor pode ser variada controlando a comutação das chaves do inversor. O ideal é que exista um controle da amplitude da tensão de entrada do inversor de forma proporcional a variação da frequência de alimentação. Isso porque a densidade de fluxo de uma máquina CA é inversamente proporcional a frequência elétrica aplicada, o que pode ocasionar danos ao motor quando a amplitude da tensão de alimentação é constante, devido ao aumento das perdas no núcleo e correntes. Então, para um correto controle de velocidade de um motor basta manter a proporção entre a tensão de armadura e a frequência elétrica, como pode ser visto na Equação (5.1) (UMANS, 2014).

$$\frac{V_a}{f_{el}} = \frac{V_n}{f_n} \quad (5.1)$$

Em que,

V_a – Tensão de armadura;

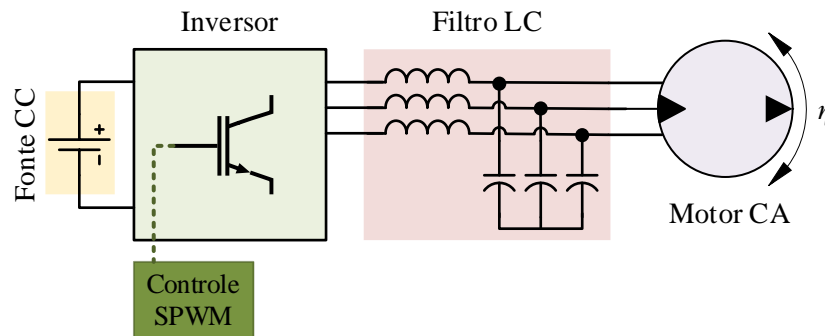
f_{el} – Frequência elétrica;

V_n – Tensão nominal;

f_n – Frequência nominal.

O diagrama da Figura 5.8 mostra a configuração usada para teste do controle de velocidade. Foi utilizada uma fonte CC ideal com amplitude de 311 V, o inversor de frequência controlado, um filtro LC e um motor de indução trifásico.

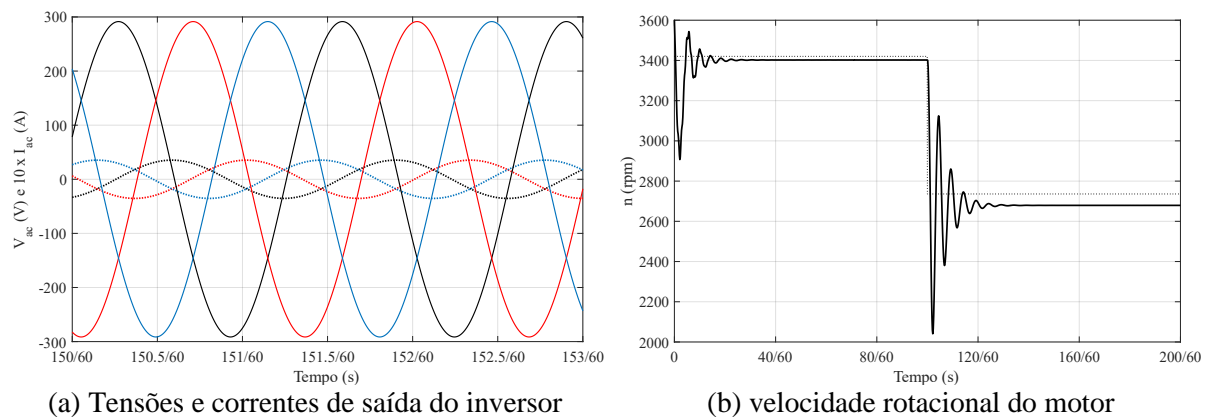
Figura 5.8 – Diagrama de teste do controle de velocidade



Fonte: Autora (2022).

Os valores de tensão e corrente de saída do inversor (V_{ac} e I_{ac}) e a velocidade de rotação do motor (n) foram medidas. Um degrau de 3420 rpm para 2736 rpm foi aplicado ao valor de set-point do controle de velocidade para testar o funcionamento do controle de velocidade. O tempo de simulação total foi de 200 ciclos de 60 Hz.

Figura 5.9 – Teste do controle de velocidade



(a) Tensões e correntes de saída do inversor

(b) velocidade rotacional do motor

Fonte: Autora (2022).

A Figura 5.9 mostra os resultados obtidos para o teste do controle de velocidade do motor. Percebe-se em (a) que a forma de tensão (linha contínua) e corrente (linha pontilhada) possuem formato senoidal e estão defasadas entre si conforme a característica de uma carga indutiva. Vale lembrar que neste teste, a carga é o próprio motor de indução trifásico. Em (b) é possível observar que os valores de velocidade se aproximam bastante do valor de set-point, como esperado pelo controle.

5.2.1.4 Motor de indução

O conjunto motor-bomba utilizado o modelo submersível BCS-220 da Schneider de 1 cv, Anexo B. Para modelar o motor de indução acoplado a bomba centrífuga foi considerado o

tipo gaiola de esquilo. A ficha técnica do motor submersível *standard* E56BS, Anexo C, fabricado pela WEG apresentou os seguintes dados (Tabela 5.2):

Tabela 5.2 – Dados técnicos do motor de indução

Descrição	Símbolo	Unidade	Valor
Potência nominal	P_n	cv	1
Número de polos	p	-	2
Frequência	f_{el}	Hz	60
Rotação síncrona	n_s	rpm	3600
Rotação nominal	n_n	rpm	3420
Escorregamento	s	%	5
Tensão nominal	V_n	V	220/380
Corrente nominal	I_n	A	4,50/2,61
Corrente de partida	I_p	A	3,93/2,28
Conjugado nominal	C_n	kgfm	0,214
Conjugado de partida	C_{in}	%	229
Conjugado máximo	$C_{máx}$	%	260
Momento de inércia	J	kgm ²	0,0008

Fonte: Autora (2022).

Além disso, a ficha técnica também apresenta os valores de eficiência (e fator de potência para operação do motor em 50, 75 e 100% da potência nominal (1 cv). A Tabela 5.3 mostra esses dados.

Tabela 5.3 – Valores de eficiência e fator de potência do motor de indução

Descrição	50%	75%	100%
Eficiência (η)	42,5	50,5	55
Fator de potência (FP)	0,62	0,71	0,78

Fonte: Autora (2022).

O circuito equivalente é amplamente utilizado para modelar o comportamento e desempenho de um motor assíncrono mediante diversas condições de operação. A obtenção dos valores dos parâmetros do circuito equivalente é de suma importância para correta determinação dos resultados. Existem ensaios técnicos para obtenção desses parâmetros como o de rotor bloqueado e a vazio. Porém, é comum encontrar dificuldades para realização desses testes em campo, já que muitas vezes os motores possuem grande porte, já estão instalados, ou ainda, não existe fácil acesso ao rotor como no caso de conjuntos motor-bomba. Deste modo, utilizou-se os dados de catalogo para obtenção de parâmetros de impedância do rotor e estator (ANASTÁCIO; DIAS, 2020; ASSUNÇÃO; ASSUNÇÃO, 2006; GUIMARAES et al., 2014).

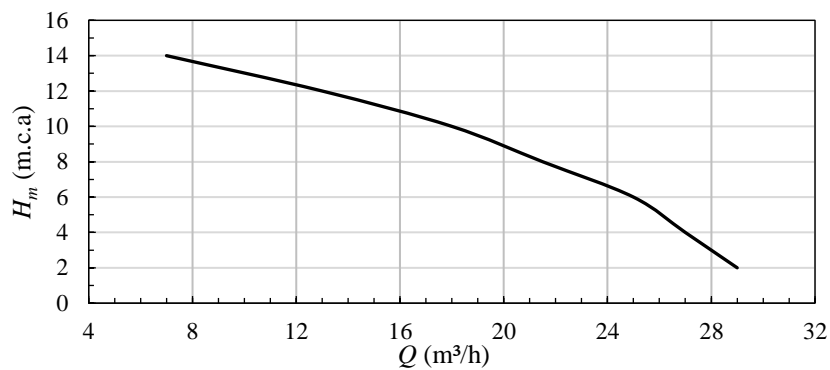
Aplicando a metodologia de Guimaraes et al. (2014) e os dados apresentados anteriormente, obteve-se os seguintes parâmetros: $R_1 = 1,58 \Omega$; $L_1 = 19,7 \text{ mH}$; $R_2 = 1,46 \Omega$; L_2

= 1,18 mH e $L_m = 184$ mH. Esses parâmetros foram introduzidos no bloco *Asynchronous Machine* do *Matlab/Simulink*.

5.2.1.5 Característica da bomba centrífuga

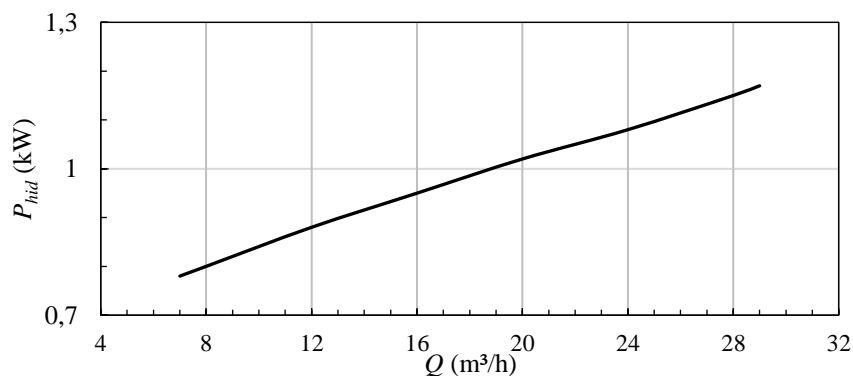
O fabricante da bomba submersível BCS-220 fornece entre outros dados as curvas paramétricas que relacionam grandezas como velocidade de rotação, vazão e rendimento. Na Figura 5.10 é apresentada a curva $Q-H_m$ e na Figura 5.11 a curva $Q-P_{hid}$, retirada do catálogo da bomba.

Figura 5.10 – Curva vazão versus altura manométrica



Fonte: Autora (2022).

Figura 5.11 – Curva vazão versus potência hidráulica



Fonte: Autora (2022).

A partir das curvas da bomba é possível extrair o comportamento da bomba para a simulação. O bloco *Lookup Table* do *Matlab/Simulink*, Anexo E, permite transmitir um determinado comportamento. Dados pré-determinados de x e y são inseridos, possibilitando que a resposta equivalente (y) para um dado valor (x) seja obtida através de uma interpolação linear.

No entanto, faz-se necessário o ajuste dos dados retirados de catálogo para uma simulação mais realista. Isso porque as curvas apresentadas são obtidas para operação em 60

Hz. Como o controle de velocidade modifica os valores de frequência elétrica para atingir o valor de rotação desejado, as fórmulas de semelhança mecânica devem ser aplicadas. De forma mais clara, é feita uma proporção dos valores nominais para os de operação (BAPTISTA; COELHO, 2014).

$$H_{m_op} = \left(\frac{n}{n_s} \right)^2 H_{m_n} \quad (5.2)$$

$$Q = \frac{n}{n_s} Q_n \quad (5.3)$$

A Equação (5.2) e (5.3) determina a semelhança dos dados nominais, subscrito (n), com os dados instantâneos, subscrito (op).

5.2.2 Metodologia de simulação

A partir dos modelos matemáticos obtidos, iniciou-se a segunda etapa, constituída das simulações computacionais, realizadas via *software Matlab/Simulink* com o objetivo de se verificar e comparar o desempenho das configurações do sistema de bombeamento fotovoltaico pré-selecionados, sob variados aspectos, submetendo o sistema a diversas condições ambientais e de variações de carga. A Tabela 5.5 mostra quais são os principais parâmetros do modelo para permitir a correta simulação do sistema.

Tabela 5.4 – Variáveis e parâmetros de entrada dos subsistemas

Subsistema	Variáveis de entrada	Parâmetros
PV array	Irradiância e temperatura	Potência, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, número de células, coeficientes de temperatura
Inversor	Tensão do barramento CC	Tipo e parâmetros da chave, parâmetros do diodo de proteção e do circuito <i>Snubber</i> (proteção da chave)
Motor assíncrono	Tensões trifásicas	Parâmetros elétricos (potência, tensão, frequência, e número de polos) e magnéticos (resistências e reatâncias do rotor/estator)
Sistema hidráulico	Rotação e altura manométrica	Vazão, torque e potência hidráulica

Fonte: Autora (2022).

A validação do modelo via simulação está dividida em duas etapas: estudo de casos e comparação com os valores experimentais de Campos (2020).

5.2.2.1 Estudo de casos

A primeira etapa consiste na obtenção de dados de vazão (Q), torque (C), rotação (n), potência hidráulica (P_{HID}), tensão do barramento fotovoltaico (V_{pv}), corrente do barramento fotovoltaico (I_{pv}), tensão de saída do inversor (V_{ac}) e corrente de saída do inversor (I_{ac}), para cada caso. Os casos serão simulados a partir da variação da velocidade de rotação da bomba e condições de irradiação, como mostra a Figura 5.12.

Figura 5.12 – Diagrama dos casos de estudo

		CLIMA		
		Ensolarado	Nublado	Chuvoso
VELOCIDADE	100%	CASO E100	CASO N100	CASO C100
	80%	CASO E80	CASO N80	CASO C80
	60%	CASO E60	CASO N60	CASO C60

Fonte: Autora (2022).

Como a potência do sistema fotovoltaico depende diretamente do nível de irradiação incidente, as condições de irradiação foram escolhidas para representar o comportamento do bombeamento em diversas condições de insolação. Outra variável que influencia diretamente na dinâmica do sistema é o set-point da velocidade do rotor, pois este está diretamente ligado ao torque no motor de indução. Desta forma, as combinações das variáveis acima, permitem uma avaliação completa sob qualquer condição de entrada do sistema. Os valores de velocidade e irradiância máxima considerados para cada caso estão relacionados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Valores considerados de rotação e irradiação solar

Condição de rotação	Rotação (rpm)	Condição de irradiância	Média diária (W/m^2)
100%	3420	Ensolarado	1000
80%	2736	Nublado	420
60%	2052	Chuvoso	170

Fonte: Autora (2022).

De acordo com Pinho e Galdino (2014), a média diária de irradiação para a classificação ensolarado, nublado e chuvoso é, respectivamente, 6000 Wh/m^2 , 2500 Wh/m^2 e

1000 Wh/m². Considerando 6 horas de sol pleno por dia, temos: 1000 W/m², 420 W/m² e 170 W/m².

Desta forma, a validação da modelagem poderá ser testada para boa parte das condições reais de funcionamento, sendo possível aferir a eficácia do sistema em cada situação. A altura manométrica (H_m) e temperatura (T) serão mantidas constantes para todos os casos. Os valores considerados foram de 8 m.c.a e 25 °C, respectivamente, levando em conta o valor médio da curva manométrica e as condições normais de teste (STC) para módulos fotovoltaicos. O tempo de simulação (t_{stop}) foi de 3 segundos para cada caso e frequência de chaveamento do inversor (f_{sw}) de 5000 Hz.

5.2.2.2 Comparação com os resultados de experimentais

A segunda etapa consiste na obtenção de valores de vazão em simulação, considerando cenários semelhantes aos dados encontrados em Campos (2020). Os ensaios obtiveram valores de vazão acumulada diário através da soma dos valores de vazão, em m³/h, para quatro *set-points* de velocidade e para climas ensolarado, parcialmente nublado, nublado e chuvoso. A quantidade de vezes que o valor de vazão deve ser somado depende da quantidade de horas em que a irradiação permaneceu no valor de pico considerado para cada situação, como mostra a Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Valores de pico de irradiação para as condições de entrada

Condição de rotação	Rotação (rpm)	Condição de irradiância	Pico de irradiação (W/m ²)
100%	3420	Ensolarado	1100
80%	2700	Parcialmente Nublado	870
60%	2000	Nublado	620
40%	1300	Chuvoso	430

Fonte: Autora (2022).

O valor de vazão será obtido através de simulação computacional para os quatro cenários acima e posteriormente multiplicados pela quantidade de horas de funcionamento para cada condição de rotação, conforme dados de Campos (2020). Os demais valores como altura manométrica, temperatura, tempo de simulação e frequência de chaveamento permanecem iguais a etapa de estudo de casos.

5.3 Resultados e discussões

5.3.1 Estudo de casos

Os resultados estão apresentados a seguir separados de acordo com os nove casos estudados. A única mudança entre as simulações são os valores de entrada de irradiação e set-point de velocidade de rotação.

Da Figura 5.13 a Figura 5.21 temos apresentados os resultados para cada caso estudado, para clima ensolarado, nublado e chuvoso, velocidade de 100, 80 e 60% da nominal, em todas as combinações possíveis.

O caso E100 refere-se ao clima ensolarado ($G = 1000 \text{ W/m}^2$) e velocidade de rotação em 100% (3420 rpm). A tensão de saída do arranjo fotovoltaico ficou em torno de 360 V, enquanto a corrente estabilizou em aproximadamente 1,35 A, após 0,45 segundos. Isso mostra claramente que o arranjo está operando como fonte de tensão, ou seja, após o MPP da curva I-V. Esse ponto de operação não fornece a máxima extração de potência devido aos baixos níveis de corrente. Após o estágio de inversão temos as curvas de tensão e corrente trifásicas. Os valores de pico em regime permanente foram aproximadamente 135 V e 8,90 A. Percebe-se que o regime transitório do inversor segue o mesmo tempo de estabilização que a corrente fotovoltaica, de 0,45 segundos, aproximadamente. O conjugado ou torque estabiliza rapidamente em 0,4 N.m. A vazão (Q) e a potência hidráulica possuem dinâmicas muito semelhantes e valores permanentes de $0,65 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ e 50 W, aproximadamente. Por fim, a velocidade rotacional possui valor estabilizado de 1200 rpm, não atingindo o set-point definido de 3420 rpm. Sua dinâmica possui estabilização um pouco mais tardia, em cerca de 1,05 segundos.

Os casos com velocidade em 100% da nominal, E100, N100 e C100, possuem semelhança dinâmica e de valores em regime permanente. A diferença mais significativa entre os resultados para esses casos é o tempo de estabilização que tende a aumentar quanto menor for os valores de irradiação. A estabilização para o caso N100 acontece no tempo 0,9 segundos e para o caso C100 em 2,7 segundos. Os valores de saída de tensão fotovoltaica são ligeiramente mais baixos, o que impacta em pequenas diferenças nas demais variáveis.

No caso E80 a velocidade rotacional consegue atingir o set-point definido de 2736 rpm em aproximadamente 1,05 segundos. O valor de pico da tensão de saída do inversor foi de 340 V e a corrente de aproximadamente 4 A de pico em regime permanente. Enquanto, os valores

de vazão e potência hidráulica estabilizados ficaram em $1,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ e 120 W, aproximadamente. O caso N80 se comporta de forma muito semelhante ao caso E80, com valores similares. Porém, o tempo de estabilização desse caso é em 2,3 segundos. Já o caso C80, não consegue atingir o set-point de rotação, possui dinâmica parecida com o caso C100, o tempo de estabilização é 2,5 segundos.

O caso E60, N60 e C60 conseguem atingir o set-point de rotação e possuem dinâmica semelhante aos demais casos, com tempo de simulação de, respectivamente, 0,5 s, 1,0 s e 2,1 s.

A seguir é apresentado uma tabela relacionando as grandezas simuladas juntamente com os símbolos e unidades respectivas, a fim de facilitar a apresentação dos resultados.

Tabela 5.7 – Relação de grandezas, símbolos e unidades simuladas

Grandeza	Símbolo	Unidade
Tensão de saída do arranjo fotovoltaico	V_{pv}	Volts (V)
Corrente de saída do arranjo fotovoltaico	I_{pv}	Amperes (A)
Tensão trifásica de saída do inversor	V_{ac}	Volts (V)
Corrente trifásica de saída do inversor	I_{ac}	Amperes (A)
Conjugado ou torque mecânico do motor-bomba	C	Newton-metro (N.m)
Vazão de saída da bomba centrífuga	Q	metros cúbicos por segundo (m^3/s)
Velocidade rotacional do motor-bomba	n	rotações por minuto (rpm)
Potência hidráulica	P_{HID}	Watts (W)

Fonte: Autora (2022).

O Quadro 5.1 mostra a comparação entre os valores obtidos para todos os casos de forma resumida. Para confecção do quadro foram considerados valores em regime permanente. Para forma de ondas senoidais o valor de pico é apresentado.

Quadro 5.1 – Resumo dos resultados para todos os casos simulados

	V_{pv} (V)	I_{pv} (A)	V_{ac} (V)	I_{ac} (A)	C (N.m)	Q (m^3/s)	n (rpm)	P_{HID} (W)
E100	365,1	1,288	131,8	8,983	0,4048	$0,667 \cdot 10^{-3}$	1234	52,30
N100	354,3	1,207	126,8	8,718	0,4048	$0,589 \cdot 10^{-3}$	1091	46,25
C100	336,4	1,104	119,3	8,278	0,4048	$0,487 \cdot 10^{-3}$	901	38,17
E80	364,5	1,421	348,7	3,838	0,4048	$1,457 \cdot 10^{-3}$	2697	114,30
N80	352,5	1,463	336,1	3,759	0,4048	$1,455 \cdot 10^{-3}$	2694	114,20
C80	339,6	0,968	92,9	7,372	0,4048	$0,592 \cdot 10^{-3}$	1096	46,48
E60	367,1	0,800	191,6	3,061	0,4048	$1,078 \cdot 10^{-3}$	1996	84,62
N60	356,8	0,820	185,7	3,032	0,4048	$1,076 \cdot 10^{-3}$	1993	84,46
C60	341,9	0,851	176,9	2,998	0,4048	$1,073 \cdot 10^{-3}$	1986	84,20

Fonte: Autora (2022).

Observando os valores de tensão V_{pv} percebe-se que está variável possui semelhanças independente do set-point definido, o que confirma a operação do sistema fotovoltaico como fonte de tensão CC, ou seja, o arranjo impõe o valor de tensão do barramento de alimentação

do inversor. Em relação aos valores em regime permanente, esses sofrem pequenos decréscimos à medida que a irradiação abaixa.

A corrente I_{pv} sofre alterações de acordo com o valor de set-point de velocidade. Isso porque, considerando que a potência requerida é definida pela bomba e a tensão é praticamente constante, a compensação pela lei de ohm é transferida para os valores de corrente. O significado disso é que a corrente extraída do arranjo fotovoltaico é, também, definida pela carga. Como o comportamento do arranjo fotovoltaico é de fonte de tensão, mostrando o funcionamento do sistema após o MPP na curva I-V, é natural que para valores ligeiramente menores de V_{pv} a corrente I_{pv} sofra pequenos acréscimos.

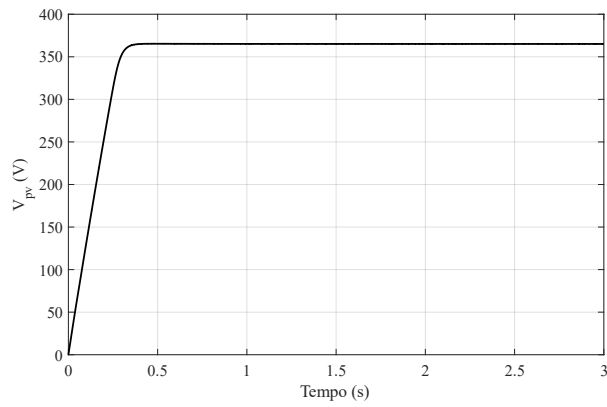
Os valores de V_{ac} e I_{ac} são mais influenciados pelos valores de set-point de velocidade muito mais do que pela mudança de irradiação, isso porque o controle modifica não só a frequência de alimentação como também o valor pico a pico da tensão V_{ac} . Como a potência demandada pela carga define os valores de corrente, percebe-se que a corrente I_{pv} é maior quando a tensão é menor, considerando mantida a mesma potência.

O valor do conjugado ou torque (C) mecânico não teve modificações com a variação da irradiação e set-point de velocidade. Já a vazão (Q) tem relação direta com a rotação de operação (n). Percebe-se que quanto maior a rotação do motor maior é a vazão entregue pela bomba. Usando a equação que determina a potência de um conjunto motor-bomba, que relaciona Q e n, confirma-se o comportamento proporcional entre essas variáveis quando a potência é aproximadamente constante.

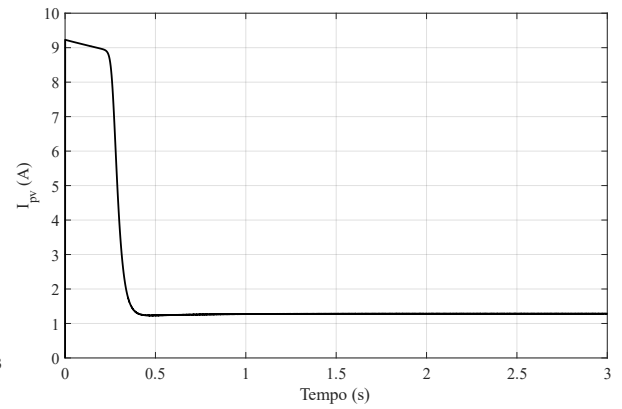
Para os casos com set-point de 80% e 60% a rotação atingiu valores bem próximos ao desejado. No entanto, para o caso de set-point de 100%, a velocidade nominal não foi atingida. Esse fato comprometeu os demais valores, resultando em potência e vazões menores do que o esperado. Para entender exatamente o que acontece para esses casos, uma investigação mais aprofundada no modelo se faz necessária, mas é bastante provável que o controle adotado para esse modelo não opere bem nessa faixa de velocidade, embora responda bem a faixas menores.

O resumo dos valores estudados que foi apresentado no quadro anteriormente, permite constatar os padrões de comportamento em relação aos valores de entrada definidos, irradiação e set-point de velocidade de rotação. Ainda, possibilita a identificação das faixas de operação em que o modelo responde melhor.

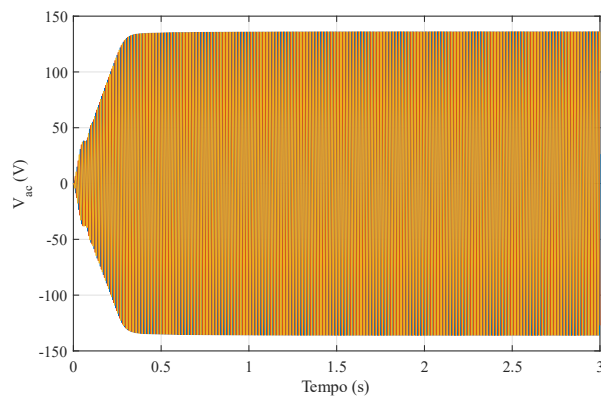
Figura 5.13 – Resultados para o caso E100



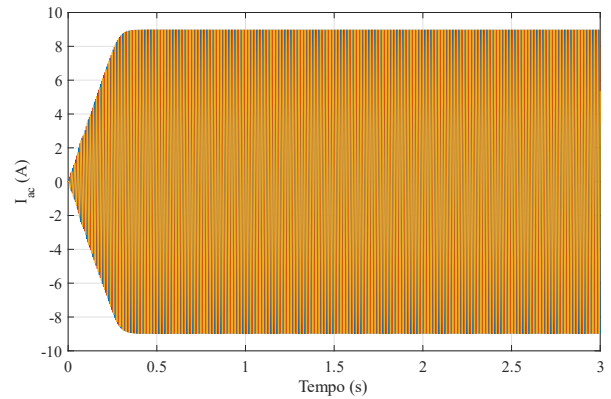
(a) V_{pv} (E100)



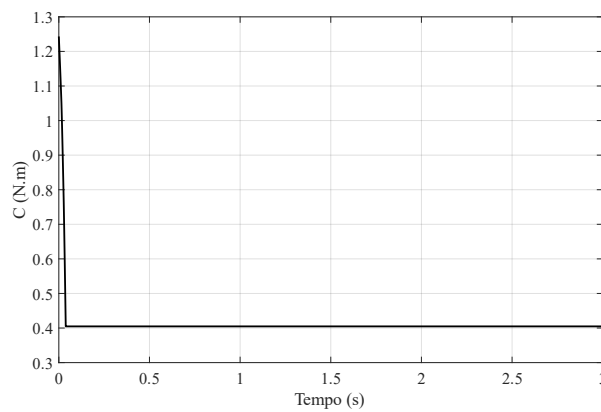
(b) I_{pv} (E100)



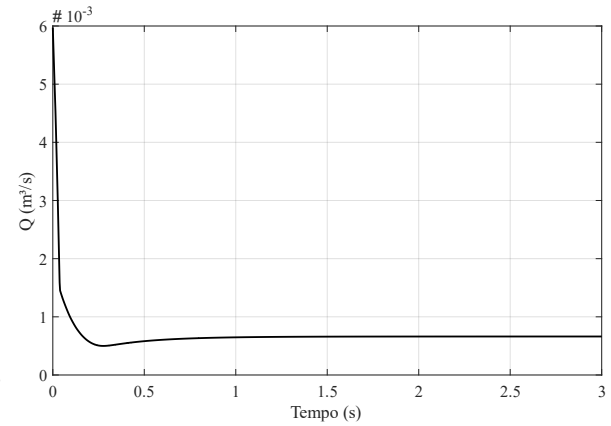
(c) V_{ac} (E100)



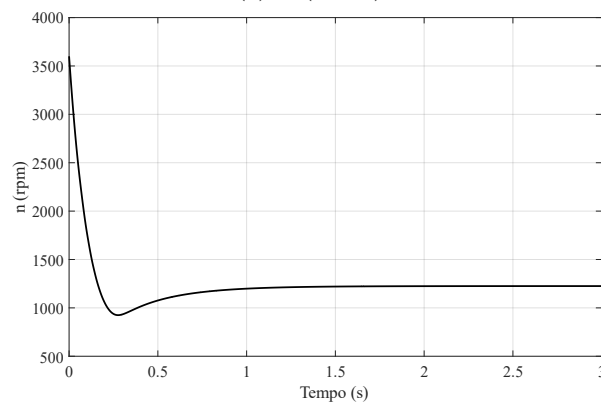
(d) I_{ac} (E100)



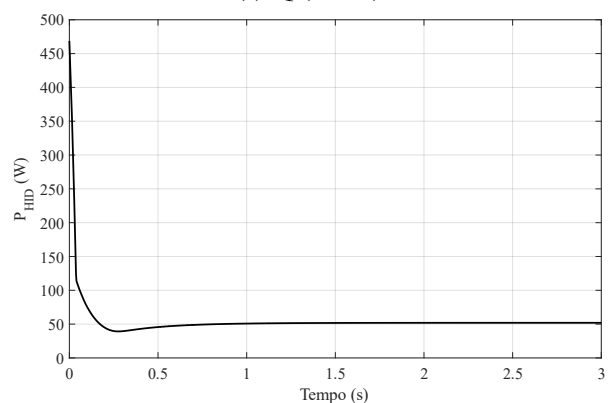
(e) C (E100)



(f) Q (E100)

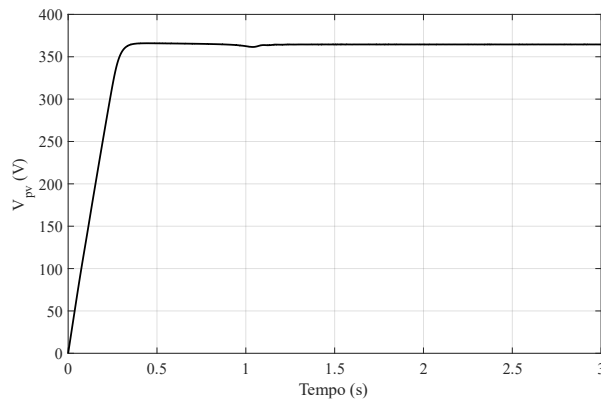


(g) n (E100)

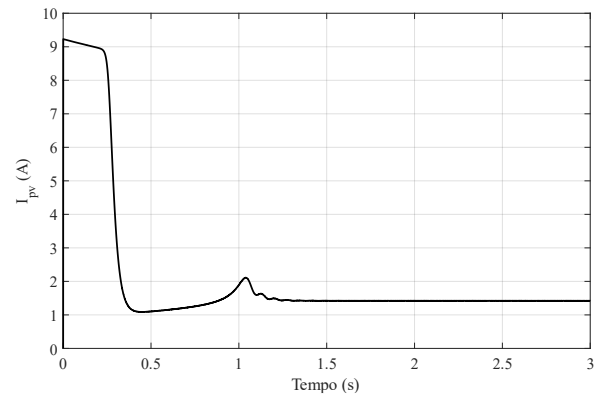


(h) P_{HID} (E100)

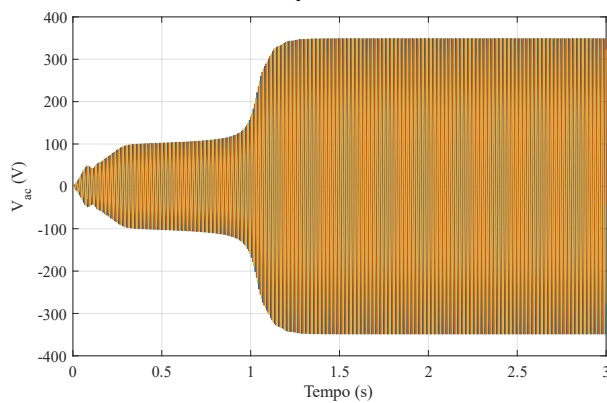
Figura 5.14 – Resultados para o caso E80



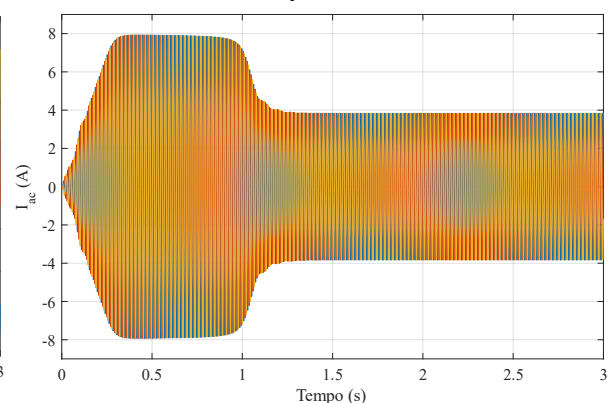
(a) V_{pv} (E80)



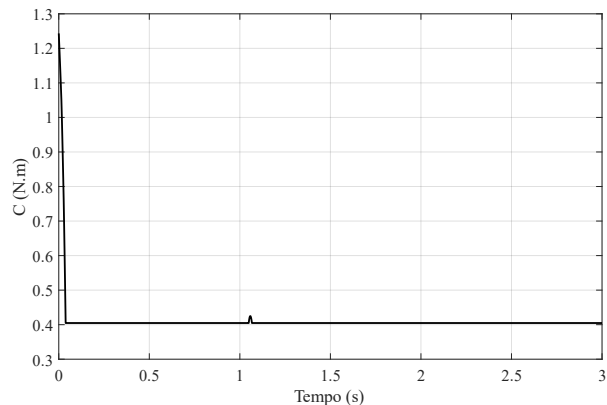
(b) I_{pv} (E80)



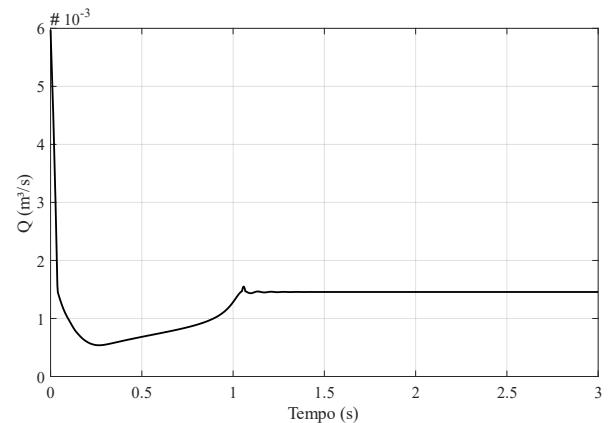
(c) V_{ac} (E80)



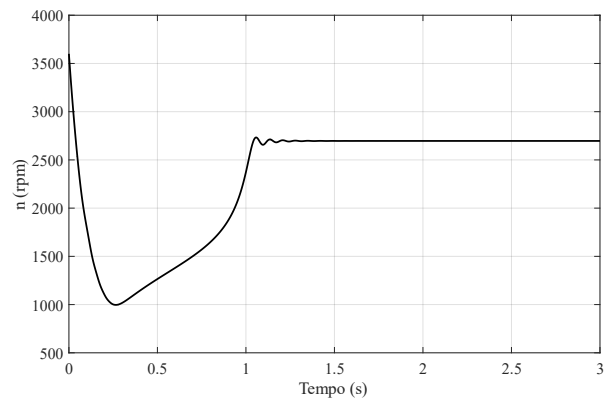
(d) I_{ac} (E80)



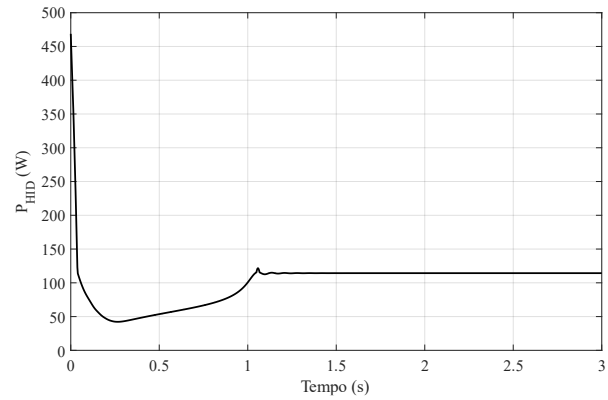
(e) C (E80)



(f) Q (E80)



(g) n (E80)



(h) P_{HID} (E80)

Figura 5.15 – Resultados para o caso E60

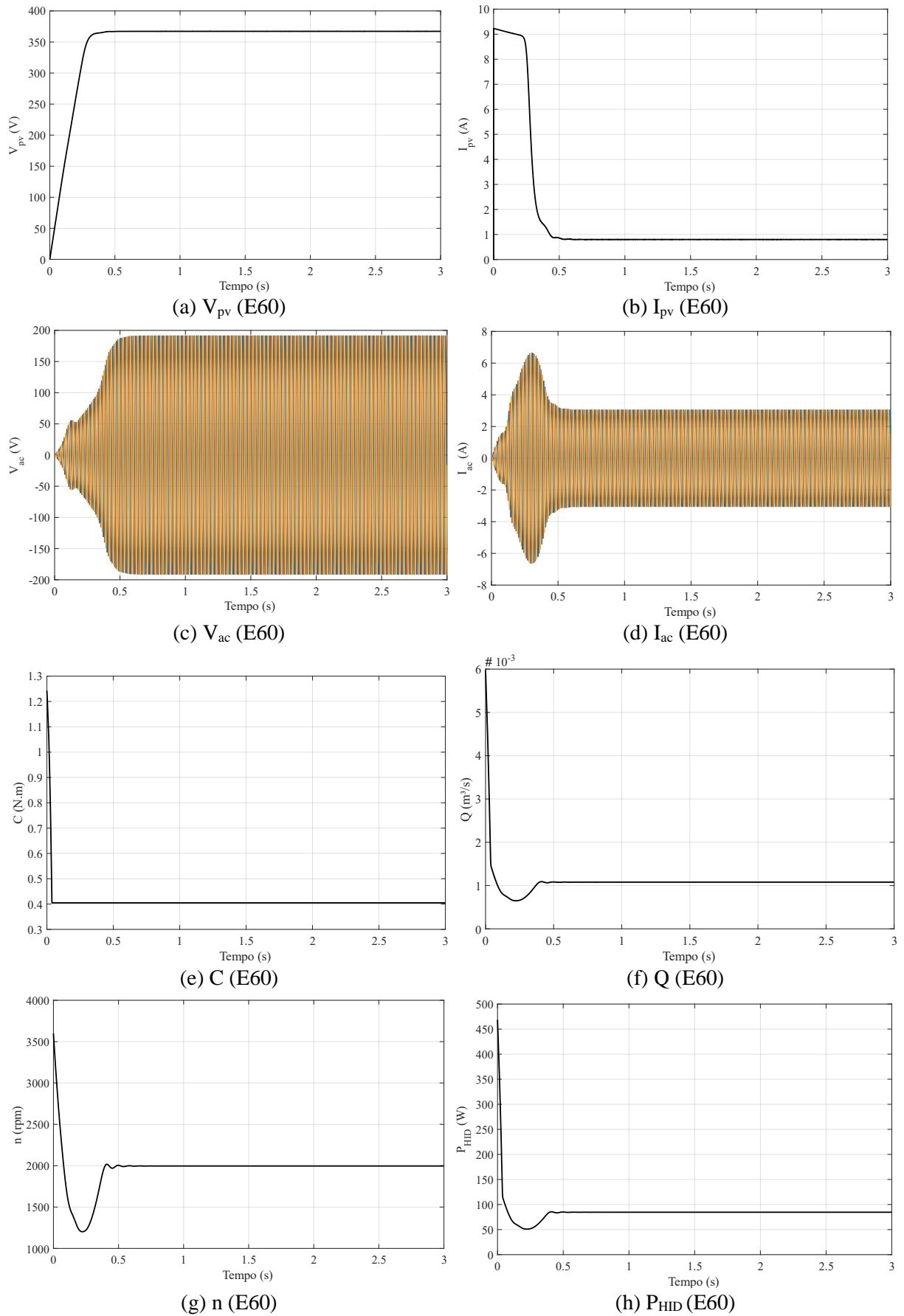
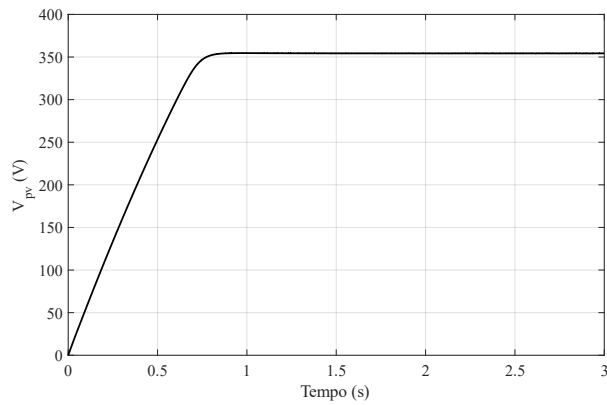
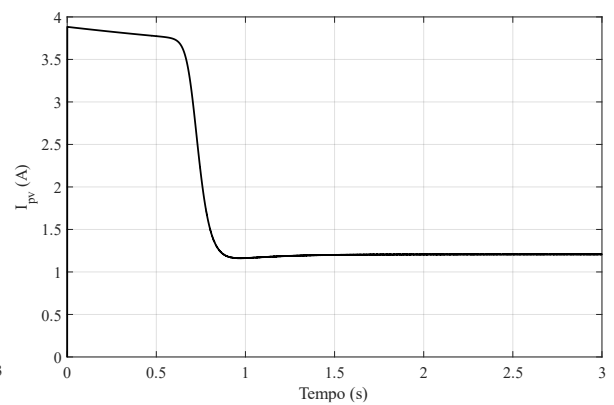


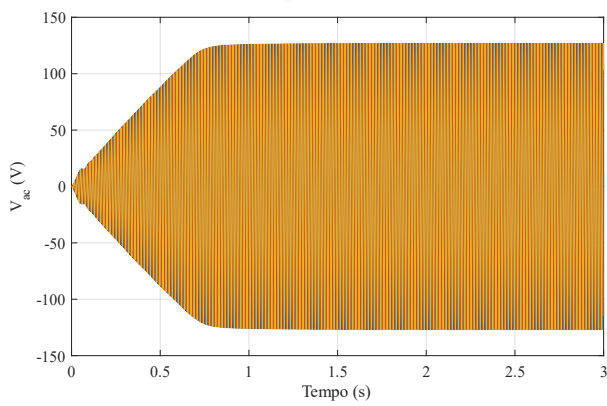
Figura 5.16 – Resultados para o caso N100



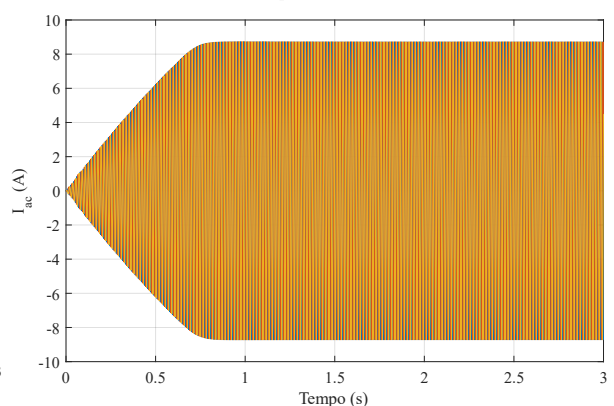
(a) V_{pv} (N100)



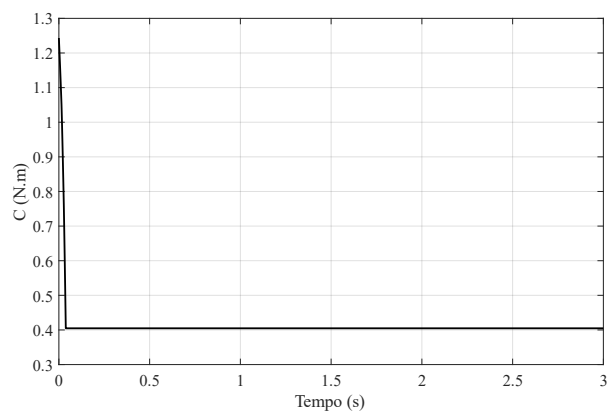
(b) I_{pv} (N100)



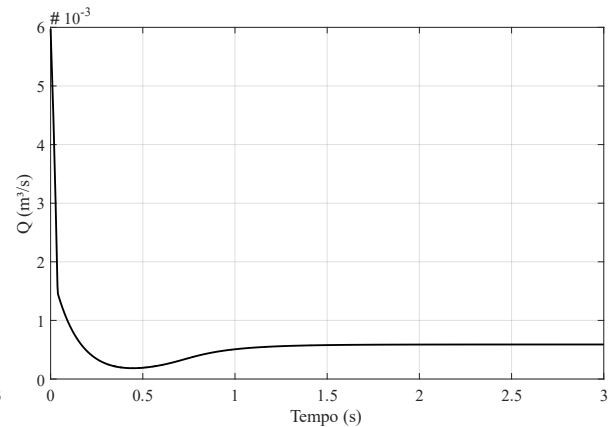
(c) V_{ac} (N100)



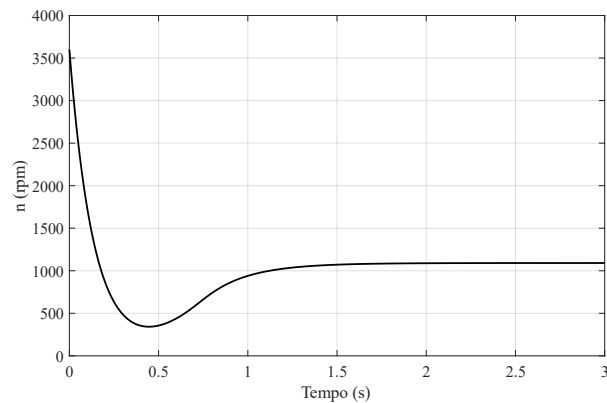
(d) I_{ac} (N100)



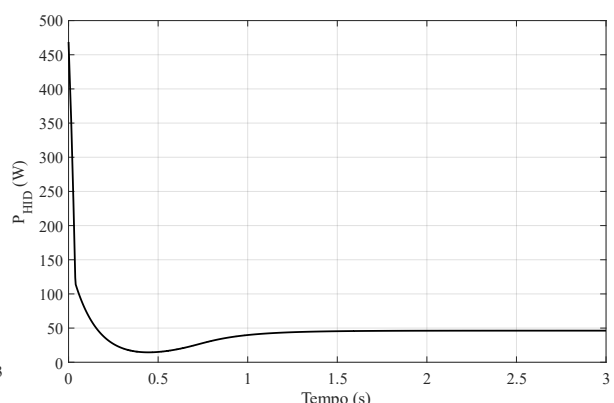
(e) C (N100)



(f) Q (N100)



(g) n (N100)



(h) P_{HID} (N100)

Figura 5.17 – Resultados para o caso N80

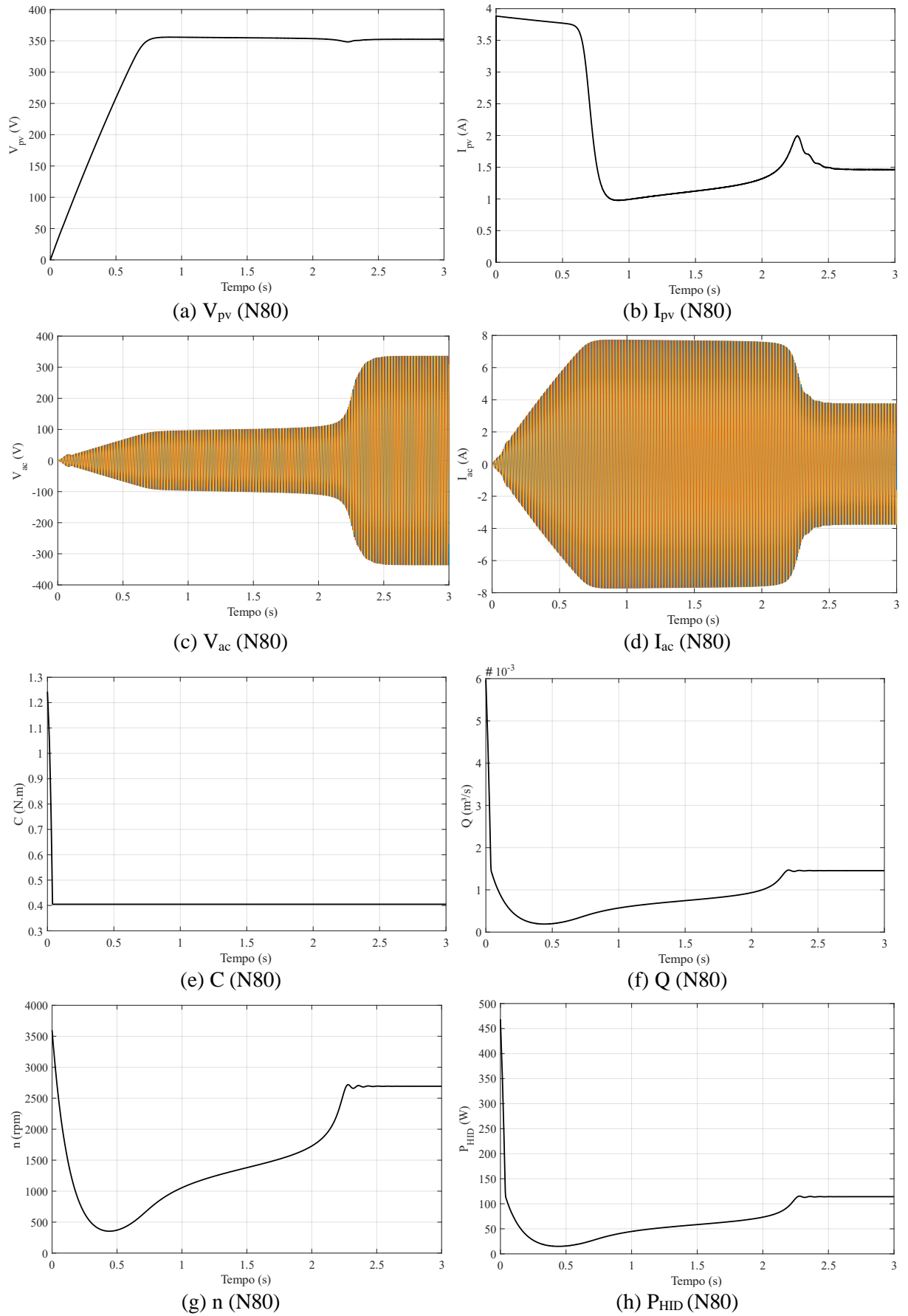
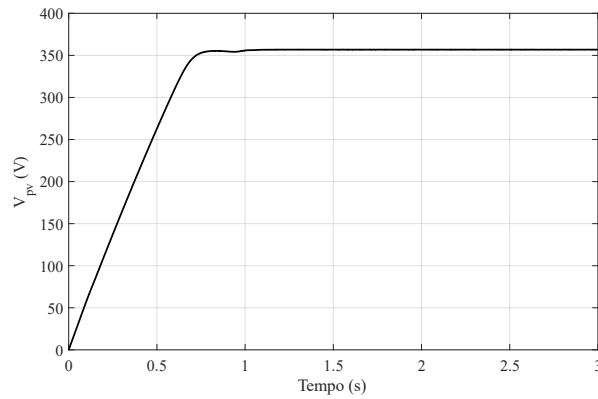
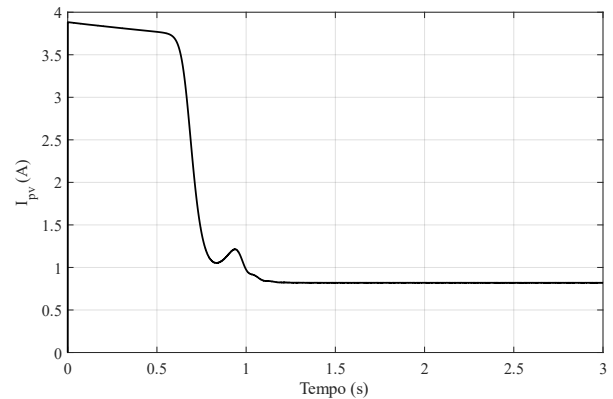


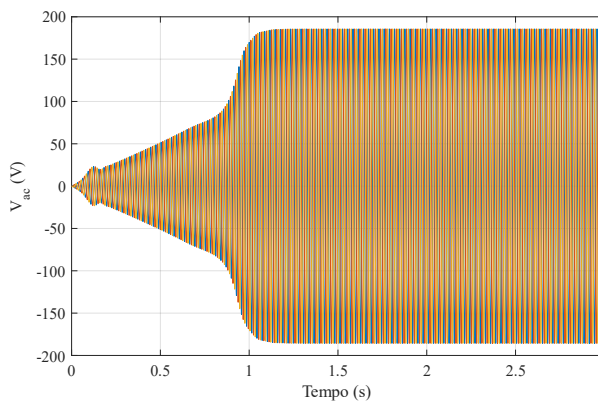
Figura 5.18 – Resultados para o caso N60



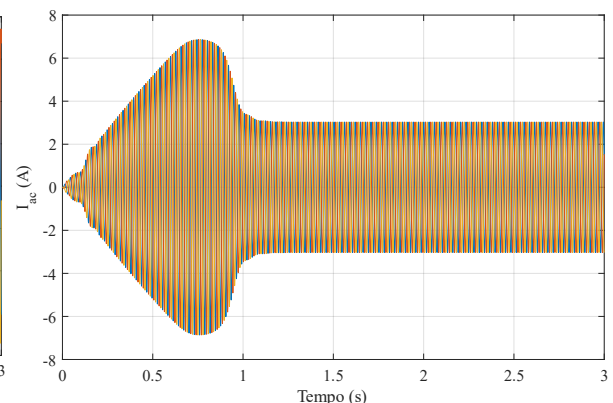
(a) V_{pv} (N60)



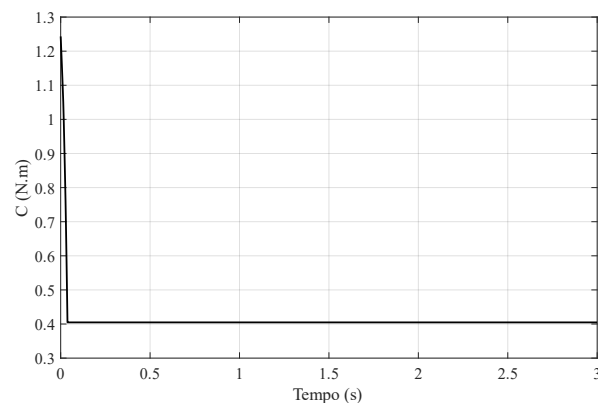
(b) I_{pv} (N60)



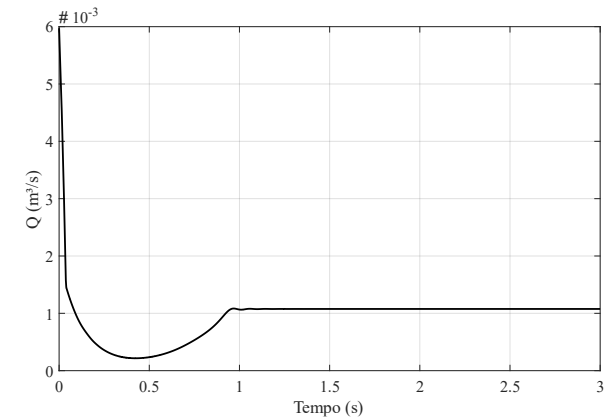
(c) V_{ac} (N60)



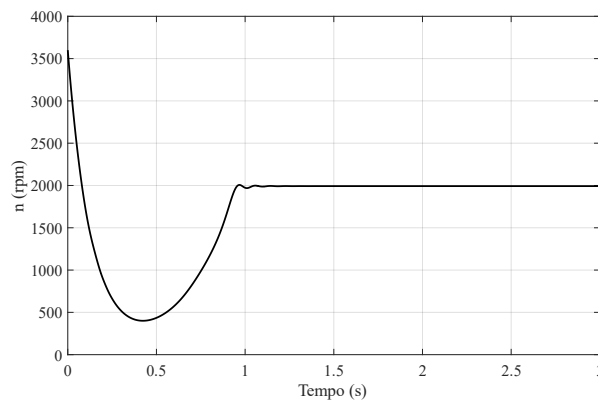
(d) I_{ac} (N60)



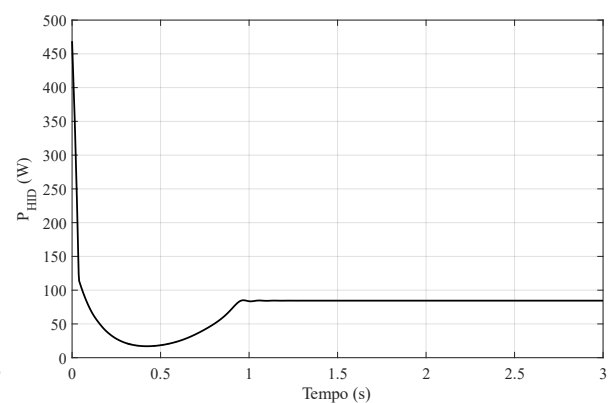
(e) C (N60)



(f) Q (N60)



(g) n (N60)



(h) P_{HID} (N60)

Figura 5.19 – Resultados para o caso C100

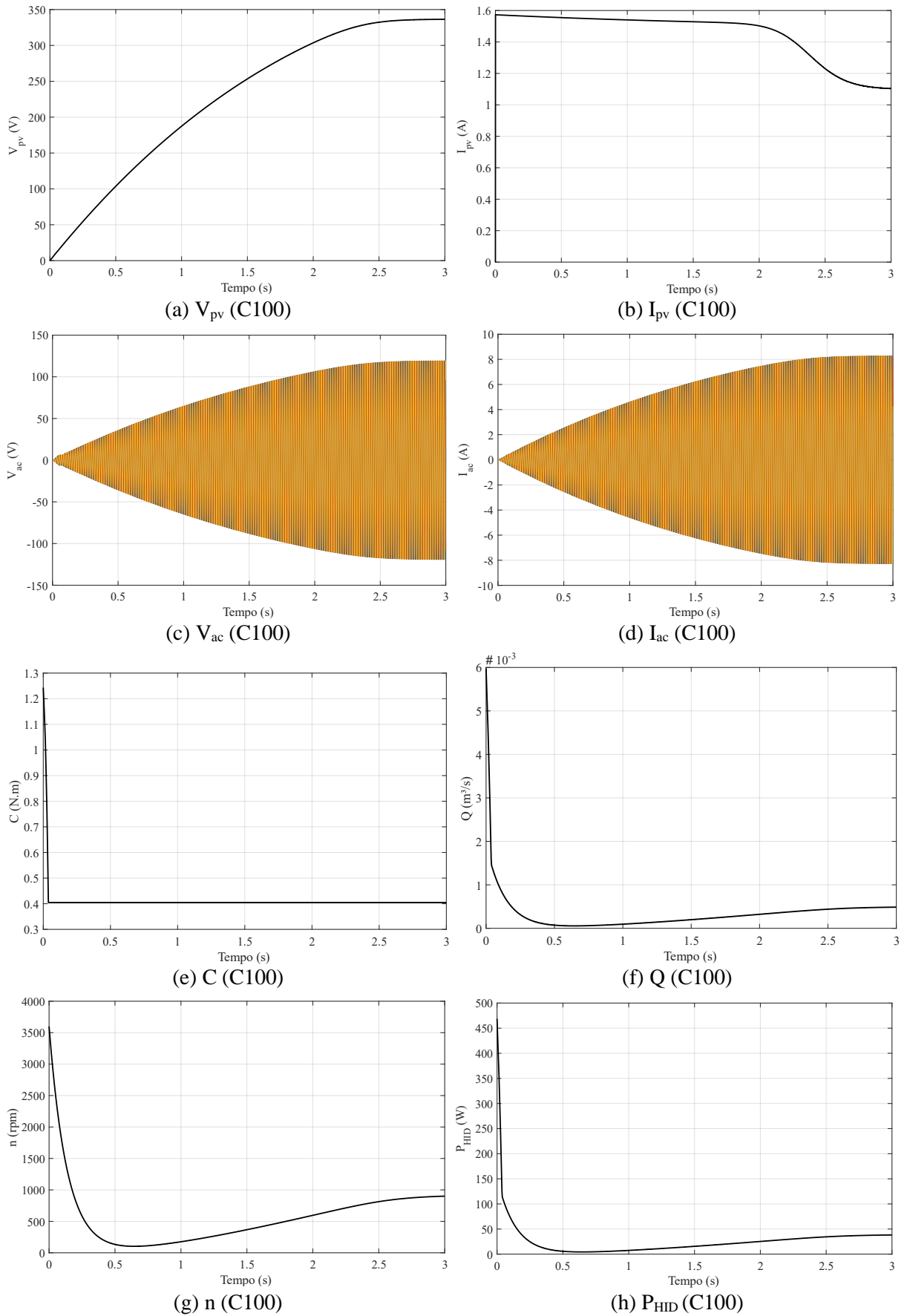
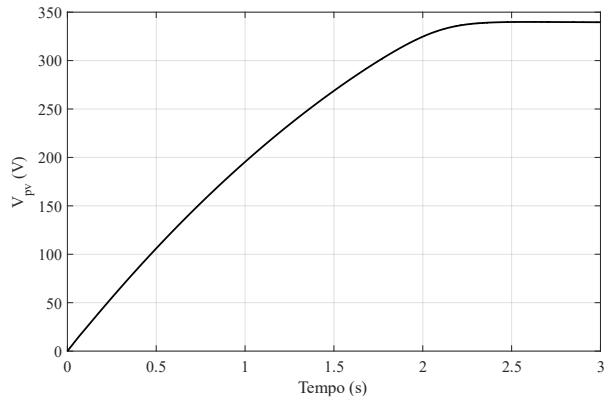
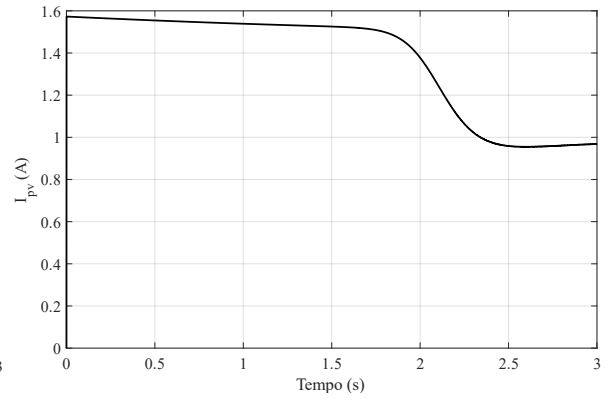


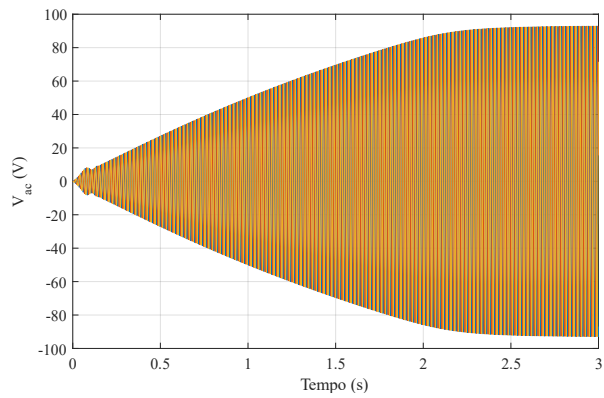
Figura 5.20 – Resultados para o caso C80



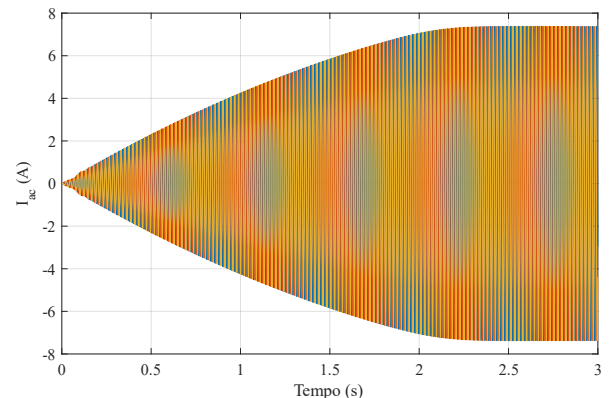
(a) V_{pv} (C80)



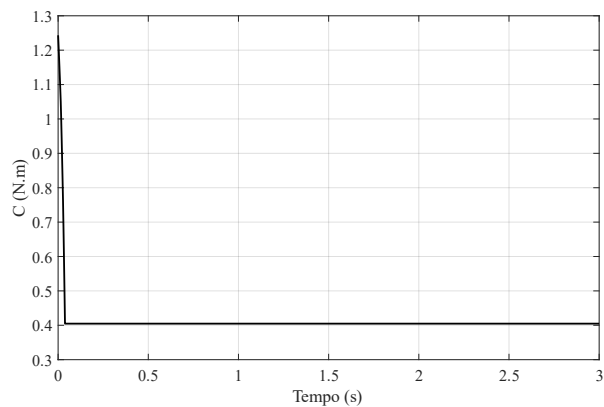
(b) I_{pv} (C80)



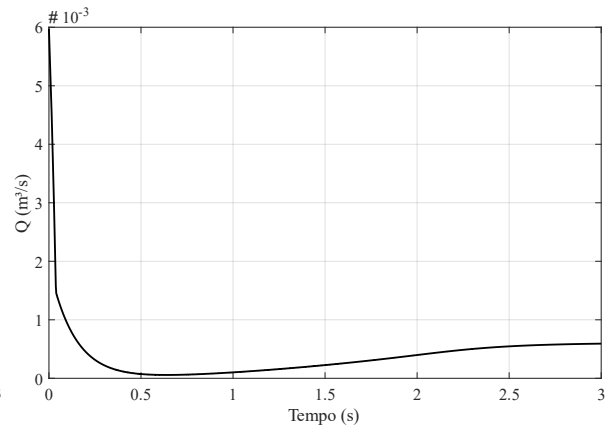
(c) V_{ac} (C80)



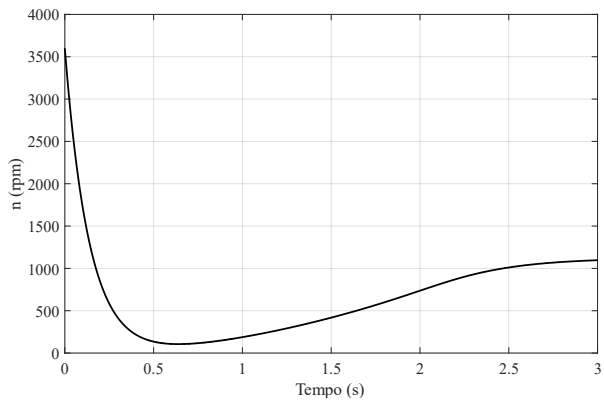
(d) I_{ac} (C80)



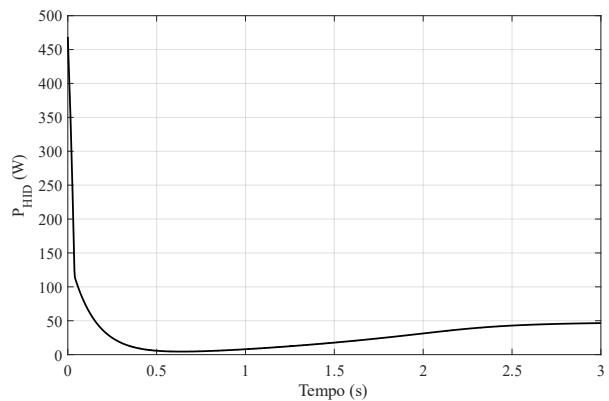
(e) C (C80)



(f) Q (C80)

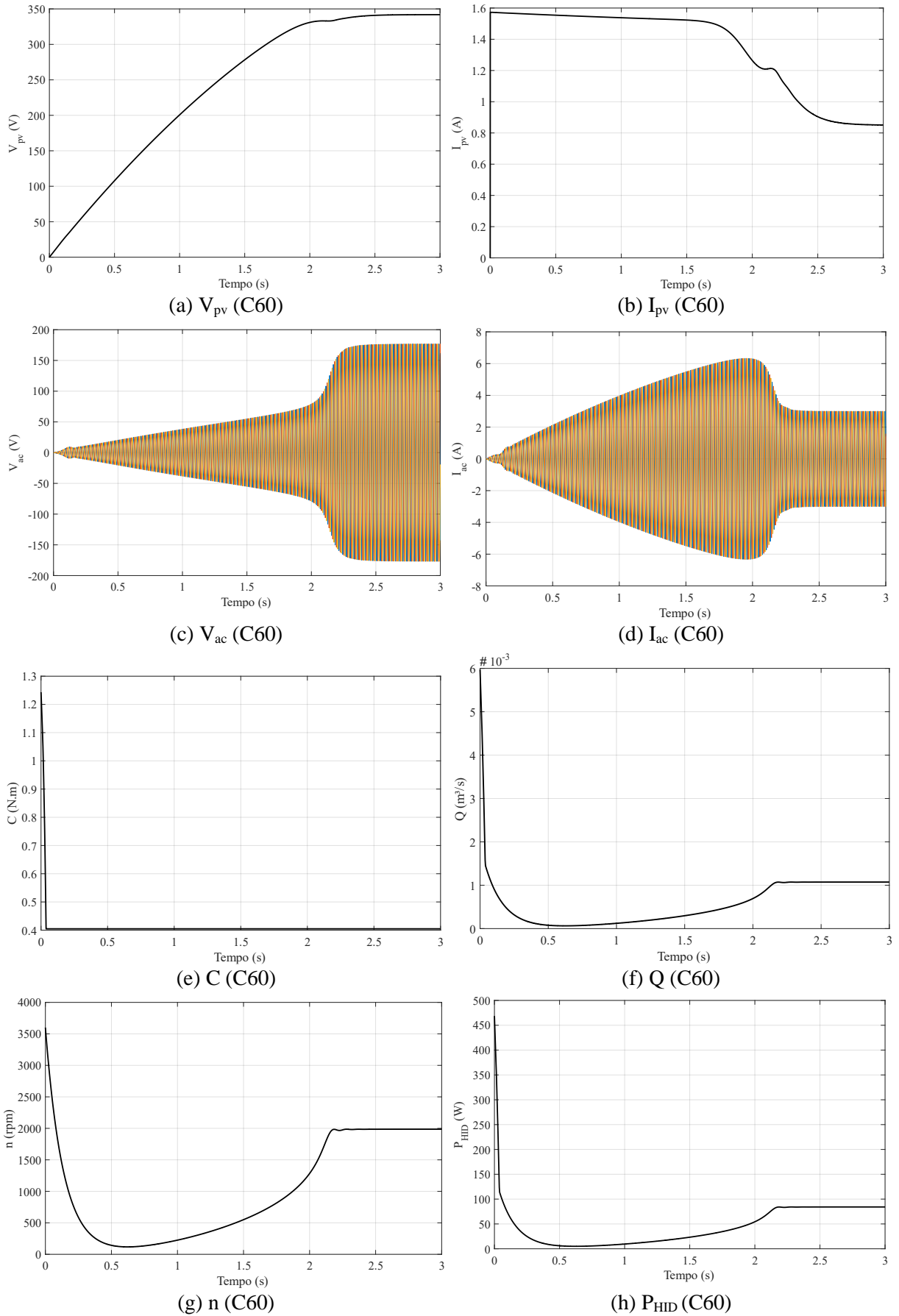


(g) n (C80)



(h) P_{HID} (C80)

Figura 5.21 – Resultados para o caso C60



5.3.2 Comparação com valores experimentais

Os valores de vazão, obtidos através de simulação, considerando os dados de entrada de set-point de velocidade e irradiação solar, conforme descrito anteriormente, estão descritos na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Resultados de simulação de vazão instantânea

Velocidade (rpm)	Irradiação (W/m ²)	Vazão (m ³ /h)
3420	1100	7,29
2700	870	21,71
2000	620	15,37
1300	430	8,16

Fonte: Autora (2022).

De acordo com os resultados dos ensaios realizados por Campos (2020), a quantidade de horas de funcionamento para cada condição de irradiação e os valores de vazão obtidos em simulação, possibilitaram o cálculo da vazão acumulada diária, como mostra a

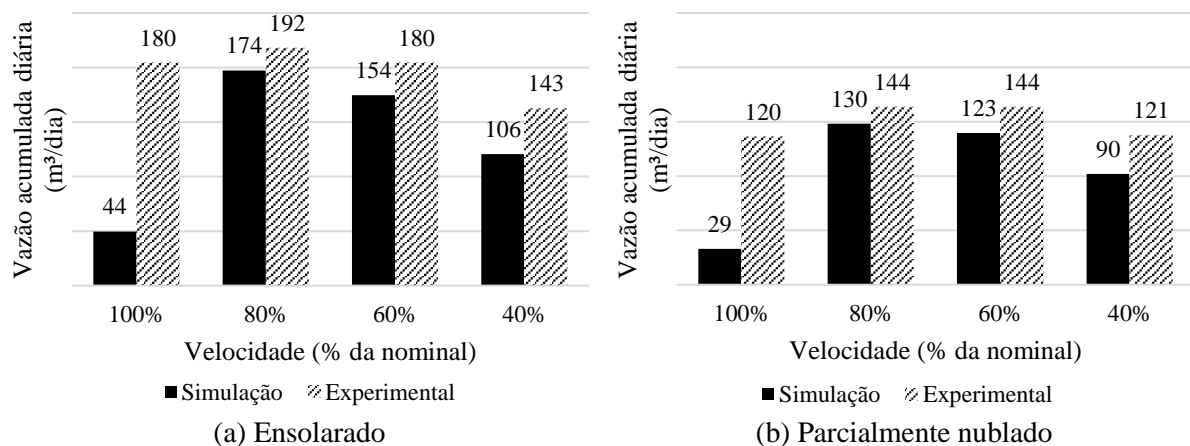
Tabela 5.9 – Vazão acumulada diária para diversas condições de irradiação

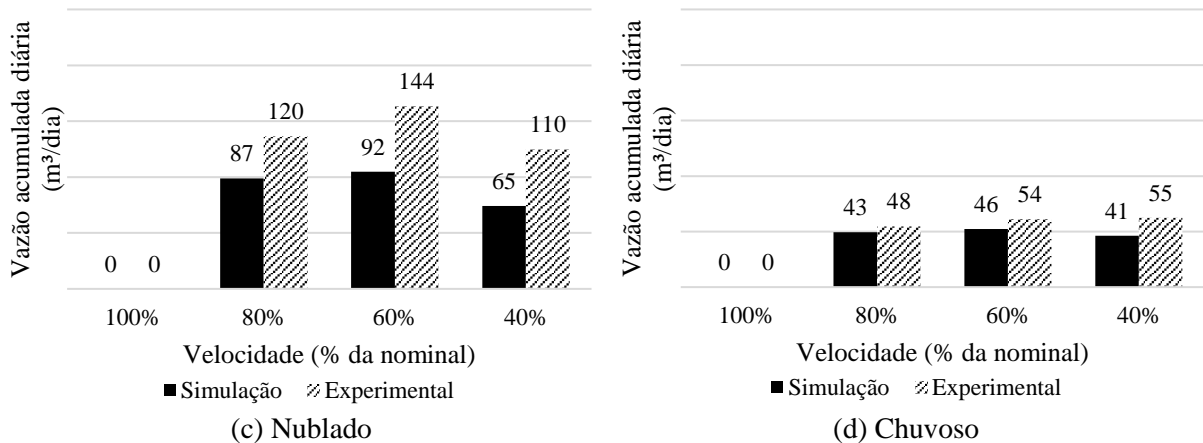
Velocidade (rpm)	Ensolarado		Parcialmente nublado		Nublado		Chuvoso	
	Horas	Vazão (m ³ /dia)	Horas	Vazão (m ³ /dia)	Horas	Vazão (m ³ /dia)	Horas	Vazão (m ³ /dia)
100%	6	43,76	4	29,17	0	0,00	0	0,00
80%	8	173,68	6	130,26	4	86,84	2	43,42
60%	10	153,70	8	122,96	6	92,22	3	46,11
40%	13	106,05	11	89,73	8	65,26	5	40,79

Fonte: Autora (2022).

Os gráficos a seguir mostram a comparação entre os resultados de simulação e os ensaios experimentais de Campos (2020).

Figura 5.22 – Comparação de valores simulados com valores experimentais





Fonte: Autora (2022).

Os resultados apresentados na Figura 5.22 mostram que para velocidade nominal o modelo não responde bem e tende a apresentar níveis inferiores ao esperado. Isso devido as limitações do modelo já identificados nas simulações anteriores. Para os demais set-points, percebe-se valores sempre inferiores aos experimentais, embora o comportamento vazão versus velocidade seja semelhante, com exceção dos valores de velocidade igual a nominal. Deste modo, confirma-se que o modelo se comporta de maneira satisfatória para velocidade rotacional igual ou inferior a 80% da nominal.

5.4 Conclusões

Esse trabalho realizou o desenvolvimento de um modelo computacional que descreve e simula o comportamento de sistemas de bombeamento que utilizam como fonte a energia solar fotovoltaica. O *software Matlab/Simulink* foi a plataforma de implementação e integração dos componentes que compõem o sistema em estudo, composto por um arranjo fotovoltaico, um inversor de frequência com controle de velocidade e um conjunto motor-bomba. Os componentes foram parametrizados e simulados separadamente, utilizando fontes e cargas ideais e lineares, para obter a validação individual de cada elemento que compõe o sistema, e assim, garantir a correta calibração e funcionamento quando conectados.

Posteriormente, um plano de simulações foi definido, considerando as combinações de entrada das duas variáveis em estudo, sendo elas, irradiação e set-point de velocidade do motor. Essas variáveis foram escolhidas por permitir o teste sobre diversas condições da fonte de alimentação, através do sistema fotovoltaico, e da carga, nesse caso o motor de indução. Foram realizadas nove simulações, das quais foram extraídas características de oito variáveis de saída, sendo elas tensão e corrente do arranjo fotovoltaico, tensão e corrente do inversor de

frequência, conjugado e velocidade do motor de indução e vazão e potência hidráulica da bomba d'água.

Os resultados foram apresentados em formato de gráfico, para evidenciar o comportamento dinâmico e transitório das variáveis em estudo, e também, na forma de quadro, em que os valores em regime permanente são apresentados de forma reduzida para permitir a verificação de comportamentos padronizados e faixas de operação. A análise dos resultados nos permitiu concluir que a maior parte dos resultados se comportou da forma esperada, entregando valores coerentes as leis da elétrica e da hidráulica. No entanto, para a faixa de operação com set-point próximo a velocidade nominal, notou-se uma dificuldade do controle em atingir o valor de set-point, o que não permitiu a extração adequada de potência nesse caso.

Ainda, foi possível perceber que o arranjo fotovoltaico tende a operar no modo fonte de tensão mesmo com a variação dos parâmetros de entrada, o que nos permitiu concluir que a irradiação influencia diretamente os valores de corrente injetada e mantém a tensão de saída aproximadamente constante. A relação entre potência hidráulica, vazão e velocidade rotacional ficou bem representada no modelo, para todos os casos simulados. O tempo de estabelecimento do sistema e tipo de dinâmica na saída do inversor parece estar relacionada ao set-point de velocidade definido, isso devido a atuação do controle de velocidade na definição da onda de tensão de saída do inversor.

Para os resultados de comparação entre os valores de simulação e experimentais de Campos (2020), percebe-se que embora os valores de simulação sejam sempre inferiores aos experimentais, para velocidades menores do que a nominal, observou-se um comportamento vazão *versus* velocidade semelhante para as situações comparadas.

Deste modo, pode-se concluir que o modelo representa bem o comportamento de um sistema de bombeamento fotovoltaico para faixas de operação com velocidade abaixo de 80% da nominal. O que nos permitiu notar a influência das variáveis de entrada nos demais parâmetros do sistema. A implementação de um controle de velocidade mais sofisticado pode permitir a representação fiel do sistema em todas as faixas de rotação. Outro avanço, significativo, seria a inclusão de um controle de rastreamento de máxima potência no estágio fotovoltaico, que forçaria o arranjo a operar na máxima potência, possibilitando a extração de mais potência pelo conjunto motor-bomba, contornando o comportamento não-linear dos módulos fotovoltaicos.

Assim, espera-se ter contribuído para o aprimoramento da compreensão dos sistemas de bombeamento fotovoltaico que utilizam motores de indução como elemento de conversão eletromecânica e validação do uso dessa topologia, em contrapartida aos motores CC, como

forma de viabilizar economicamente e tecnicamente a utilização dessa configuração para aplicações de bombeamento, especialmente em áreas remotas e de difícil acesso.

5.5 Referências bibliográficas

AGRAWAL, J. H.; AWARE, M. V. Photovoltaic simulator developed in LabVIEW for evaluation of MPPT techniques. International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, ICEEOT 2016. **Anais...2016**

ANASTÁCIO, B. P.; DIAS, M. P. Determinação dos parâmetros do motor de indução trifásico para análise de desempenho através de simulação computacional. **Caderno de Estudos em Engenharia Elétrica**, v. 2, n. 2, 2020.

ASGARI, S. H.; JANNATI, M.; IDRIS, N. R. N. Modeling of three-phase induction motor with two stator phases open-circuit. 2014 IEEE Conference on Energy Conversion, CENCON 2014. **Anais...Johor Bahru: IEEE, 2014**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5626 - Instalação predial de água fria Rio de Janeiro, 1998.

ASSUNÇÃO, J. T.; ASSUNÇÃO, T. C. B. N. Determinação dos parâmetros do circuito equivalente do MIT através de Dados de catálogos de fabricante. **UFSJ–Universidade Federal de São João del-Rei**, n. 14, 2006.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

BRITO, M. A. DE G.; GALOTTO, L.; SAMPAIO, L. P.; DE AZEVEDO MELO, G.; CANESIN, C. A. Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 60, n. 3, p. 1156–1167, 2013.

CAMPOS, L. C. C. **Utilização de motor de indução com conversor de frequência convencional fotovoltaico para irrigação**. Instituto Federal Goiano – Câmpus Rio Verde – GO, 2020.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

CHIN, C. S.; NEELAKANTAN, P.; YOONG, H. P.; YANG, S. S.; TEO, K. T. K. Maximum Power Point Tracking for PV Array under Partially Shaded Conditions. 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks. **Anais...2011**

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. **Fundamentals of Power Electronics**. 2. ed. Secaucus: Kluwer Academic, 2004.

ERROUHA, M.; DEROUICH, A.; MOTAHHIR, S.; ZAMZOOM, O.; EL OUANJLI, N.; EL GHZIZAL, A. Optimization and control of water pumping PV systems using fuzzy logic controller. **Energy Reports**, v. 5, p. 853–865, 2019.

BLAIR, N.; DIORIO, N.; FREEMAN, P. G.; JANZOU, S., NEISES, T.; WAGNER, M. 2018. **System Advisor Model (SAM) General Description (Version 2017.9.5)**. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/ TP-6A20-70414. <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70414.pdf>.

GUIMARAES, J. M. C.; BERNARDES, J. V.; HERMETO, A. E.; BORTONI, E. C. Determination of three-phase induction motors model parameters from catalog information. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, v. 2014-October, n. October, p. 1–5, 2014.

KECHICHE, O. B. H. B.; BARKAOUI, B.; HAMZA, M.; SAMMOUDA, H. Simulation and comparison of P&O and fuzzy logic MPPT techniques at different irradiation conditions. International Conference on Green Energy and Conversion Systems, GECS 2017. **Anais...2017**

KOUTROULIS, E.; CHATZAKIS, J.; KALAITZAKIS, K.; VOULGARIS, N. C. A bidirectional, sinusoidal, high-frequency inverter design. **IEE Proceedings-Electric Power Applications**, v. 148, n. 4, p. 315–321, 2001.

LAKKA, M.; KOUTROULIS, E.; DOLLAS, A. Development of an FPGA-based SPWM generator for high switching frequency DC/AC inverters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 29, n. 1, p. 356–365, 2014.

LODHI, E.; JING, S.; LODHI, Z.; SHAFQAT, R. N.; ALI, M. Rapid and Efficient MPPT Technique with Competency of High Accurate Power Tracking for PV System. Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2017 4th International Conference on. **Anais...2017**

MUDLAPUR, A.; RAMANA, V. V.; DAMODARAN, R. V.; BALASUBRAMANIAN, V.; MISHRA, S. Effect of Partial Shading on PV Fed Induction Motor Water Pumping Systems. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 34, n. 1, p. 530–539, 2019.

NAYAK, P.; RAJASHEKARA, K.; PRAMANICK, S. K. Soft-Switched Modulation Technique for a Single-Stage Matrix-Type Isolated DC-AC Converter. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 55, n. 6, p. 7642–7656, 2019.

NETTO, J. M. A. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1998.

NOUR, M.; THIRUGNANAM, P. Investigation of Voltage and Frequency Variation on Induction Motor Core and Copper Losses. 2017 7th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO). **Anais...Sharjah: IEEE**, 2017

OZGENER, O.; HEPBASLI, A. A review on the energy and exergy analysis of solar assisted heat pump systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 3, p. 482–496, 2007.

- PARK, M.; YU, I.-K. A study on the optimal voltage for MPPT obtained by surface temperature of solar cell. 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004. **Anais...2004**
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPTEL - CRESESB, 2014.
- RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron Books, 1999.
- RAZAVI, S. H.; AHMADI, R.; ZAHEDI, A. Modeling, simulation and dynamic control of solar assisted ground source heat pump to provide heating load and DHW. **Applied Thermal Engineering**, v. 129, p. 127–144, 2018.
- ROHIT, K. B.; KARVE, G. M.; KHATRI, M. Solar water pumping system. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. 7, p. 323–337, 2013.
- SAH, B.; KUMAR, G. V. E. S. A comparative study of different MPPT techniques using different DC-DC converters in a standalone PV system. 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). **Anais...2016**
- TRIPATHI, R. N. **Solar Photovoltaic Power Generating System & Grid Integration - Modeling, Controller Design and Optimization**. Kyushu Institute of Technology, 2017.
- TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- TUNYASRIRUT, S.; SRILAD, S.; SUKSRI, T. Comparison power quality of the voltage source inverter type SVPWM and SPWM technique for induction motor drive. **Proceedings of the SICE Annual Conference**, v. 0, n. 2, p. 241–246, 2008.
- UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2014.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. **IEEE Transactions on power electronics**, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009.
- VISWAMBARAN, V. K.; GHANI, A.; ZHOU, E. Modelling and simulation of maximum power point tracking algorithms & review of MPPT techniques for PV applications. Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA), 2016 5th International Conference on. **Anais...2016**
- WANG, J.; WU, H.; YANG, T.; ZHANG, L.; XING, Y. Bidirectional Three-Phase DC-AC Converter with Embedded DC-DC Converter and Carrier-Based PWM Strategy for Wide Voltage Range Applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 66, n. 6, p. 4144–4155, 2019.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando o aumento eminente da população mundial e conseqüentemente a demanda por alimentos, a melhoria da eficiência da agricultura irrigada e das preocupações ambientais tornam-se cada vez mais importantes. As soluções que permitam o aumento da produção, diminuam o desperdício de água e reduzam os custos de operação são cada vez mais necessárias. Como discutido, os sistemas de bombeamento de água que utilizam fonte solar fotovoltaica mostram-se uma boa alternativa para o desenvolvimento econômico sustentável da prática de irrigação, além de representarem a possibilidade de acesso as tecnologias agrícolas para locais remotos ou de dificuldade de acesso à energia elétrica.

Deste modo, este trabalho buscou a implementação computacional de um sistema de bombeamento fotovoltaico, utilizando motor de indução e conversor de frequência para condicionamento da energia produzida pelo arranjo fotovoltaico. Essa topologia possui vantagens em relação aos sistemas de bombeamento que utilizam motores CC, principalmente relacionadas a custo e facilidade de manutenção. A representação dos componentes do sistema em ambiente de simulação é possível graças a modelagem matemática de seus comportamentos e características. A utilização do *software Matlab/Simulink* possibilitou a manipulação das variáveis do sistema, como irradiação solar e set-point de velocidade, assim como a análise das respectivas respostas do sistema.

Portanto, a obtenção do modelo computacional aqui apresentado permitiu a compreensão desse tipo de topologia de sistema de bombeamento, sob diversas condições de entrada. Possibilitando, assim, a difusão da utilização de motor de indução em conjunto com arranjos fotovoltaicos, já que existem poucos estudos e aplicações nesse sentido. Essa solução pode se mostrar uma alternativa mais acessível e viável economicamente, haja vista a presença consolidada do motor de indução no mercado nacional. A modelagem computacional permite a previsão do comportamento do sistema e testes de simulação sob condições de entrada variadas, que muitas vezes, em testes experimentais são mais complicados.

Com base nas limitações do modelo apresentado nesse trabalho em relação a faixa de operação de rotação, propõe-se que em trabalhos futuros um controle de rastreamento de máxima potência (MPPT) seja implementado para garantir a máxima extração de potência do gerador fotovoltaico. Além disso, a simulação de mais de um tipo de sistema pode ser interessante para melhor interpretação dos resultados e compreensão do comportamento das variáveis para sistemas de pequeno, médio e grande porte. Por último, a produção de ábacos

para o dimensionamento hidráulico e aplicativos móveis como fonte de consulta, seriam de grande valia para o usuário final, nesse caso, o produtor rural.

Por fim, espera-se que essa pesquisa sirva como consulta a demais trabalhos e desenvolvimento na área de bombeamento fotovoltaico, especialmente para aplicações na área de irrigação, fomentando o desenvolvimento de novas tecnologias para atendimentos das demandas do mercado agrícola.

ANEXO A



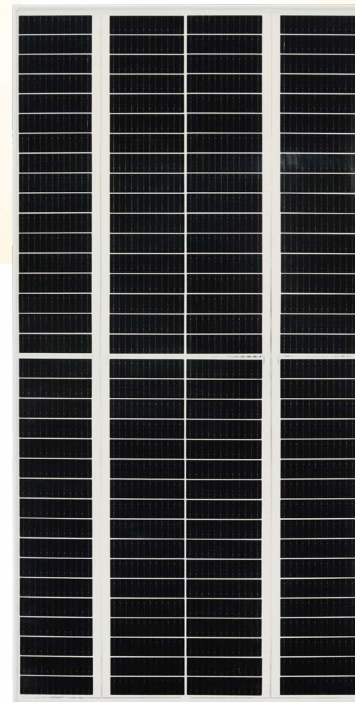
Old Module Replacement

KuPower Mono PERC

330 W ~ 355 W

CS6X-330 | 335 | 340 | 345 | 350 | 355P-PLUS

Perfect Size to Replace 6" 72 Cell Module
Excellent Electrical Compatibility



- Module size 1954 x 982 mm
Perfect size to replace 6" 72 cell module
- Single module replacement possible
- Minimize BoS cost for module replacement
- Can be used to replace other brand 6" 72 cell module

Enhanced Energy Yield and Product Reliability

- Low power loss in cell connection
- Better shading tolerance
- Minimizes micro-crack impacts
- Heavy snow load up to 5400 Pa, enhanced wind load up to 2400 Pa**

- Enhanced Product Warranty on Materials and Workmanship***
- Linear Power Performance Warranty***

*According to the applicable Canadian Solar Limited Warranty Statement. For detailed information, please contact your local Canadian Solar sales and technical representatives.

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES*

ISO 9001:2015 / Quality management system
ISO 14001:2015 / Standards for environmental management system
ISO 45001: 2018 / International standards for occupational health & safety

PRODUCT CERTIFICATES*

IEC 61215 / IEC 61730 / CE
UL 61730 / IEC 61701 / IEC 62716
UNI 9177 Reaction to Fire: Class 1 / Take-e-way



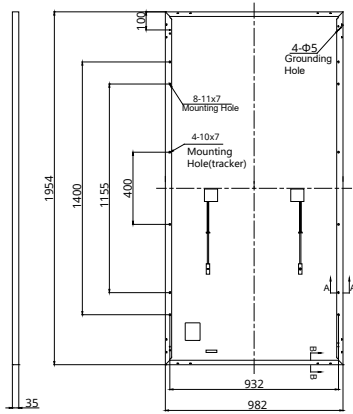
* The specific certificates applicable to different module types and markets will vary, and therefore not all of the certifications listed herein will simultaneously apply to the products you order or use. Please contact your local Canadian Solar sales representative to confirm the specific certificates available for your product and applicable in the regions in which the products will be used.

* For detailed information, please contact your local Canadian Solar sales and technical representatives.

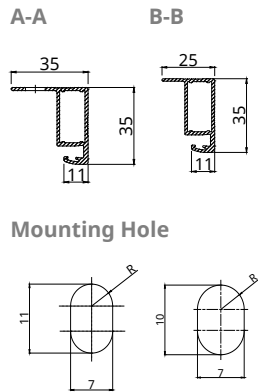
** For detailed information, please refer to the Installation Manual.

ENGINEERING DRAWING (mm)

Rear View

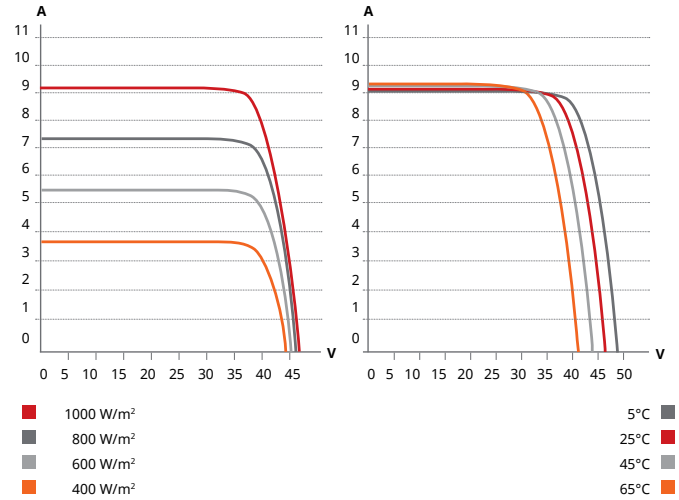


Frame Cross Section



Mounting Hole

CS6X-330P-PLUS / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS6X-330/335/340/345/350/355P-PLUS

	330 W	335 W	340 W	345 W	350 W	355 W
Nominal Max. Power (Pmax)	330 W	335 W	340 W	345 W	350 W	355 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	38.7 V	38.9 V	39.1 V	39.3 V	39.5 V	39.7 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.54 A	8.62 A	8.71 A	8.79 A	8.87 A	8.95 A
Open Circuit Voltage (Voc)	46.1 V	46.3 V	46.5 V	46.7 V	46.9 V	47.1 V
Short Circuit Current (Isc)	9.17 A	9.23 A	9.29 A	9.35 A	9.40 A	9.47 A
Module Efficiency	17.2%	17.5%	17.7%	18.0%	18.2%	18.5%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C					
Max. System Voltage	1000V (IEC/UL) or 1500V (IEC/UL)					
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 61730 1500V) or TYPE 2 (UL61730 1000V) or Class C (IEC 61730)					
Max. Series Fuse Rating	20 A					
Application Classification	Class A					
Power Tolerance	0 ~ + 10 W					

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS6X-330/335/340/345/350/355P-PLUS

	248 W	251 W	255 W	259 W	263 W	266 W
Nominal Max. Power (Pmax)	248 W	251 W	255 W	259 W	263 W	266 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	36.3 V	36.5 V	36.7 V	36.8 V	37.0 V	37.2 V
Opt. Operating Current (Imp)	6.82 A	6.89 A	6.96 A	7.02 A	7.09 A	7.16 A
Open Circuit Voltage (Voc)	43.6 V	43.8 V	44.0 V	44.1 V	44.3 V	44.5 V
Short Circuit Current (Isc)	7.40 A	7.45 A	7.49 A	7.54 A	7.58 A	7.64 A

* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m² spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Mono-crystalline
Cell Arrangement	136 [4 X (17 X 2)]
Dimensions	1954 X 982 X 35 mm (76.9 X 38.7 X 1.38 in)
Weight	21.0 kg (46.3 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68, 4 bypass diodes
Cable	4.0 mm ² (IEC), 12 AWG (UL)
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 400 mm (15.7 in) (+) / 280 mm (11.0 in) (-) (supply additional cable jumper: 2 lines/pallet); landscape: 1400 mm (55.1 in)*
Connector	T4 series or MC4-EVO2
Per Pallet	30 pieces
Per Container (40' HQ)	720 pieces

* For detailed information, please contact your local Canadian Solar sales and technical representatives.

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.34 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.26 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature	41 ± 3°C

PARTNER SECTION



* The specifications and key features contained in this datasheet may deviate slightly from our actual products due to the on-going innovation and product enhancement. CSI Solar Co., Ltd. reserves the right to make necessary adjustment to the information described herein at any time without further notice.

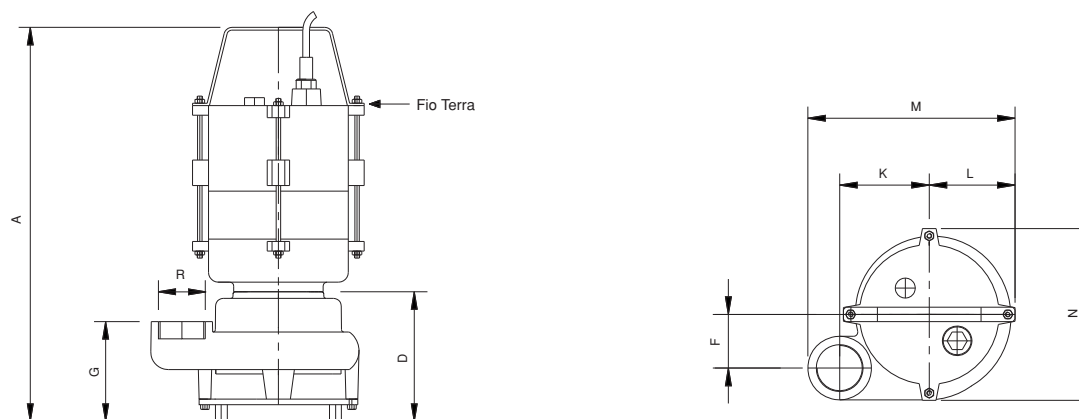
Please be kindly advised that PV modules should be handled and installed by qualified people who have professional skills and please carefully read the safety and installation instructions before using our PV modules.

CSI Solar Co., Ltd.

199 Lushan Road, SND, Suzhou, Jiangsu, China, 215129, www.csisolar.com, support@csisolar.com

ANEXO B

MOTOBOMBA

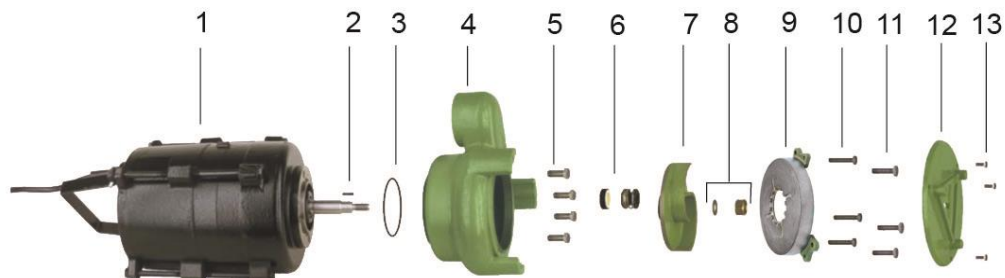


DIMENSÕES EM MILÍMETROS (mm) - 60 Hz

Descrição	BCS-220				BCS-320		
	1/2 cv		1 cv		2 cv	3 cv	4 cv
Potência							
Referência	Trifásico	Monofásico	Trifásico	Monofásico	Trifásico	Trifásico	Trifásico
A	489	488	489	488	489	489	532
D	161	161	161	161	161	165	165
F	67	67	67	67	67	84	84
G	124	124	124	124	124	147	147
K	112	112	112	112	112	145	145
L	107	107	107	107	107	134	134
M	259	259	259	259	259	330	330
N	205	205	205	205	205	265	265
R ("BSP)	2	2	2	2	2	3	3
Peso Motobomba (kg)	30,9	31,7	31,7	33,6	31,9	35,3	40,3

Obs.: – As informações poderão sofrer alterações sem prévio aviso, de acordo com a evolução tecnológica.
 – A utilização de motores diferentes do padrão de linha alteram as características de desempenho do conjunto.
 – Imagens de caráter ilustrativo.

BCS-220 / BCS-320



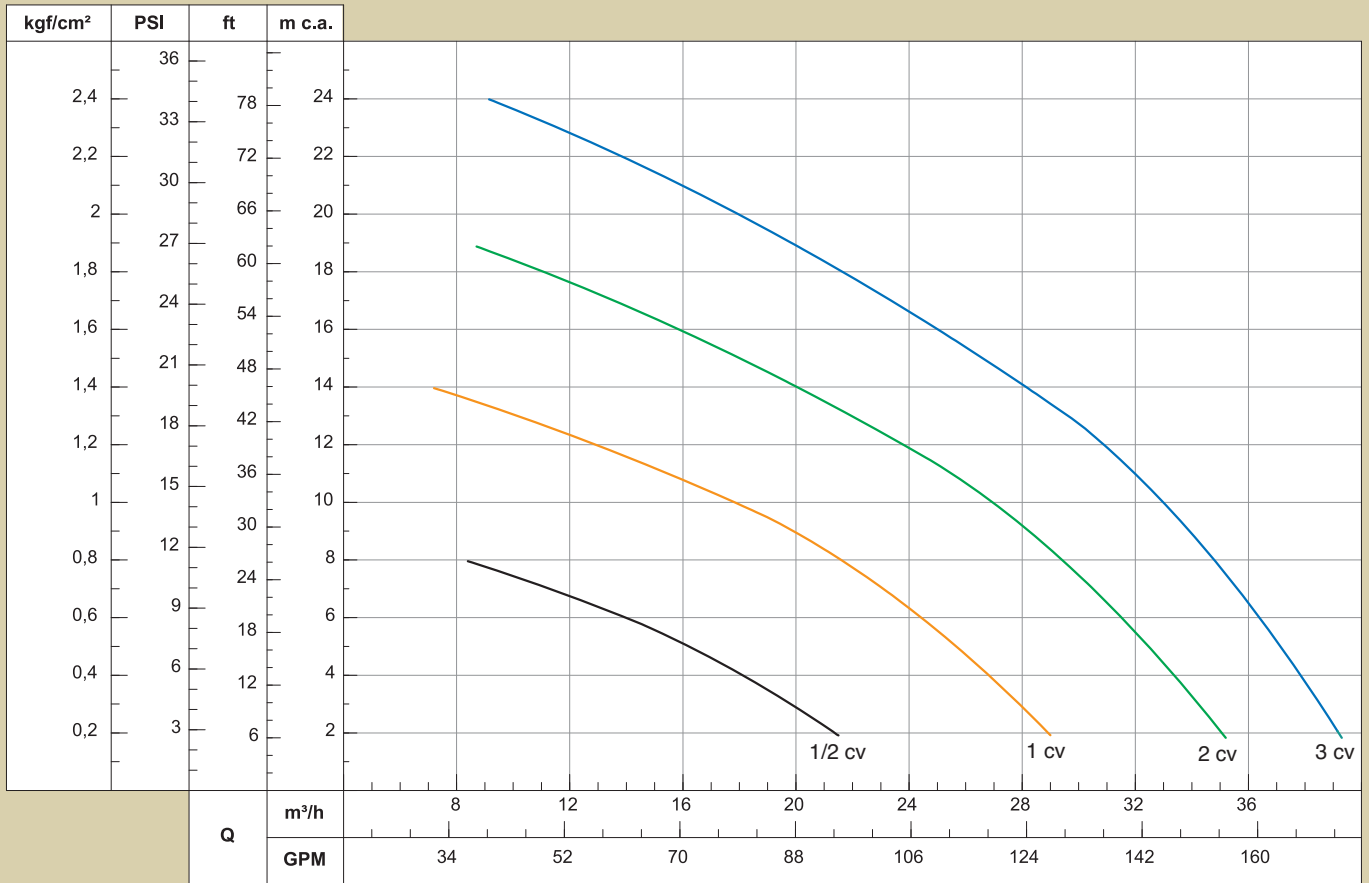
Item	Descrição	Composição do Kit	Quant. de peças utilizadas no produto	Quant. de peças contidas em cada caixa do kit	BCS-220				BCS-320			
					1/2 cv	1 cv	2 cv	3 cv	2 cv	3 cv	4 cv	
1	Motor elétrico IP-68, 2 Polos, 60 Hz	-	1	-								
2	Chaveta	-	1	-	8723027101A	8723027101A	8723027101A	8723027101A	8723027101A	8723027101A	8723027101A	
3	O-ring 2148	-	1	-	8720113106A	8720113106A	8720113106A	8720113106A	8720113106A	8720113106A	8720113106A	
4	Caracol BCS-220 Caracol BCS-320	- -	1 1	- -	8701220502A -	8701220502A -	8701220502A -	8701220502A -	- 8701221501A	- 8701221501A	- 8701221501A	
5	Kit paraf. S.NC. 3/8" x 1" INOX	-	4	5	8720133113A	8720133113A	8720133113A	8720133113A	8720133113A	8720133113A	8720133113A	
6	Selo mecânico 3/4" T21 BUNA	-	1	-	8720178101A	8720178101A	8720178101A	8720178101A	8720178101A	8720178101A	8720178101A	
7	Rotor FE BCS-220 2P 84X20	-	1	-	8701121151A	-	-	-	-	-	-	
	Rotor FE BCS-320 2P 109X20	-	1	-	-	-	-	-	8701343151A	-	-	
	Rotor FE BCS-220 2P 98X20	-	1	-	-	8701130151A	-	-	-	-	-	
	Rotor FE BCS-320 2P 127X20	-	1	-	-	-	-	-	-	8701120151A	-	
	Rotor FE BCS-220 2P 113X20	-	1	-	-	-	8701140151A	-	-	-	-	
	Rotor FE BCS-320 2P 137X20	-	1	-	-	-	-	-	-	-	8701139151A	
8	Kit fixação	Arruela lisa 7/16" INOX Porca NF. 7/16" LATÃO	1 1	1 1	8730504104A	8730504104A	8730504104A	8730504104A	8730504104A	8730504104A	8730504104A	
9	Placa de fundo	-	1	-	8701229501A	8701229501A	8701229501	8701229501A	8701230501A	8701230501A	8701230501A	
10	Kit paraf. S.NC. 1/4" x 1 1/4" INOX	-	3	3	8720133103A	8720133103A	8720133103A	8720133103A	8720133103A	8720133103A	8720133103A	
11	Kit paraf. S.NC.	-	3	3	8720133104A	8720133104A	8720133104A	8720133104A	8720133102A	8720133102A	8720133102A	
12	Placa de apoio	-	1	-	8701227501A	8701227501A	8701227501A	8701227501A	8701228501A	8701228501A	8701228501A	
13	Kit paraf. S.NC. 1/4" x 5/8" INOX	-	3	3	8720133107A	8720133107A	8720133107A	8720133107A	8720133107A	8720133107A	8720133107A	
Diâmetro do rotor (mm)					84	98	113	127	109	127	137	

Opções

6	Selo mecânico 3/4" T21 SIC-BUNA	-	1	-	8720178102A	8720178102A	8720178102A	8720178102A	-	-	-
---	---------------------------------	---	---	---	-------------	-------------	-------------	-------------	---	---	---

Sucção / Succión / Suction	-	Potência / Potencia / Power [kW(cv)]	0,37 (1/2)	0,75 (1)	1,5 (2)	2,2 (3)
Recalque / Descarga / Discharge	2"	Rotor / Impulsor / Impeller [mm]	84	98	113	127

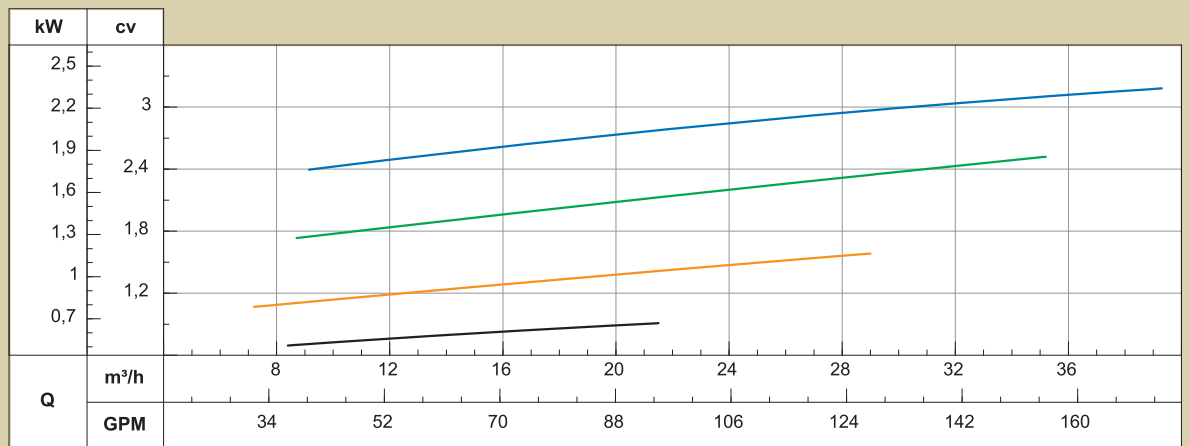
H



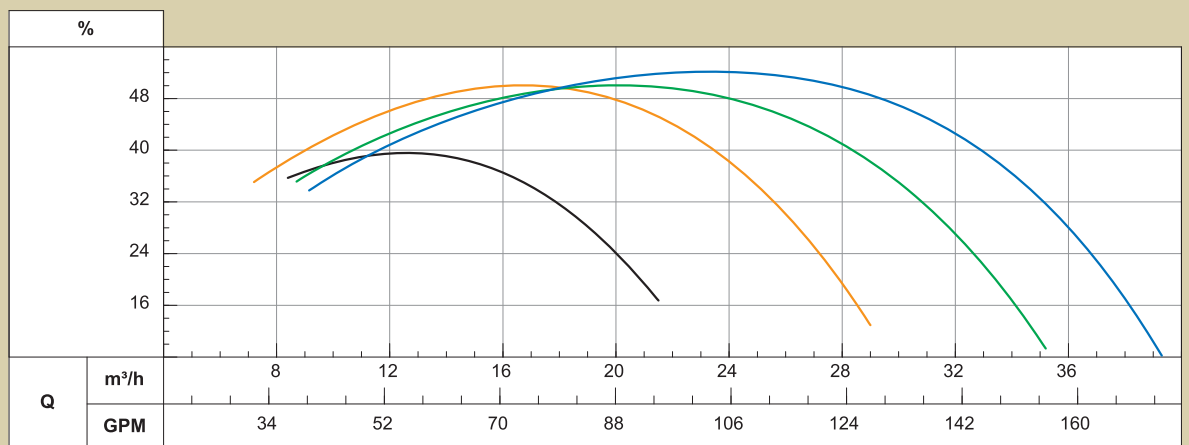
Submersíveis

G-5

POTÊNCIA EIXO
POTENCIA EJE
SHAFT POWER



RENDIMENTO BOMBA
EFICIENCIA BOMBA
PUMP EFFICIENCY



Obs.: - Curvas características conforme ISO 9906 anexo "A".
- Desempeño hidráulico de acuerdo a la ISO 9906 anexo "A".
- Hydraulic performance according to ISO 9906 annex-A.

ANEXO C

BOMBA SUBMERSIVEL Standard 1 cv 2P E56BS 3F 220/380 V 60 Hz IC410 - TENV - Sem pés

Produto: 11174624

Visão Geral ▾



Imagem meramente ilustrativa

Motor para aplicação em bombas submersíveis, cisternas, drenagem de águas residuais e pluviais, bombeamento de efluentes não fibrosos, indústrias, plantas de tratamento de águas residuais e limpeza de tanques de água.

Resumo das características técnicas

Norma	ABNT NBR 17094
Frequência	60 Hz
Tensão	220/380 V
Número de polos	2
Grau de proteção	IP68
Rotação síncrona	3600 rpm
Potência	1 cv
Fixação	Sem pés
Flange	Para bomba de combustível
Forma construtiva	V18
Caixa de ligação ¹	Sem caixa de ligação
Refrigeração	IC410 - TENV

DETALHES DO PRODUTO

Dados técnicos ▾

Motores Elétricos

Carcaça	E56BS
Potência	0.75 kW (1 HP-cv)
Número de polos	2

Frequência	60 Hz
Rotação nominal	3420 rpm
Escorregamento	5.00 %
Tensão nominal	220/380 V
Corrente nominal	4.50/2.61 A
Corrente de partida	20.3/11.7 A
Ip/In	4.5x(Cód. J)
Corrente a vazio	3.93/2.28 A
Conjugado nominal	0.214 kgfm
Conjugado de partida	229 %
Conjugado máximo	260 %
Tempo de rotor bloqueado	10s (frio) 6s (quente)
Momento de inércia (J)	0.0008 kgm ²
Categoria	N
Classe de isolamento	B
Fator de serviço	1.40
Elevação de temperatura	80 K
Regime de serviço	Cont.(S1)
Método de partida	Partida direta
Temperatura ambiente	-20°C a +40°C
Altitude	1000 m
Grau de proteção	IP68
Refrigeração	IC410 - TENV
Forma construtiva	V18
Sentido de rotação ¹	Anti-horário
Massa aproximada ³	22.9 kg

(1) Olhando a ponta de eixo dianteira do motor.; (3) Massa aproximada sujeito a alteração após fabricação.; (4) Em 100% da carga nominal.

Eficiência

50%	75%	100%
42.5	50.5	55.0

Fator de potência

50%	75%	100%
0.62	0.71	0.78

Demais características

Material da carcaça	Ferro fundido
Método de impregnação	Imersão poliéster
Material Eixo	Aço inox AISI 316
Pintura	Munsell N 1 - fosco 207N (ISO 12944 - C2)

Tipo de aterramento	Na carcaça	
Pintura Tropicalizada	Sem	  2  
Material do ventilador	Sem ventilador	
Fixação do Rolamento	Sem anel de fixação	
Forma de balanceamento	1/2 chaveta	
Chapéu	Sem	
Protetor fenólico de sobrecarga	Sem protetor	
Quantidade de Cabos de Ligação	6	

WEG S.A. - HEADQUARTERS

Av. Pref. Waldemar Grubba, 3000 - 89256-900 - Jaraguá do Sul - SC / Brasil

Telefone: +55 47 3276-4000

E-mail: info-br@weg.net



BOMBA SUBMERSIVEL Standard 1 cv 2P E56BS 3F 220/380 V 60 Hz IC410 - TENV - Sem pés

Produto: 11174624

Visão Geral



Imagem meramente ilustrativa

Motor para aplicação em bombas submersíveis, cisternas, drenagem de águas residuais e pluviais, bombeamento de efluentes não fibrosos, indústrias, plantas de tratamento de águas residuais e limpeza de tanques de água.

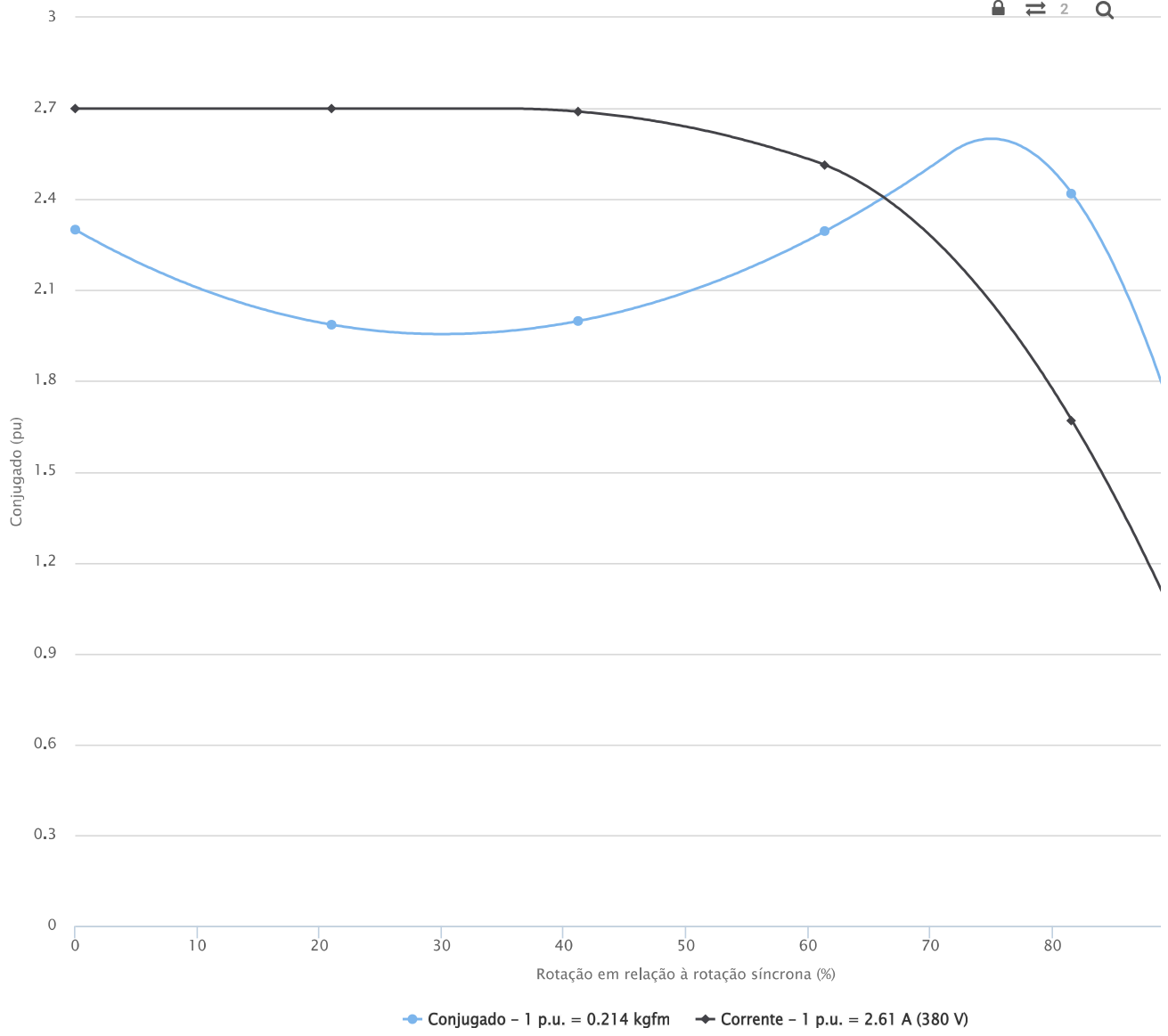
Resumo das características técnicas

Norma	ABNT NBR 17094
Frequência	60 Hz
Tensão	220/380 V
Número de polos	2
Grau de proteção	IP68
Rotação síncrona	3600 rpm
Potência	1 cv
Fixação	Sem pés
Flange	Para bomba de combustível
Forma construtiva	V18
Caixa de ligação ¹	Sem caixa de ligação
Refrigeração	IC410 - TENV

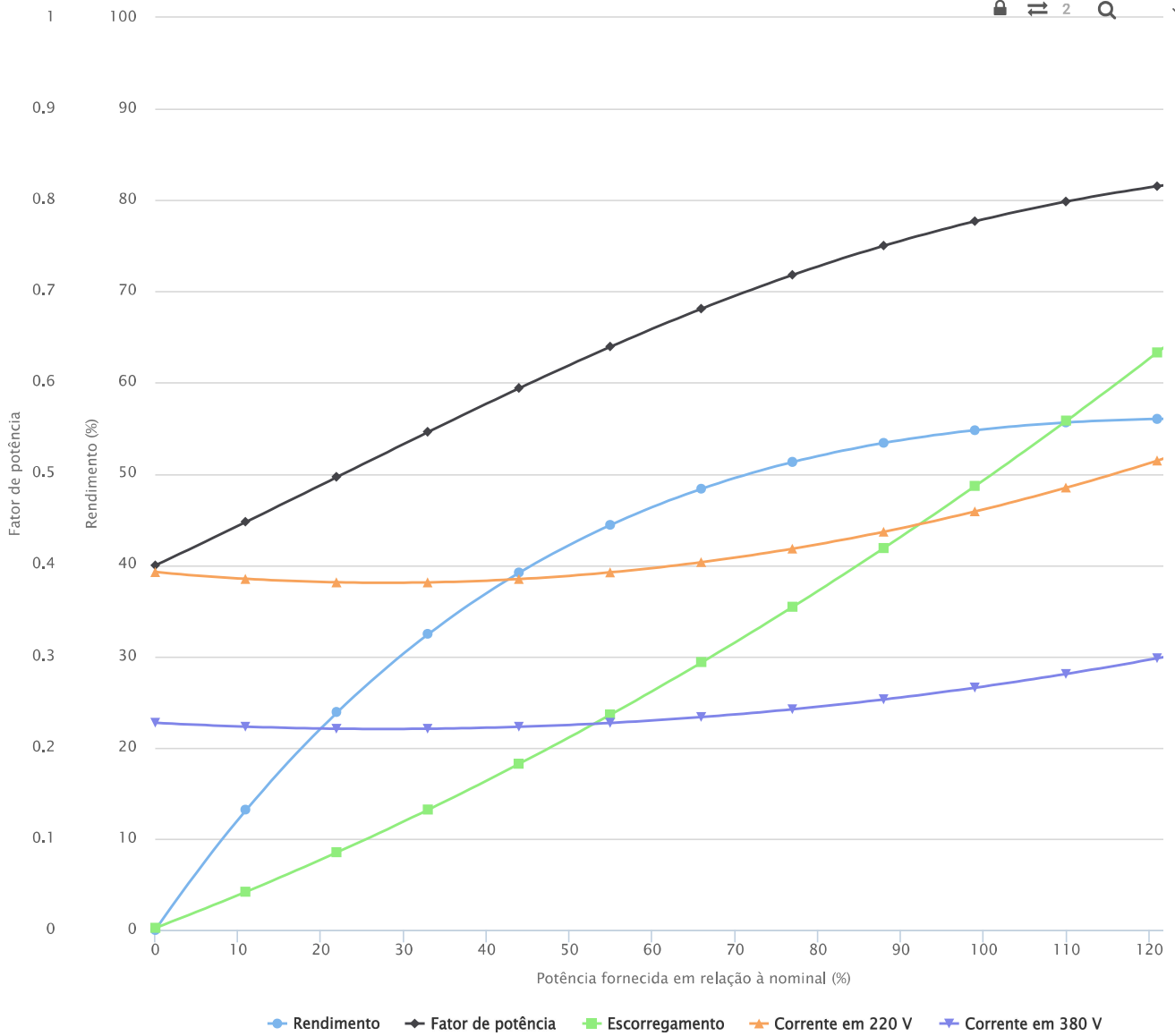
DETALHES DO PRODUTO

Curvas de performance

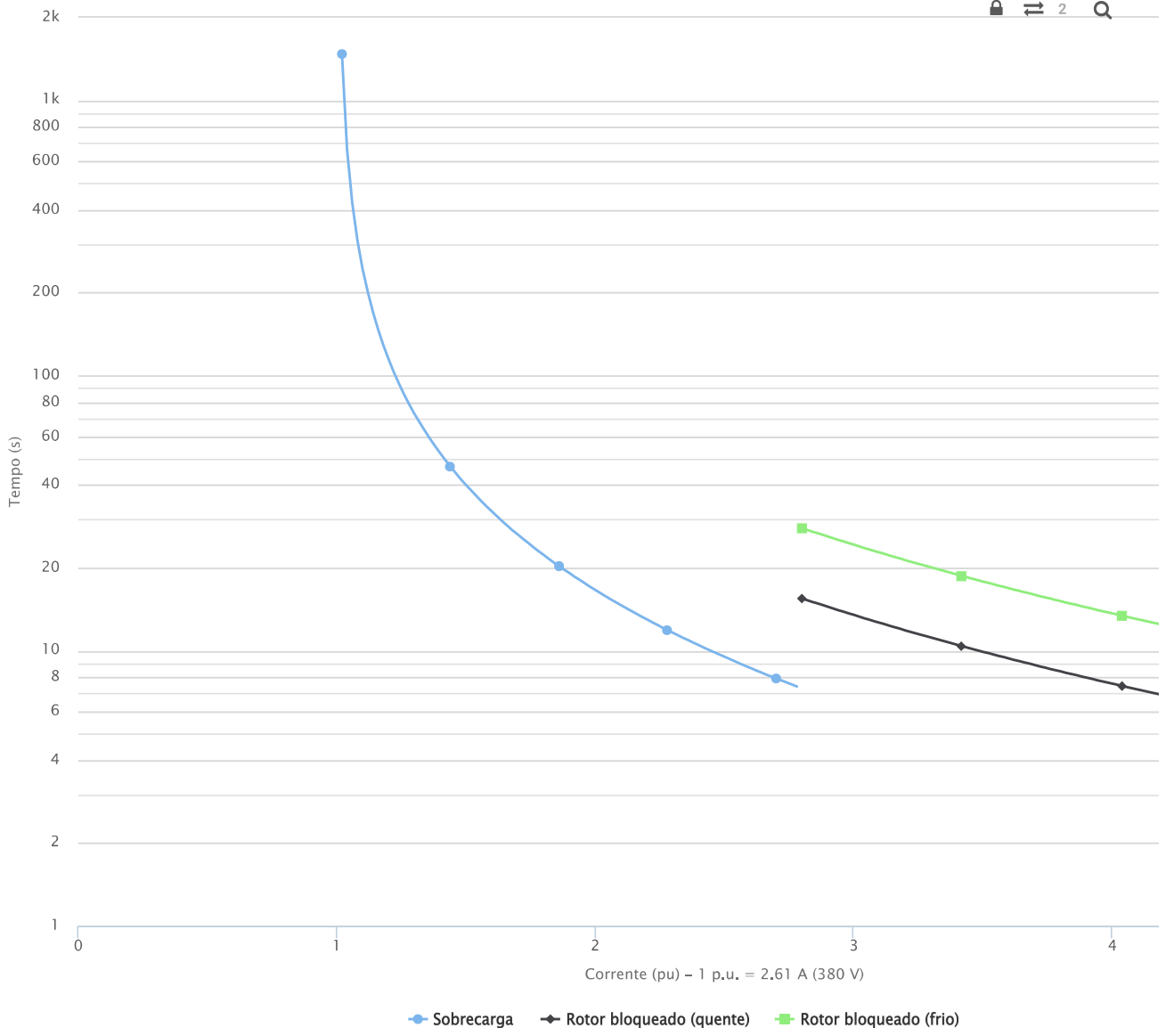
CURVA DE TORQUE E CORRENTE x ROTAÇÃO



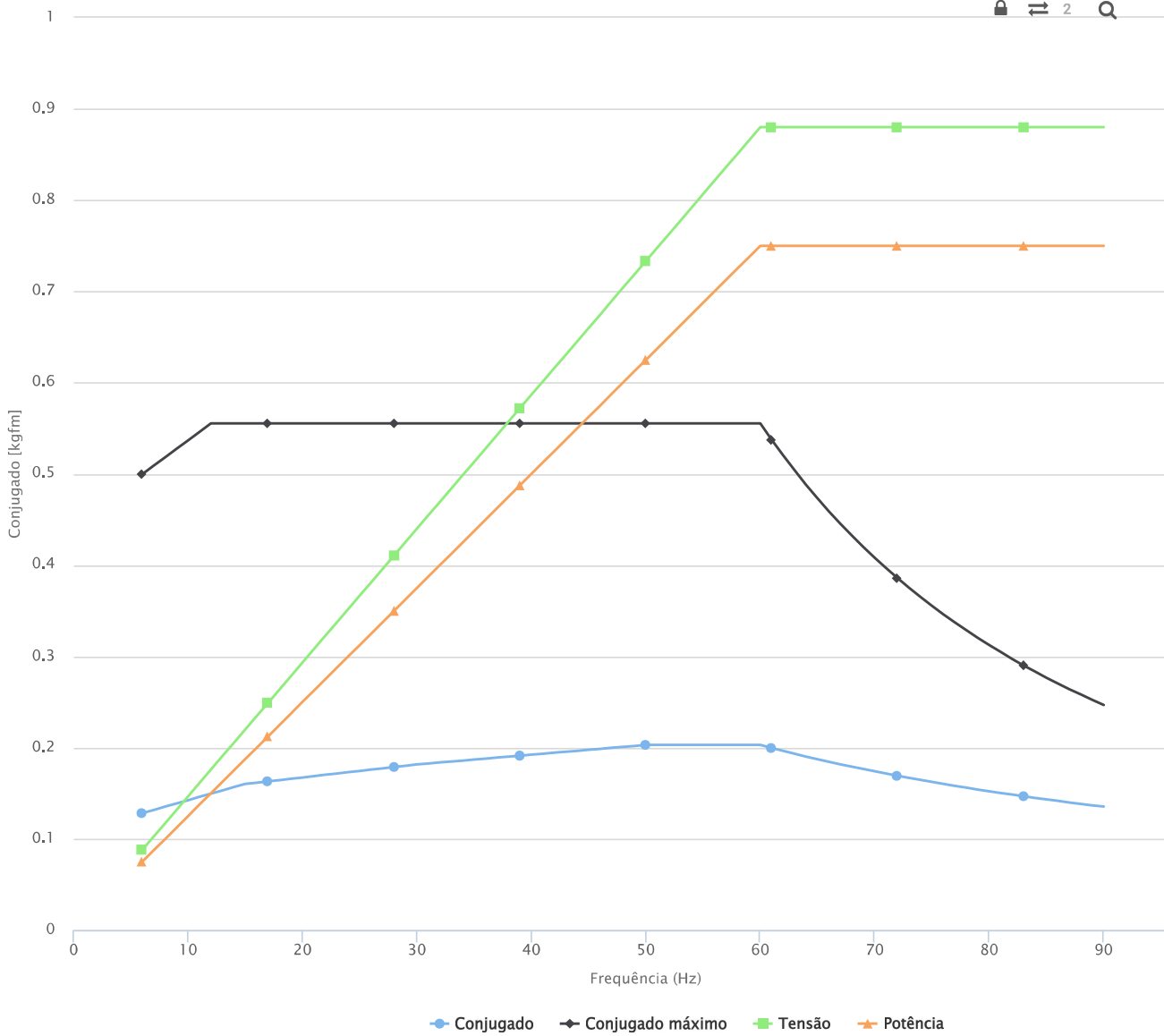
CURVA DE DESEMPENHO EM CARGA



CURVA DE LIMITE TÉRMICO



CURVA DE OPERAÇÃO COM INVERSOR



WEG S.A. - HEADQUARTERS

Av. Prof. Waldemar Grubba, 3000 - 89256-900 - Jaraguá do Sul - SC / Brasil

Telefone: +55 47 3276-4000

E-mail: info-br@weg.net



ANEXO D

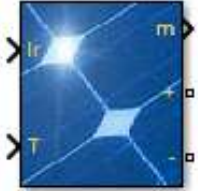
PV Array

Implement PV array modules.

Library

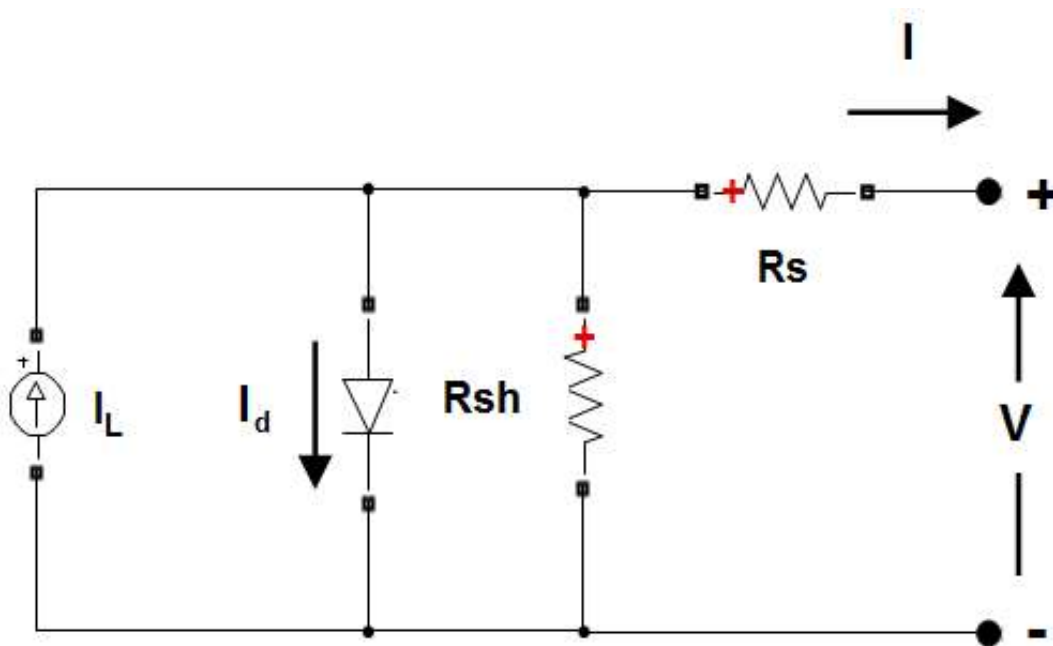
Renewables/Solar

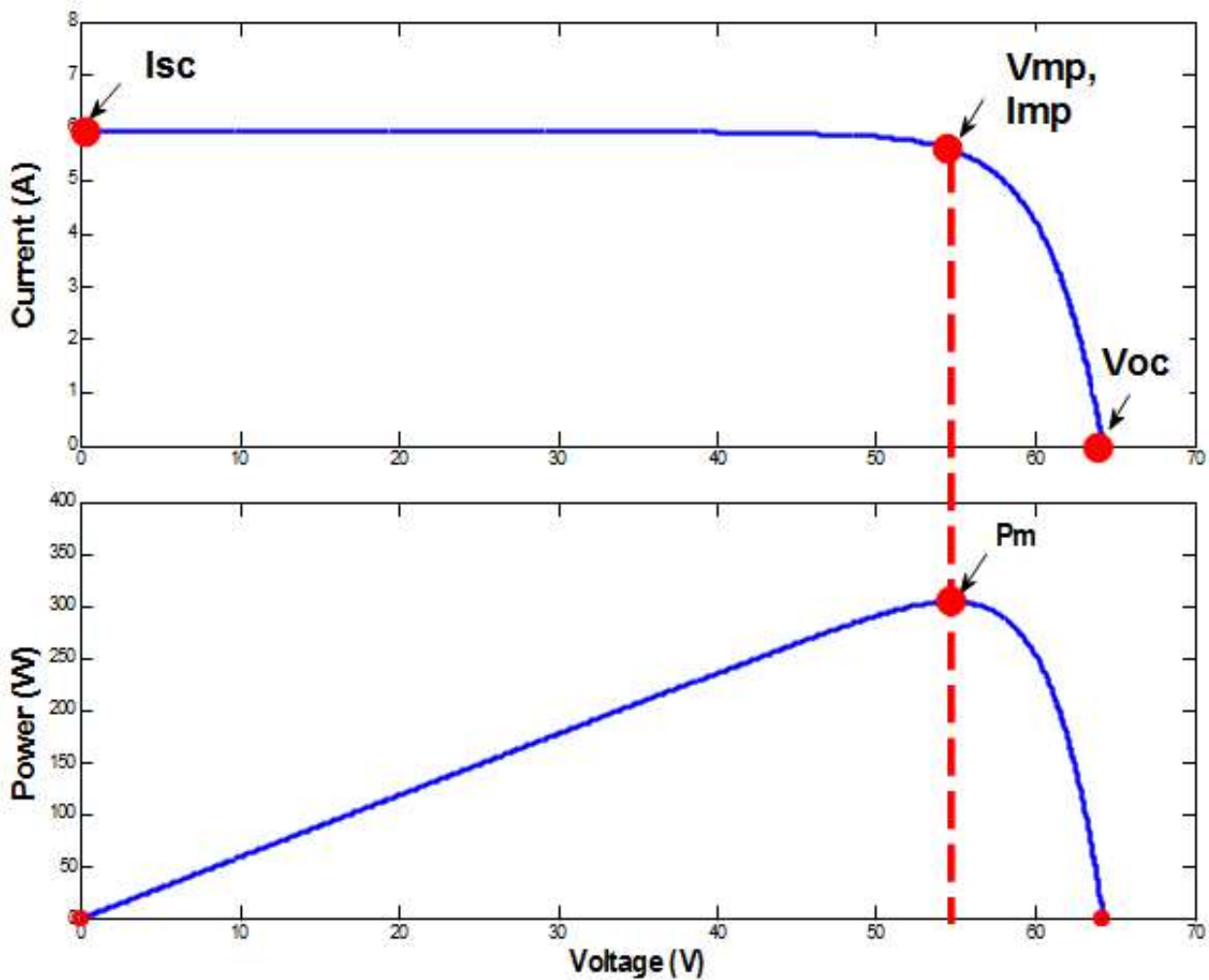
Description



The PV Array block implements an array of photovoltaic (PV) modules. The array is built of strings of modules connected in parallel, each string consisting of modules connected in series. This block allows you to model preset PV modules from the National Renewable Energy Laboratory (NREL) System Advisor Model (Jan. 2014) as well as PV modules that you define.

The PV Array block is a five parameter model using a current source I_L (light-generated current), diode (I_0 and n_1 parameters), series resistance R_s , and shunt resistance R_{sh} to represent the irradiance- and temperature-dependent I-V characteristics of the modules.





The diode I-V characteristics for a single module are defined by the equations

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right]$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \times nI \times N_{cell}$$

where:

- I_d = diode current (A)
- V_d = diode voltage (V)
- I_0 = diode saturation current (A)
- nI = diode ideality factor, a number close to 1.0
- k = Boltzman constant = 1.3806×10^{-23} J.K-1
- q = electron charge = 1.6022×10^{-19} C
- T = cell temperature (K)
- N_{cell} = number of cells connected in series in a module

Dialog Box and Parameters

Block Parameters: PV Array

PV array (mask)

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series. Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m², and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings
40

Series-connected modules per string
10

Module data

Module: 1Soltech 1STH-215-P

Maximum Power (W)	Cells per module (Ncell)
213.15	60
Open circuit voltage Voc (V)	Short-circuit current Isc (A)
36.3	7.84
Voltage at maximum power point Vmp (V)	Current at maximum power point Imp (A)
29	7.35
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)
-0.36099	0.102

Display I-V and P-V characteristics of ...
array @ 1000 W/m² & specified temperatures

T_cell (deg. C) [45 25]

Plot

Model parameters

Light-generated current IL (A)	7.8649
Diode saturation current I0 (A)	2.9259e-10
Diode ideality factor	0.98117
Shunt resistance Rsh (ohms)	313.3991
Series resistance Rs (ohms)	0.39383

OK Cancel Help Apply

- [Parameters](#)
- [Advanced](#)

Parameters

Parallel strings

Number of strings of series-connected modules that are connected in parallel. The default value is 40.

Series-connected modules per string

Number of PV modules connected in series in each string. The default value is 10.

Module

Select User-defined or a preset PV module from the NREL System Advisory Model database. Over 10,000 modules are listed from main manufacturers, sorted in alphabetical order. The NREL database includes manufacturer datasheets measured under standard test conditions (STC) (irradiance=1000 W/m², temperature=25 degrees C).

When you select a module, this data from the NREL database updates when you apply your changes: Ncell, Voc, Isc, Vmp, Imp maximum power, as well as temperature coefficients of Voc and Isc. The function computes the five corresponding model parameters (IL, I0, nI, Rsh, Rs) using an optimization function and displays them on the right side of the dialog box.

When you select User-defined, you can enter your own specifications for the module data (Ncell, Voc, Isc, Vmp, Imp, and temperature coefficients of Voc and Isc). When you apply the changes, the function computes the five model parameters.

The default value is 1Soltech 1STH-215-P.

Maximum Power (W)

Power obtained at maximum power point (V_{mp} , I_{mp}). P_{max} is computed as $P_{max} = V_{mp} \times I_{mp}$. The default value is 213.15 W.

Cells per module (Ncell)

Number of cells per module. The default value is 60.

Open circuit voltage Voc (V)

Voltage obtained when array terminals are left open. The default value is 36.3 V.

Short-circuit current Isc (A)

Current obtained when array terminals are short circuited. The default value is 7.84 A.

Voltage at maximum power point Vmp (V)

Voltage at maximum power point. The default value is 29 V.

Current at maximum power point Imp (A)

Current at maximum power point. The default value is 7.35 A.

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)

Defines variation of V_{oc} as a function of temperature. The open-circuit voltage at temperature T is obtained as

$$V_{ocT} = V_{oc} (1 + \beta_{V_{oc}}(T-25)),$$

where V_{oc} is the open-circuit voltage at 25 degrees C, V_{ocT} is the open-circuit voltage at temperature T (in degrees C), $\beta_{V_{oc}}$ is the temperature coefficient (in %/degrees C), and T is the temperature in degrees C.

The default value is -0.36099 %/deg.C.

Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)

Defines variation of I_{sc} as a function of temperature. The short-circuit current at temperature T is obtained as

$$I_{scT} = I_{sc} (1 + \alpha_{I_{sc}}(T-25)),$$

where I_{sc} is the short-circuit current at 25 degrees C, I_{scT} is the short-circuit current at temperature T (in degrees C), $\alpha_{I_{sc}}$ is the temperature coefficient (in %/degrees C) and T is the temperature in degrees C.

The default value is 0.102 %/deg.C.

Display I-V and P-V characteristics of...

To display the I-V and P-V characteristics of one module or of the whole array, for variable irradiance or for variable temperatures, select an option:

one module @ 25 deg. C & specified irradiances
array @ 25 deg. C & specified irradiances
array @ 1000 W/m ² & specified temperatures

The selected characteristics display when you click **Plot**.

The default value is array @ 1000 W/m² & specified temperatures.

Irradiances (W/m²)

This parameter is available only if **Display I-V and P-V characteristics of** is set to one module @ 25 deg.C & specified irradiances or array @ 25 deg. C & specified irradiances. Enter a vector of irradiances in W/m².

T_cell (deg. C)

This parameter is available only if **Display I-V and P-V characteristics of** is set to array @ 1000 W/m² & specified temperatures. Enter a vector of temperatures in degrees C. The default value is [45 25] deg. C.

Light-generated current IL (A)

Current for one module under STC, flowing out of the controllable current source that models the light-generated current. An optimization function determines this parameter to fit the module data. The default value is 7.8649 A.

Diode saturation current I_0 (A)

Saturation current of the diode modeling the PV array for one module under STC. An optimization function determines this parameter to fit the module data. The default value is $2.9259e-10$ A.

Diode ideality factor

Ideality factor of the diode modeling the PV array. An optimization function determines this parameter to fit the module data. The default value is 0.98117.

Shunt resistance R_{sh} (ohms)

Shunt resistance of the model for one module under STC. An optimization function determines this parameter to fit the module data. The default value is 313.3991 Ω .

Series resistance R_s (ohms)

Series resistance of the model for one module under STC. An optimization function determines this parameter to fit the module data. The default value is 0.39383 Ω .

Advanced

Break algebraic loop in internal model

By default this parameter is not selected. You then get an algebraic loop in the internal diode model, both in a continuous model or in a discrete model. If you use the block in a discrete system using large sample times, this algebraic loop is required to get an iterative, accurate solution for the highly nonlinear diode characteristics. For example, the PV array connected to an average model of power electronic converter runs with a sample time as large as $50e-6$ sec, and Simulink[®] can solve the algebraic loop.

When the PV array block is connected to a detailed power electronic converter where real switches are simulated, you need to specify a small sample time to get accurate resolution in PWM pulse generation (for example, $1e-6$ sec with a 5 kHz PWM inverter). In this case, to speed up simulation, select this parameter to break the algebraic loop.

When the model is discrete, break the algebraic loop by using a one-simulation-step time delay. This approach can cause numerical oscillations if the sample time is too large.

When the model is continuous, break the algebraic loop by using a first-order filter. The **Time constant (s)** parameter then becomes visible.

When the model uses an algebraic loop (i.e., the parameter is not selected), current and voltage measurement filters are used inside the continuous and the discrete model to help solve the algebraic loop. The **Measurement Filter Time constant (s)** parameter then becomes visible.

Time constant (s)

The filter time constant is visible in a continuous model only when **Break algebraic loop in internal model** is selected. The default value is $1e-6$ sec.

Measurement Filter Time constant (s)

The measurement filter time constant is visible in both discrete and continuous model when **Break algebraic loop in internal model** is not selected. The default value is $5e-5$ sec.

Inputs and Outputs

I_r

Connect to this input a Simulink signal representing varying sun irradiance in W/m².

T

Connect to this input a Simulink signal representing varying cell temperature in degrees C.

m

Simulink output vector containing five signals. You can select these signals using the Bus Selector block in the

Simulink library.

Signal	Signal Name	Definition
1	V_PV	PV array voltage (V)
2	I_PV	PV array current (A)
3	I_diode	diode current (A)
4	Irradiance (W/m2)	Irradiance (W/m2)
5	Temperature (deg C)	Temperature (degrees C)

Related Examples

- [250-kW Grid-Connected PV Array](#)
- [400-kW Grid-Connected PV Farm \(Average Model\)](#)
- [Partial Shading of a PV Module](#)
- [Single-Phase, 240 Vrms, 3500 W Transformerless Grid-Connected PV Array](#)

Introduced in R2015a

ANEXO E

Lookup Table Dynamic

Approximate one-dimensional function using dynamic table

Library

Lookup Tables

Description



How This Block Differs from Other Lookup Table Blocks

The Lookup Table Dynamic block computes an approximation of a function $y = f(x)$ using `xdat` and `ydat` vectors. The lookup method can use interpolation, extrapolation, or the original values of the input.

Using the Lookup Table Dynamic block, you can change the table data without stopping the simulation. For example, you can incorporate new table data if the physical system you are simulating changes.

Inputs for Breakpoint and Table Data

The `xdat` vector is the breakpoint data, which must be *strictly monotonically increasing*. The value of the next element in the vector must be greater than the value of the preceding element after conversion to a fixed-point data type. Due to quantization, `xdat` can be strictly monotonic for a floating-point data type, but not after conversion to a fixed-point data type.

The `ydat` vector is the table data, which is an evaluation of the function at the breakpoint values.

Note: The inputs to `xdat` and `ydat` cannot be scalar (one-element array) values. If you provide a scalar value to either of these inputs, you see an error upon simulation. Provide a 1-by- n vector to both the `xdat` and `ydat` inputs.

Lookup Table Definition

You define the lookup table by feeding `xdat` and `ydat` as 1-by- n vectors to the block. To reduce ROM usage in the generated code for this block, you can use different data types for `xdat` and `ydat`. However, these restrictions apply:

- The `xdat` breakpoint data and the `x` input vector must have the same sign, bias, and fractional slope. Also, the precision and range for `x` must be greater than or equal to the precision and range for `xdat`.
- The `ydat` table data and the `y` output vector must have the same sign, bias, and fractional slope.

Tip Breakpoints with even spacing can make Simulink® Coder™ generated code division-free. For more information, see [fixpt_evenspace_cleanup](#) in the Simulink documentation and [Identify questionable fixed-point operations](#) in the Simulink Coder documentation.

How the Block Generates Output

The block uses the input values to generate output using the method you select for **Lookup Method**:

Lookup Method	Block Action
Interpolation-Extrapolation	<p>Performs linear interpolation and extrapolation of the inputs.</p> <ul style="list-style-type: none">• If the input matches a breakpoint, the output is the corresponding element in the table data.• If the input does not match a breakpoint, the block performs

	<p>If the input does not match a breakpoint, the block performs linear interpolation between two elements of the table to determine the output. If the input falls outside the range of breakpoint values, the block extrapolates using the first two or last two points.</p> <p>Note: If you select this lookup method, Simulink Coder software cannot generate code for this block.</p>
Interpolation-Use End Values (default)	Performs linear interpolation but does not extrapolate outside the end points of the breakpoint data. Instead, the block uses the end values.
Use Input Nearest	Finds the element in xdat nearest the current input. The corresponding element in ydat is the output.
Use Input Below	Finds the element in xdat nearest and below the current input. The corresponding element in ydat is the output. If there is no element in xdat below the current input, the block finds the nearest element.
Use Input Above	Finds the element in xdat nearest and above the current input. The corresponding element in ydat is the output. If there is no element in xdat above the current input, the block finds the nearest element.

Note The Use Input Nearest, Use Input Below, and Use Input Above methods perform the same action when the input x matches a breakpoint value.

Some continuous solvers subdivide the simulation time span into major and minor time steps. A minor time step is a subdivision of the major time step. The solver produces a result at each major time step and uses results at minor time steps to improve the accuracy of the result at the major time step. For continuous solvers, the output of the Lookup Table Dynamic block can appear like a stair step because the signal is fixed in minor time step to avoid incorrect results. For more information about the effect of solvers on block output, see [Solvers](#) in the Simulink documentation.

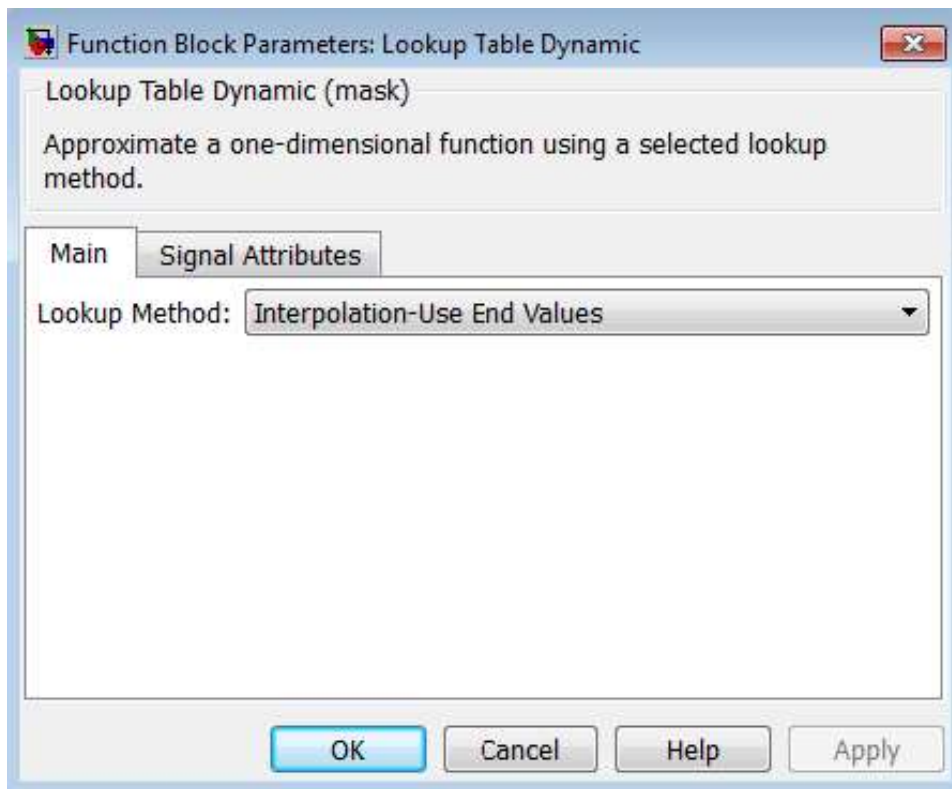
Data Type Support

The Lookup Table Dynamic block accepts signals of the following data types:

- Floating point
- Built-in integer
- Fixed point
- Boolean

For more information, see [Data Types Supported by Simulink](#) in the Simulink documentation.

Parameters and Dialog Box



- [Main tab](#)
- [Signal Attributes tab](#)

Main tab

Lookup Method


Specify the lookup method. For details, see [How the Block Generates Output](#).

Signal Attributes tab

Output data type

Specify the output data type. You can set it to:

- A rule that inherits a data type, for example, `Inherit: Inherit via back propagation`
- The name of a built-in data type, for example, `single`
- The name of a data type object, for example, a `Simulink.NumericType` object
- An expression that evaluates to a data type, for example, `fixdt('double')`

Click the **Show data type assistant** button  to display the **Data Type Assistant**, which helps you set the **Output data type** parameter.

See [Control Signal Data Types](#) for more information.

Lock output data type setting against changes by the fixed-point tools

Select to lock the output data type setting of this block against changes by the Fixed-Point Tool and the Fixed-Point Advisor. For more information, see [Use Lock Output Data Type Setting](#).

Integer rounding mode

Specify the rounding mode for fixed-point operations. For more information, see [Rounding](#) in the Fixed-Point Designer™ documentation.

Saturate to max or min when overflows occur

Select to have overflows saturate to the maximum or minimum value that the data type can represent. Otherwise, overflows wrap.

When you select this check box, saturation applies to every internal operation on the block, not just the output or result. In general, the code generation process can detect when overflow is not possible. In this case, the code generator does not produce saturation code.

Examples

For an example of...	See...
Breakpoint and table data entry	Entering Data Using Inports of the Lookup Table Dynamic Block
Block output for different lookup methods	Example Output for Lookup Methods

Characteristics

Data Types	Double Single Boolean Base Integer Fixed-Point
Direct Feedthrough	Yes
Multidimensional Signals	Yes
Variable-Size Signals	No
Zero-Crossing Detection	No
Code Generation	Yes

See Also

[n-D Lookup Table](#)

Introduced before R2006a