

DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE APLICADOS A EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS E COMERCIAIS: URBANAS E RURAIS**ALCIDES ARRUDA JUNIOR¹, OZLEAN DE LIMA DANTAS², ROBERTO APOLONIO²**

¹Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, Faculdade de Agronomia e Zootecnia – FAAZ, Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical – PPGAT, Av. Fernando Corrêa da Costa, n°2367, Bairro: Boa Esperança - Cuiabá - MT, Brasil, CEP: 78060900, E-mail: juninhox5@gmail.com.

²Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, Faculdade de Engenharia e Tecnologia – FAET, Departamento de Engenharia Elétrica - DENE, Endereço: Av. Fernando Corrêa da Costa, n° 2367. Bairro Boa Esperança - Cuiabá – Mato Grosso, Brasil, CEP: 78060-900, E-mail: Ozlean.dantas@gmail.com, r_apol@hotmail.com.

RESUMO: O objetivo deste trabalho é apresentar uma nova proposta de metodologia para o dimensionamento de sistema Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR), cujo passo a passo foi definido por meio de uma análise sistemática de literaturas nacionais e internacionais, sobre a temática de dimensionamento de SFVCR. Como síntese desta análise extraiu-se as principais informações, critérios, considerações técnicas e equacionamentos, que não estavam disponíveis de forma sintética, nem organizados de forma sequencial, lógica e didática. Acredita-se que as principais contribuições deste trabalho são: uma nova metodologia detalhada, passo a passo com critérios para ajustamento ótimo entre o gerador fotovoltaico (GFV) e o inversor (IFV), visando uma operação segura, dentro dos padrões nominais dos equipamentos, sem comprometer suas vidas úteis; e ainda a proposta de uma nova equação para o cálculo da potência máxima de saída do sistema aperfeiçoada com os mais diversos fatores de perdas concatenados em uma única expressão matemática. Conclui-se que a metodologia apresentada neste artigo poderá contribuir para sanar muitas das dúvidas existentes quanto ao tema do dimensionamento de SFVCR, especialmente no que se refere ao ajustamento entre o GFV e o IFV, e auxiliar estudos de viabilidade técnica para previsão e pré-dimensionamento de SFVCR para aplicação em edificações residenciais e comerciais, sejam elas urbanas ou rurais.

Palavras-Chave: energia, sustentabilidade, tecnologias renováveis.

SIZING OF GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS APPLIED TO RESIDENTIAL AND COMMERCIAL BUILDINGS: URBAN AND RURAL.

ABSTRACT: this work aims to present a new methodology proposal for the dimensioning of grid connected photovoltaic systems (GCPVS), whose step by step was defined by means of a systematic analysis of national and international literature, on the theme of dimensioning of GCPVS. As a synthesis of this analysis, the main information, criteria, technical considerations and equations were extracted, which were not available in a synthetic form, nor were they organized in a sequential, logical and didactic way. The main contributions of this work are: a new detailed methodology, step by step with criteria for optimal adjustment between the photovoltaic generators (PVG) and the inverter (PVI), aiming at a safe operation, within the nominal standards of the equipment, without compromising their useful lives; and the proposal of a new equation for calculating the maximum output power of the system perfected with the most diverse loss factors concatenated in a single mathematical expression. It is concluded that the methodology presented in this article can help resolve many of the existing doubts regarding the issue of SFVCR dimensioning, especially regarding the adjustment between the GFV and the IFV, and auxiliary technical feasibility studies for forecasting and pre- SFVCR dimensioning for application in residential and commercial buildings, whether urban or rural.

Keywords: energy, sustainability, renewable technologies.

1 INTRODUÇÃO

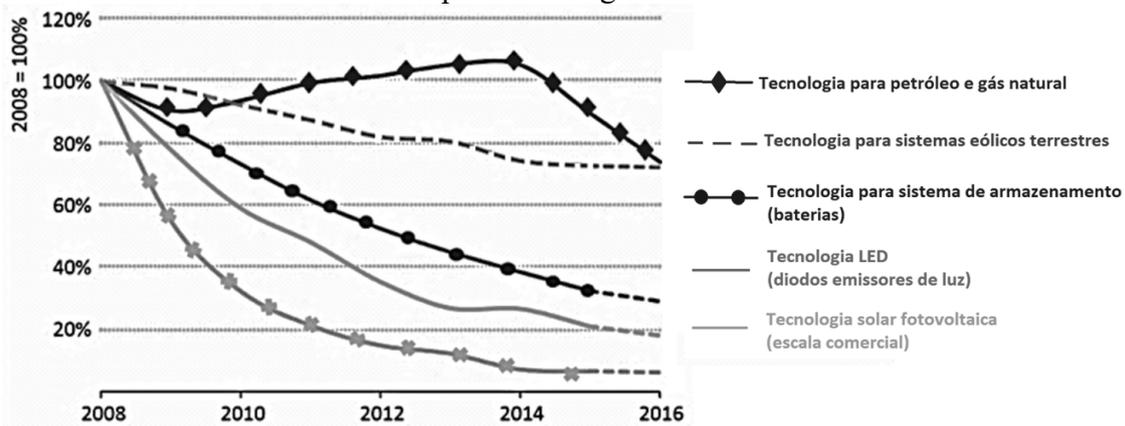
O setor da energia solar fotovoltaica (ESFV), a nível mundial, vem crescendo exponencialmente a cada ano, e segundo a Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (2017), a capacidade instalada mundial em 2006 era de apenas 6 GW, em 2016 já estava em 303 GW. Com relação à geração de energia, a International Energy Agency (2017) revelou que em 2005 a geração fotovoltaica atingiu a marca de 4TWh, já em 2015 chegou a 247 TWh.

Esse crescimento do setor não ocorreu apenas em virtude das pressões internacionais com relação as questões ambientais ou à

temática dos combustíveis fósseis, mas também, a redução dos preços dos materiais e equipamentos para aplicação deste tipo de tecnologia, Figura 1.

Segundo a International Energy Agency (2016), isso foi impulsionado principalmente pela ascensão da indústria fotovoltaica chinesa. A Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (2017) afirmou que a China possui a maior potência instalada e também foi a nação que mais investiu na adição desse tipo de sistema a nível mundial, em 2016, liderando o mercado mundial como a maior produtora de módulos fotovoltaicos (MFV) e tecnologias para sistemas fotovoltaicos (SFV).

Figura 1. Tendências recentes de custo para tecnologias selecionadas



Fonte: adaptado de IEA (2016)

Segundo a Energy Information Administration (2018) pelas tendências atuais, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR), aplicados em edificações residenciais e comerciais, possuem uma perspectiva promissora de crescimento, cuja estimativas apontam para uma tendência de ascensão exponencial das aplicações deste tipo de sistemas em edificações em todo mundo.

Segundo a Empresa de Pesquisas Energéticas (2014), no Brasil os SFVCR estão incluídos em uma categoria de geração de energia conhecida como geração distribuída (GD), que é definida como sendo pequenas centrais geradoras descentralizadas distribuídas próximas à centros de consumo de Energia Elétrica.

Essas centrais recebem uma classificação em função de sua potência

instalada como: micro geração até 75kW; mini geração de 75kW à 5MW, e usinas acima de 5MW, segundo as resoluções normativas da Agência Nacional de Energia Elétrica (2012, 2015, 2017, 2018a).

A GD no Brasil vem aumentando a cada ano e a participação dos SFVCR têm crescido vertiginosamente, dos 7.123 empreendimentos de usinas para geração de energia elétrica em operação no país, 2.252 são por centrais geradoras solar fotovoltaicas, definidas como usinas fotovoltaicas (UFV) totalizando cerca de 1,3 GW de potência instalada conforme informado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (2018a).

A quantidade de unidades consumidoras que contam com sistema de micro e mini geração distribuída do tipo UFV, também apresentou grande aumento, e já somam um

total de 37.110 usinas por todo o país, totalizando cerca de 354.975kW de potência Instalada distribuídos principalmente entre consumidores das classes residencial e

comercial (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018b). A aplicação da ESFV em edificações possui diversas vantagens, conforme destacados na Tabela 1:

Tabela 1. Principais vantagens do uso da ESFV em edificações

PARA O CONSUMIDOR
a) Geração limpa e renovável de Energia Elétrica;
b) Maior economia com contas de energia, com a possibilidade da injeção da energia elétrica, gerada em excedente, no sistema elétrico gerando créditos de energia que podem ser posteriormente compensados na própria Unidade Consumidora - UC ou em outra UC previamente cadastrada;
c) Flexibilidade, versatilidade e adaptabilidade à arquitetura de qualquer edificação para instalação e expansão em zonas rurais ou grandes centros urbanos;
d) Imunidade às flutuações dos preços da energia e redução da dependência da rede;
PARA O SISTEMA ELÉTRICO
a) Descentralização da produção de energia com maior proximidade aos centros de consumo e alívio das linhas de transmissão e dos sistemas de distribuição;
b) Redução na demanda de investimentos em linhas de distribuição e novas usinas baseadas em fontes convencionais (não renováveis);
c) Contribuição para geração e ampliação da disponibilidade de Energia Elétrica em nível nacional com maior regularidade no fornecimento de Energia Elétrica do que a energia eólica;
PARA O MEIO AMBIENTE
a) Fonte segura e silenciosa;
b) Economia de recursos não renováveis;

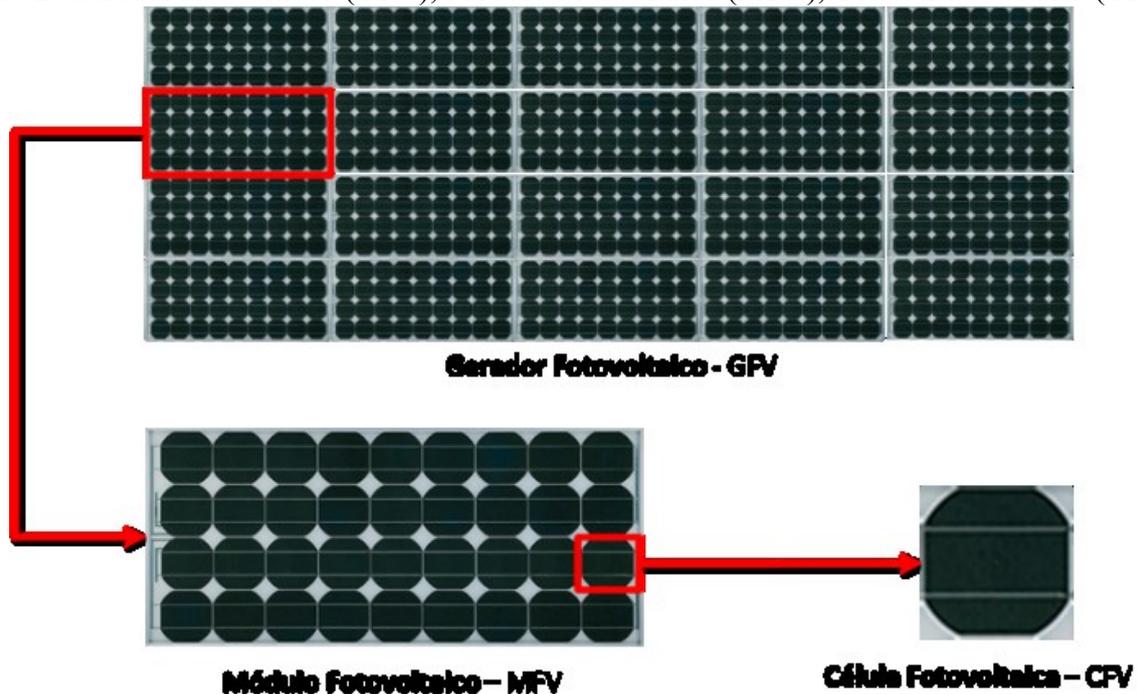
Fonte: adaptado de Villalva e Gazoli (2012), REN21(2017) e EIA (2018)

Diante das perspectivas de crescimento do setor da ESFV, da redução de preços das tecnologias; dos benefícios e vantagens para o consumidor, para o meio ambiente e para o próprio setor elétrico nacional, contribuindo para um desenvolvimento mais sustentável e a geração de energia elétrica de forma limpa e renovável, abre-se uma janela de oportunidades para robustecer o sistema elétrico nacional com a ESFV, preservar o meio ambiente e trazer economia para o bolso dos consumidores, principalmente no caso brasileiro em que as altas taxas tributárias elevam muito o preço da energia elétrica. Diante do cenário apresentado acredita-se que seja de suma importância que arquitetos e engenheiros façam previsão da incorporação deste tipo de tecnologia para geração de energia elétrica nas edificações desde a concepção do projeto arquitetônico, e este trabalho vem de encontro a essa necessidade pois tem como objetivo servir de guia rápido e sintético para orientar estes

profissionais quanto aos procedimentos básicos iniciais para projetar, dimensionar e estimar a produção média de energia de um SFVCR.

A energia solar fotovoltaica (ESFV), é a energia obtida da transformação direta da radiação solar em energia elétrica por processos fotovoltaicos. O efeito fotovoltaico é o fenômeno pelo qual é possível converter a energia luminosa em energia elétrica, de forma direta, por meio da célula fotovoltaica (CFV). Este efeito foi descoberto em 1887 pelo físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) e explicado em 1905 por Albert Einstein (1879-1955) (PEREIRA; OLIVEIRA, 2011).

A CFV, é o principal elemento do SFV pois, é responsável pela conversão da energia solar em energia elétrica, o conjunto de CFV's constituem o módulo fotovoltaico (MFV), e o conjunto destes dispositivos, constituem um gerador fotovoltaico (GFV), conforme ilustrado na Figura 2 (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 2. Gerador fotovoltaico (GFV), Módulo Fotovoltaico (MFV), Célula Fotovoltaica (CFV).

Fonte: Adaptado de Canadian Solar Inc. (2016)

Os parâmetros elétricos do MFV, constantes na folha de dados do equipamento (*datasheet*), são obtidos por ensaios de laboratório em condições específicas de teste. Existem duas condições típicas padrão para testes, a primeira é designada como *Standards Test Conditions (STC)* (condição padrão de teste), e a segunda é designada como *Nominal*

Operating Cell Temperature (NOCT) (temperatura nominal de operação da célula) são padrões internacionais estabelecidos, para avaliação do desempenho de um MFV, cujos parâmetros estão resumidos na Tabela 2. (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2005b)

Tabela 2. Condição padrão de teste e Temperatura nominal de operação da célula

Condição padrão de teste (STC)	
Massa de ar (A_M)	1,5AM
Temperatura da célula (T_{CSTC})	25°C
Irradiância solar (H_{REF})	1000W/m ² .
Temperatura nominal de operação da célula (NOCT)	
Massa de ar (A_M)	1,5AM
Irradiância solar (H_{NOCT})	800W/m ²
Temperatura ambiente (T_{ANNOCT})	20°C
Velocidade do vento (VEL_{NOCT})	1m/s

Fonte: Adaptado de International Electrotechnical Commission (2005b)

Os parâmetros elétricos mais importantes de um MFV para utilização no dimensionamento de SFV são apresentados na Tabela 3.

Os inversores para sistemas fotovoltaicos – IFV, são elementos essenciais de um SFV pois, são dispositivos responsáveis pela conversão de tensão e corrente contínua

(CC) fornecida pelo GFV para tensão e corrente alternada (CA) em níveis adequados para alimentação de cargas que operam em CA. (MACÊDO, 2006).

Segundo Mertens (2014), o IFV para SFVCR é o coração deste tipo de sistema pois, é responsável pela conversão CC/CA, sincronização e injeção da energia elétrica

gerada pelo GFV na rede de distribuição de energia elétrica (RDEE). Os parâmetros elétricos mais importantes de um IFV para utilização no dimensionamento de um SFV são apresentados na Tabela 4

Segundo Kalogirou (2014) são sistemas que possuem uma interação com a RDEE por isso, também são classificados como *on-grid* (na rede), a conexão com a RDEE se dá por meio de um IFV para SFVCR. Este tipo de sistema não necessita de controladores de carga nem de baterias, pois quando em operação,

durante o período de insolação, absorve radiação solar gerando energia elétrica e injetando na rede o excedente não consumido.

No período em que não há insolação, a geração do sistema cessa e a energia elétrica necessária ao suprimento do consumo da edificação passa a ser absorvida RDEE da concessionária, conforme ilustrado na Figura 3. Os SFVCR são constituídos basicamente por: MFV; IFV; Quadros elétricos e dispositivos de proteção; medidor ou medidores de energia e acessórios (cabos, conectores e outros).

Tabela 3. Principais parâmetros elétricos de um MFV

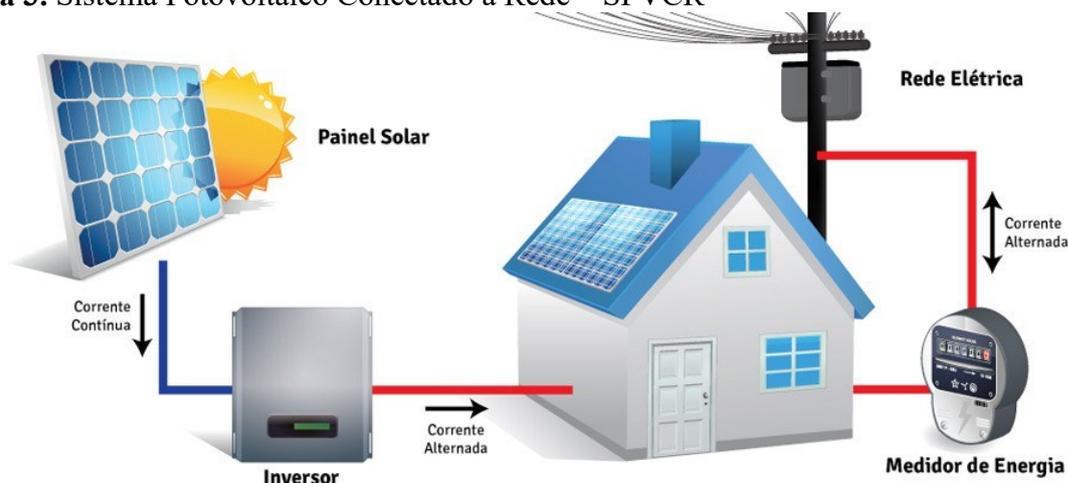
Parâmetros	Descrição
Tensão máxima do Sistema (V_{SFV}):	É a tensão máxima a qual os MFV podem ser submetidos, quando conectados em série, sem comprometer a isolamento elétrica de seus componentes;
Tensão de circuito aberto (V_{OC}):	É a máxima tensão que o MFV pode apresentar quando em circuito aberto (sem carga);
Tensão de ponto de máxima potência (V_{PMP}):	É a tensão máxima que o MFV pode apresentar quando em operação em circuito fechado (com carga);
Corrente de curto circuito (I_{SC}):	É a máxima corrente que pode ocorrer na saída do MFV quando seus terminais (positivo e negativo) são curto circuitados;
Corrente de ponto de máxima potência (I_{PMP}):	É a máxima corrente que pode ocorrer na saída do MFV quando em operação em circuito fechado (com carga);
Potência nominal (P_{MFV}^0):	É a máxima potência de saída que o MFV pode fornecer em STC, quando em operação; é definida pelo produto entre V_{PMP} e I_{PMP} , e pode ser entendida como potência de ponto de máxima potência - P_{PMP} do MFV em STC;
Eficiência do MFV (η_{MFV}):	É um índice que mede a capacidade que o módulo possui, por unidade de área, de converter a energia solar incidente em energia elétrica nos terminais de saída do MFV.
Coeficientes de temperatura de tensão (α), corrente (β) e potência (γ):	São coeficientes que apresentam valores percentuais ou absolutos de variação nos valores de saída da tensão, corrente e potência elétrica dos MFV respectivamente, quando submetidos a variação da temperatura, “os valores desses coeficientes variam em função da tecnologia da célula” (PINHO; GALDINO, 2014).

Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014).

Tabela 4. Principais parâmetros elétricos de um IFV idem tabela 3

Parâmetros	Descrição
Tensão máxima de entrada ($V_{IFV(máx)}$):	É a máxima tensão CC admissível na entrada do IFV;
Tensão mínima de entrada ($V_{IFV(mín)}$):	É a mínima tensão CC admissível na entrada do IFV para iniciar o seu funcionamento;
Tensão máxima do ponto de máxima potência ($V_{IFV(PMPmáx)}$):	É a máxima tensão CC admissível na entrada do IFV para operação do SRPMP (Sistema de rastreamento de ponto de máxima potência - SRPMP, segundo o CRESSESB e CEPEL (2014), é um circuito responsável por rastrear o ponto de máxima potência - PMP do GFV permitindo extrair o máximo da potência gerada nos MFV)
Tensão mínima do ponto de máxima potência ($V_{IFV(PMPmín)}$):	É a mínima tensão CC admissível na entrada do IFV para operação do SRPMP;
Corrente máxima de entrada ($I_{IFV(máx)}$):	É a máxima corrente CC admissível na entrada do IFV;
Potência máxima ou nominal de entrada (P^0_{IFVCC}):	É a máxima potência CC admissível na entrada do IFV;
Potência máxima ou nominal de saída (P^0_{IFVCA}):	É a máxima potência CA admissível na saída do IFV;
Eficiência do IFV (η_{IFV}):	É um índice que mede a capacidade que o IFV possui, em converter a energia elétrica recebida do GFV em CC para entrega-la nos seus terminais de saída à rede elétrica em CA.

Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014)

Figura 3. Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede – SFVCR

Fonte: Ecomais Eficiência Energética (2018)

A literatura apresenta diversos fatores que podem afetar o desempenho e gerar perdas de potência no SFV, os mais importantes a serem considerados durante a etapa de dimensionamento são, fatores interno e externos.

Os fatores internos são fatores intrínsecos ao MFV, e estão relacionados diretamente à qualidade da CFV e ao seu processo de fabricação, os principais fatores são compreendidos em: Fator de tolerância (F_{TOL}), segundo Balfour, Shaw e Nash (2016) as CFV não são idênticos e essa heterogeneidade afeta o desempenho do MFV e do SFV, já o Clean Energy Council (2013) as perdas que podem chegar até 3% e podem ocorrer por duas razões, pela incompatibilidade espectral entre as células: decorre de inconsistências durante o processo de fabricação e pela incompatibilidade da radiação solar: decorre do fato de que durante a operação, algumas CFV podem apresentar pontos de máxima potência diferentes, sendo assim aquelas que estiverem desenvolvendo potências menores, poderão operar parcialmente como carga, limitando a potência de saída do MFV, gerando aquecimento e perdas; também pode ser provocada por fatores externos. O fator de incompatibilidade pode ser consultado no

datasheet do equipamento, quando fornecido; e alguns fabricantes o apresentam como Power Tolerance (%) ou como faixa, por exemplo: (0~+3%), ou em valores absolutos, em geral relacionado a potência máxima ou nominal do MFV.

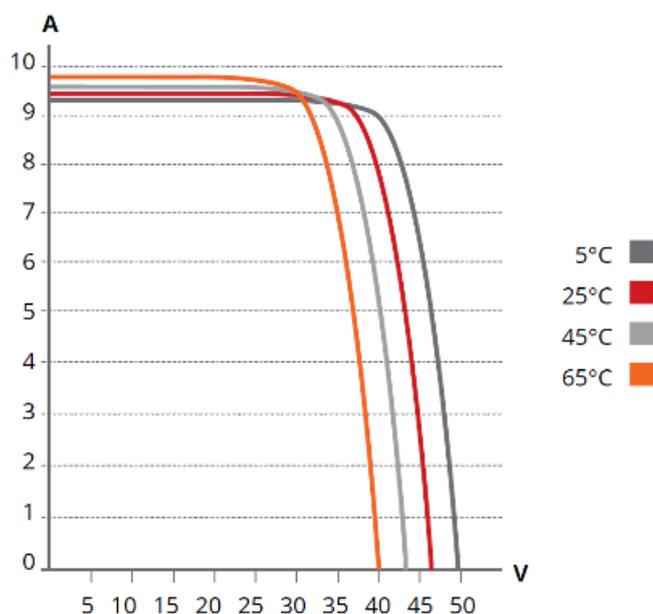
A temperatura de operação da célula (FTEMP): Segundo o Clean Energy Council (2013) é o fator que tem a maior influência sobre desempenho do SFV. Balfour, Shaw e Nash, (2016) afirmam que durante o processo de conversão da radiação solar em energia elétrica, uma parcela significativa é transformada e dissipada na forma de calor, e a produção de energia pelas células diminui, conforme ilustrado na Figura 4. O fator de perdas por temperatura, segundo o Clean Energy Council (2013), pode ser calculado conforme a equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.**:

$$F_{TEMP} = 1 + \gamma \times (TC - TC_{STC}) \quad (1)$$

Sendo:

γ : Coeficiente de temperatura potência, [%/°C];
 TC : Temperatura de operação da célula, [°C];
 TC_{STC} : Temperatura da célula em STC, [°C].

Figura 4. Comportamento da curva característica V-I de um MFV, sob variação de temperatura de operação da célula.



Fonte: Canadian Solar Inc. (2016)

Através desta curva verifica-se que a corrente de saída dos MFV é pouco influenciada pela variação da temperatura das células, apesar da pequena elevação em seu valor; já a tensão é bastante sensível a essa variação, evidenciando que quanto maior a temperatura das células, menor será tensão de saída do módulo e o contrário também se verifica.

Os fatores externos em geral estão relacionadas as características físicas do local de instalação e vizinhança, e aos demais dispositivos e equipamentos que integram o sistema, cujos principais são:

O sombreamento (F_{SOMB}), é o bloqueio da incidência da radiação solar sobre o MFV, e deve ser evitado, pois Kalogirou (2014) afirma que uma célula sombreada apresenta redução de potência na saída do MFV numa proporção muito maior do que a área sombreada. Para determinar o F_{SOMB} deve-se realizar estudo de sombreamento específico para levantar os percentuais de perdas ocasionados pelo sombreamento, é um procedimento bastante complexo de ser realizado.

A sujidade (F_{SUJ}) Representa as perdas ocasionadas por acúmulo de poeira, restos de plantas, dejetos de aves, neve dentre outros podem variar de 0 até 15%, conforme Clean Energy Council (2013), California Energy Commission (2001) e Mondoc e Pop (2010).

Perdas nos cabamentos em corrente contínua (F_{CBCC}), conforme a International Electrotechnical Commission (2005a) essas

perdas são provocadas por efeito joule devido a passagem de corrente elétrica no trecho de cabeamento em corrente contínua e podem chegar até 3%.

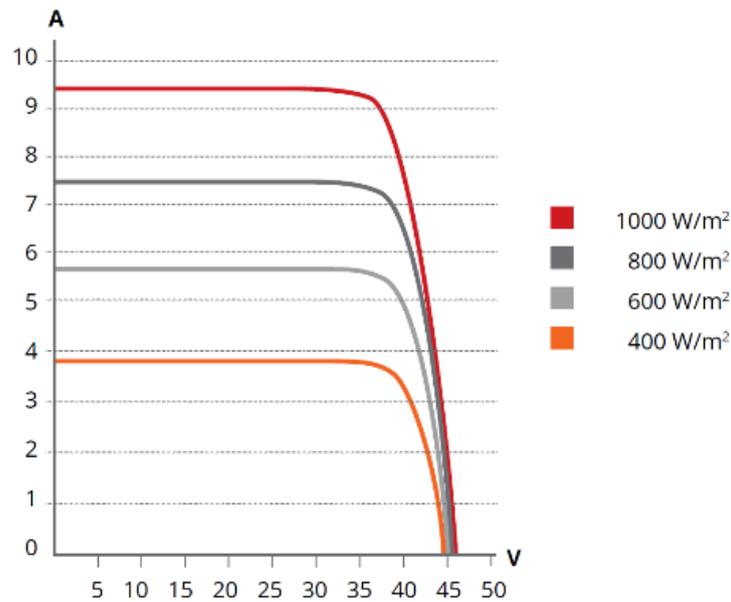
Perdas nos cabamentos em corrente alternada (F_{CBCA}) são provocadas por efeito joule devido a passagem de corrente elétrica no trecho de cabeamento, em corrente alternada, que conecta a saída do IFV ao quadro geral de distribuição, os valores típicos são de até 2% conforme ABNT (2004), e de até 3 % conforme Pereira e Oliveira (2011) e International Electrotechnical Commission (2005a).

Eficiência do inversor (η_{IFV}) durante o funcionamento do IFV ocorrem perdas internas, inerentes ao próprio funcionamento do equipamento, provocadas por efeito joule devido à passagem de corrente elétrica nos componentes e circuitos eletrônicos. (PINHO; GALDINO, 2014).

Os fatores ambientais são fatores diretamente relacionados às características climatológicas locais, as principais encontradas na literatura são: irradiância solar (H), Orientação e a inclinação,

Pinho e Galdino (2014) afirmam que irradiância solar é o fator ambiental que possui maior influência sobre o desempenho de um MFV, pois é a matéria prima para a produção de energia elétrica nas CFV. Na Figura 5 é apresentado uma curva característica de um MFV sob influência da variação da Irradiância solar.

Figura 5. Comportamento da Curva característica V-I de um MFV, sob variação da Irradiância solar



Fonte: Canadian Solar Inc. (2016)

Esta curva revela que a tensão dos módulos é pouco influenciada pela variação da irradiância, em contrapartida essa variação afeta consideravelmente a corrente de saída do MFV, quanto maior a intensidade da irradiância maior é a corrente de saída do MFV, daí a importância de se evitar o sombreamento sobre os MFV.

A Orientação e a inclinação correta dos MFV de um GFV podem maximizar o aproveitamento anual de radiação solar incidente. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é apresentado um resumo dos critérios a serem adotados para o correto ajuste destes parâmetros.

Tabela 5. Orientação e inclinação ótimos para o MFV

Orientação do MFV	
No hemisfério norte	Módulo em direção a linha do equador, com a face voltada para o sul geográfico
No hemisfério sul	Módulo em direção a linha do equador, com a face voltada para o norte geográfico
Ângulo de Inclinação ótima (β)	
No hemisfério sul	$\beta = 3,7 + 0,69 \times latitude $

Fonte:

Conforme Mertens (2014) a temperatura afeta os parâmetros elétricos do MFV tais como: tensão, corrente e potência, alterando seus valores podendo comprometer o desempenho do SFV. Sendo assim, esses parâmetros devem ser corrigidos em função das temperaturas mínima e máxima de operação da CFV que ocorrem sob condições de temperaturas ambiente mínima e máxima, respectivamente, conforme cálculo de

estimação das temperaturas mínima e máxima de operação das CFV, apresentado por Kalogirou (2014), pode ser calculada através da equação

$$T_C = T_A + \frac{H(\beta)}{H_{NOCT}} \times (T_{C_{NOCT}} - T_{A_{NOCT}}) \quad (2)$$

$$T_C = T_A + \frac{H(\beta)}{H_{NOCT}} \times (T_{C_{NOCT}} - T_{A_{NOCT}}) \quad (2)$$

Sendo:

T_C :
 T_A :
 $H(\beta)$:
 H_{NOCT} :
 T_{CNOCT} :
 T_{ANOCT} :

O cálculo para correção da tensão do MFV, deve ser realizado conforme apresentado

$$V_{TC} = V_{STC} \times \left[1 + \frac{\alpha\%}{100} \times (TC - TC_{STC}) \right] \quad (3)$$

Sendo:

$V_{(TC)}$:
 $\alpha\%$:
 T_{CSTC} :

O cálculo para correção da corrente do MFV deve ser realizado Segundo Mertens

$$I_{TC} = I_{STC} \times \left[1 + \frac{\beta\%}{100} \times (TC - TC_{STC}) \right] \quad (4)$$

Sendo:

$I_{(TC)}$:
 $\beta\%$:

A poluição atmosférica (POL_{ATM}) como fuligem e partículas sólidas no ar podem servir como barreira para radiação solar, causando diminuição de sua intensidade. A BlueSol (2010) apresenta uma equação para correção da

(5), que pode ser adaptada para calcular a

Tabela 6. Fator de correção para superfícies inclinadas na latitude 15°.

Mês	INCLINAÇÃO						
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
Jan	1	0,99	0,97	0,94	0,91	0,87	0,82
Fev	1	1	0,99	0,98	0,95	0,93	0,89
Mar	1	1,02	1,02	1,03	1,02	1,01	0,99
Abr	1	1,03	1,06	1,07	1,09	1,09	1,08
Mai	1	1,04	1,08	1,11	1,13	1,14	1,15

correção da Irradiância solar incidente, no plano do GFV em função dos mesmos fatores, conforme pela equação

$$\bar{G}'_{(\beta,\alpha)} = \bar{G}_{(\alpha)} \times c \times k \quad (5)$$

$$H'_{(\beta)} = H \times c \times k \quad (6)$$

Sendo:

$\bar{G}'_{(\beta,\alpha)}$: Irradiação solar média diária anual corrigida no plano do GFV, [kWh/m² dia];
 $\bar{G}_{(\alpha)}$: Irradiação solar média diária anual no plano horizontal, [kWh/m² dia];
 c : Fator de poluição atmosférica;
 k : Fator de correção para superfícies inclinadas, varia em função da latitude e ao longo do ano.

Esta correção deve ser realizada quando se possui dados de Irradiação ou de irradiância solar no plano horizontal e se deseja obter o valor correspondente no plano inclinado ou no plano do GFV, descontando os efeitos da poluição atmosférica.

Consideram-se os seguintes valores: $c = 1$, sem correção; $c = 1,05$ para localidade de atmosfera mais limpa e $c = 0,95$ para localidade com alto índice de poluição atmosférica (BLUESOL, 2010); o Fator de correção para superfícies inclinadas (k) Pode ser consultado através da planilha eletrônica disponível para Download através do link: <http://www.bluesol.com/downloads/HSP-e-FatorK.xls>, acesso realizado em 12 de junho de 2018.

Na Tabela 6 são apresentados alguns valores para o fator de correção de radiação para superfícies inclinadas (k) para a latitude correspondente a da cidade de Cuiabá-MT para diversos ângulos de inclinação dos MFV.

Jun	1	1,04	1,08	1,11	1,13	1,15	1,16
Jul	1	1,04	1,07	1,09	1,11	1,12	1,12
Ago	1	1,03	1,05	1,06	1,07	1,07	1,06
Set	1	1,01	1,02	1,02	1,01	1	0,98
Out	1	1	0,99	0,98	0,95	0,93	0,89
Nov	1	0,99	0,97	0,94	0,91	0,87	0,82
Dez	1	0,98	0,96	0,93	0,89	0,85	0,8

Fonte: Adaptado de Bluesol (2010)

2 MATERIAL E MÉTODOS

A Metodologia apresentada neste trabalho, foi desenvolvida a partir da revisão sistemática da literatura, conforme metodologia apresentada por Dresch, Lacerda e Antunes Junior (2015) tendo como objeto de análise Literaturas Nacionais e internacionais (Artigos, Boletins Técnicos, Livros, Manuais e Normativas) que versam sobre a temática de dimensionamento de SFVCR. Foram selecionados 29 trabalhos que foram submetidos a uma análise comparativa entre suas metodologias, sequências de cálculos, equações, parâmetros e critérios técnicos. Por meio desta análise foi possível extrair os principais e mais relevantes critérios, parâmetros e equações, organizá-los e ordená-los em uma sequência lógica e didática com a

2.1 Definição da orientação e inclinação dos módulos fotovoltaicos

Proceder conforme indicado na Tabela 5.

2.2 Definição das temperaturas ambiente máxima e mínima local

Nesta etapa recomenda-se a realização de uma análise da série histórica horária dos dados climatológicos locais, buscando os valores de temperaturas máxima ($T_{Amáx}$) e mínima (T_{Amin}) recordes correspondentes às irradiâncias máximas. Essa busca deve se limitar ao período de interesse, que corresponde ao período diurno pois, será nesse período que o GFV estará em operação, descartando valores ocorridos durante o período noturno;

2.3

finalidade de dimensionar SFVCR's. Esta metodologia é inédita, porém conta com a contribuições dos diversos trabalhos analisados, cujos créditos foram devidamente reconhecidos.

Enfim, esta metodologia apresenta de forma organizada, didática e sistemática um passo a passo para se dimensionar um SFVCR, visando o ajustamento ótimo entre o GFV e o IFV, para uma operação segura, dentro dos padrões nominais dos equipamentos, sem comprometer suas vidas úteis. Assim como, também apresenta uma nova proposta de equação para estimação da máxima potência gerada pelo sistema, com base em seus principais fatores de perdas. Os passos apresentados são sequenciais e interdependentes, devendo ser realizados na ordem em que são apresentados a seguir.

$$(\beta, \alpha)' = G(\alpha) \times c \times k \tag{5}$$

e (6) , deve-se corrigir o valor da Irradiação e da irradiância solar no plano horizontal para o plano inclinado em função do fator de poluição atmosférica (c), e do fator de correção para superfícies inclinadas (k).

Por
A

2.4

Com

2.5

$$VTC = VSTC \times 1 + \alpha \% 100 \times TC - TCSTC$$

(3), deve-se corrigir os parâmetros de tensão elétrica do MFV (v_{oc} e v_{pmp}).

Corrigindo estes parâmetros em função de $T_{Cmáx}$ e T_{Cmin} , obtêm-se 4 parâmetros

derivados, dos quais serão utilizado apenas àqueles em destaque **negrito**:

- $V_{OC(TC_{máx})}$ e $V_{PMP(TC_{máx})}$, para $T_{C_{máx}}$;
- $V_{OC(TC_{mín})}$ e $V_{PMP(TC_{mín})}$, para $T_{C_{mín}}$.

*REF_Ref516248210 \h **
 $ITC = ISTC \times 1 + \beta \% 100 \times TC - TCSTC$
 (4), *deve-se corrigir os parâmetros de corrente elétrica do MFV (I_{SC} e I_{PMP}).*

Corrigindo

- $I_{SC(TC_{máx})}$ e $I_{PMP(TC_{máx})}$, para $T_{C_{máx}}$;
- $I_{SC(TC_{mín})}$ e $I_{PMP(TC_{mín})}$, para $T_{C_{mín}}$.

2.6

Este é um cálculo de segurança para adequação do número máximo de módulos conectados em série numa fileira, para proteção do MFV, em função da tensão máxima do Sistema (V_{SFV}), pode ser realizado através da equação (7), e deve $N_{MFVfil_{máx}} \times V_{OC(TC_{mín})} \leq V_{SFV}$ (8):

$$N_{MFVfil_{máx}} = \frac{V_{SFV}}{V_{OC(TC_{mín})}} \quad (7)$$

$$N_{MFVfil_{máx}} \times V_{OC(TC_{mín})} \leq V_{SFV} \quad (8)$$

Sendo:

$N_{MFVfil_{máx}}$: Número máximo de MFV em série, por fileira;

2.7

2.7.1

Conforme Zilles et al. (2012) é recomendado adequar a potência do GFV à potência do IFV, para garantir rendimento ótimo, operação segura, dentro dos padrões nominais do equipamento sem comprometer sua vida útil, essa adequação é realizada calculando o Fator de dimensionamento de

PIFVCCOPGFV0

(9) (PINHO; GALDINO, 2014), e deve obedecer ao critério da equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (PUCHE, 2016):

$$FDI = \frac{P_{IFVCC}^0}{P_{GFV}^0} \quad (9)$$

$$0,7 \times P_{GFV}^0 \leq P_{IFVCC}^0 \leq 1,2 \times P_{GFV}^0 \quad (10)$$

Sendo:

P_{IFVCC}^0 : Potência nominal de entrada CC do IFV, [W];

P_{GFV}^0 : Potência nominal do GFV, em STC, é definida como a soma de P_{MFV}^0 de cada MFV que compõe a matriz do GFV, [W].

2.7.2 Adequação da tensão de saída do GFV à faixa de segurança $V_{IFV(máx)}$ E $V_{IFV(mín)}$ do IFV.

É realizada em duas etapas conforme o Clean Energy Council (2013):

2.7.2.1 Cálculo do número máximo de MFV em série

Realizado de modo que $V_{IFV(máx)}$ não seja excedida, pode ser calculada pela equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e $N_{MFVfil_{máx}} \times V_{OC(TC_{mín})} \leq V_{IFV(máx)}$ (8):

$$N_{MFVfil_{máx}} = \frac{V_{IFV(máx)}}{V_{OC(TC_{mín})}} \quad (11)$$

$$N_{MFVfil_{máx}} \times V_{OC(TC_{mín})} \leq V_{IFV(máx)} \quad (12)$$

2.7.2.2

Realizado de modo que a tensão de saída do GFV não fique abaixo de $V_{IF(mín)}$ pode ser calculada pela equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e deve obedecer $N_{MFVfil_{mín}} \times V_{PMP(TC_{máx})} \times F_{CBCC} \times F_{S(V)} \geq V_{IFV(mín)}$ (14):

$$N_{MFVfil_{mín}} = \frac{V_{IFV(mín)} \times F_{S(V)}}{V_{PMP(TCmáx)} \times F_{CBCC}} \quad (13)$$

$$\frac{N_{MFVfil_{mín}} \times V_{PMP(TCmáx)} \times F_{CBCC}}{F_{S(V)}} \geq V_{IFV(mín)} \quad (14)$$

Sendo:

$F_{S(V)}$: Fator de segurança para tensão mínima, adotado em função da variação da qualidade das células. O Clean Energy Council (2013) recomenda o acréscimo de 10% sobre o valor da tensão mínima de entrada CC do IFV, adotar $FS = 1,1$.

Caso no sistema não exista circuitos com cabeamento em CC, seja fazendo conexão entre os MFV, entre o GFV e IFV, ou ambos, pode-se desconsiderar o fator de perdas no cabeamento CC (F_{CBCC}). O Clean Energy Council (2013) adota como valor de $F_{CBCC}=0,97$ admitindo uma queda de tensão máxima no cabeamento em CC de até 3%, afim de melhor ajustar a tensão mínima de saída do GFV dentro da faixa mínima de ponto de máxima potência do IFV.

2.7.3 Adequação da tensão de saída do GFV à faixa de V_{pmp} do IFV

Essa adequação deve ser realizada nos casos em que o IFV possua sistema de

$$N_{MFVfil_{mín}} \times V_{PMP(TCmáx)} \times F_{CBCC} \leq V_{IFV(PMPmín)} \quad (18)$$

Caso no sistema não exista circuitos com cabeamento em CC, seja fazendo conexão entre os MFV, entre o GFV e IFV, ou ambos, pode-se desconsiderar o fator de perdas no cabeamento CC (F_{CBCC}). Clean Energy Council (2013) adota como valor de $F_{CBCC} = 0,97$ admitindo uma queda de tensão máxima no cabeamento em CC de até 3%, afim de melhor ajustar a tensão mínima de saída do GFV dentro da faixa mínima de ponto de máxima potência do IFV.

2.8 Adequação da corrente de saída do GFV à $I_{IFV(máx)}$ do IFV

rastreamento de ponto de máxima potência – SRPMP, também é realizado em duas etapas:

2.7.3.1 Cálculo do número máximo de MFV em série

Deve ser realizada de modo que $V_{IFV(PMPmáx)}$ não seja excedida, pode ser calculada pela equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e deve obedecer $N_{MFVfil_{máx}} \times V_{PMP(TCmín)} \leq V_{IFV(PMPmáx)}$ (16) e da equação $N_{MFVfil_{máx}} \times V_{OC(TCmín)} \leq V_{SFV}$ (8):

$$N_{MFVfil_{máx}} = \frac{V_{IFV(PMPmáx)}}{V_{PMP(TCmín)}} \quad (15)$$

$$N_{MFVfil_{máx}} \times V_{PMP(TCmín)} \leq V_{IFV(PMPmáx)} \quad (16)$$

2.7.3.2 Cálculo do número mínimo de MFV em série

Deve ser realizada de modo que a tensão de saída do GFV não fique abaixo de $V_{IFV(PMPmím)}$ pode ser calculada pela equação (17) e deve obedecer ao critério da $N_{MFVfil_{mín}} \times V_{PMP(TCmáx)} \times F_{CBCC} \leq V_{IFV(PMPmín)}$ (18):

$$N_{MFVfil_{mín}} = \frac{V_{IFV(PMPmín)}}{V_{PMP(TCmáx)} \times F_{CBCC}} \quad (17)$$

$$N_{MFVfil_{mín}} \times V_{PMP(TCmáx)} \times F_{CBCC} \leq V_{IFV(PMPmín)} \quad (18)$$

É realizada de modo que o valor de $I_{IFV(máx)}$ não seja ultrapassado, pode ser calculada pelas equações (19) e (20) e deve obedecer ao critério da equações (21) e (22):

$$N_{fil_{máx}} = \frac{I_{IFV(máx)}}{I_{SC(TCmáx)}} \quad (19)$$

$$N_{fil_{máx}} = \frac{I_{IFV(máx)}}{I_{PMP(TCmáx)} \times F_{S(I)}} \quad (20)$$

$$N_{fil_{máx}} \times I_{SC(TCmáx)} \leq I_{IFV(máx)} \quad (21)$$

$$N_{fil\acute{m}ax} \times I_{PMP(T_{cm\acute{a}x})} \times F_{S(I)} \leq I_{IFV(m\acute{a}x)} \quad (22)$$

Sendo:

$N_{fil\acute{m}ax}$: Número máximo de fileiras de MFV em paralelo;

$F_{S(I)}$: Fator de segurança para corrente máxima.

$F_{S(I)}$  adotado nos casos em que a irradiância solar incidente possa exceder o valor de $H_{REF} = 1000W/m^2$. Mertens (2014), adota um fator de elevao de corrente de até 25% sobre a corrente máxima de saída do módulo

$I_{PMP(T_{cm\acute{a}x})}$, o autor adota como valor de $F_{S(I)}=1,25$.

2.9 Cculo para estimo da potência máxima de saída do SFV (P_{SFV})

Com base nas contribuies e consideraes extraídas dos diversos trabalhos analisados foi realizada uma adaptao de todos os parâmetros encontrados concatenando-os em uma única expressão matemática com a qual espera-se poder estimar P_{SFV} com maior precisão e aproximao ao valor mensurado na prática,  apresentada a seguir, na equao **Erro! Fonte de referência não encontrada.:**

$$P_{SFV} = P_{GFV}^0 \times F_{TOL} \times F_{SUJ} \times F_{TEMP} \times F_{SOMB} \times F_{CBCC} \times F_{CBCA} \times \eta_{IFV} \times \frac{H'_{(\beta)}}{H_{REF}} \quad (23)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos diversos trabalhos selecionados para análise, disponíveis na literatura nacional e internacional, identificou-se que independente da área disponível, da quantidade de energia a ser compensada ou da potência a ser instalada no SFV, o dimensionamento de qualquer SFVCR carece de adequao dos parâmetros elétricos do GFV ao IFV.

Diante disso, acredita-se que as principais contribuies deste trabalho são justamente: A síntese detalhada, mostrando o passo a passo para dimensionar um SFVCR, para o ajustamento ótimo entre o gerador fotovoltaico -GFV e o inversor - IFV, visando uma operao segura, dentro dos padrões nominais dos equipamentos, sem comprometer suas vidas úteis; e a apresentao de uma nova equao para o cáculo de estimo da potência máxima de saída do SFV utilizando diversos fatores de perdas que foram extraídos dos trabalhos analisados e concatenados em uma única equao matemática.

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resoluo Normativa N 482, de 17 de Abril de 2012**. Revisão do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuio – PRODIST. Brasília, DF: ANEEL, 2012.

4 CONCLUSÕES

Conclui-se que a metodologia apresentada neste artigo poderá contribuir para sanar muitas das dvidas existentes quanto ao tema do dimensionamento de SFVCR, especialmente no que se refere ao ajustamento entre o GFV e o IFV, este trabalho também concorre para auxiliar em estudos de viabilidade técnica e servir de guia para arquitetos, engenheiros e técnicos, que tenham interesse na previsão e pré-dimensionamento de SFVCR para aplicao em edificaes residenciais e comerciais, sejam elas urbanas ou rurais.

5 AGRADECIMENTOS

 FAPEMAT/CAPES pela ajuda financeira e a Universidade Federal de Mato Grosso -UFMT pelo apoio disponibilizado para realizao deste trabalho.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa N° 687, de 24 de Novembro de 2015**. Condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Brasília, DF: ANEEL, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa N° 786, de 17 Outubro de 2017**. Altera a Resolução Normativa n° 482, de 17 de abril de 2012. Brasília, DF: ANEEL, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA)**: Capacidade de Geração do Brasil. Brasília: ANEEL, 2018a. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em 05 jun. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração Distribuída**: unidades consumidoras com geração distribuída com Tipo de Geração: UFV. Brasília: ANEEL, 2018b. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd_fonte_detalhe.asp?Tipo=12. Acesso em: 03 set. 2018.

ABNT. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Disponível em: <http://universidadeniltonlins.com.br/wp-content/uploads/2019/04/NBR-5410.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2021.

BALFOUR, J.; SHAW, M.; NASH, N. B. **Introdução ao Projeto de Sistemas Fotovoltaicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 1.

BLUESOL. **Os sistemas de energia solar fotovoltaica**: Livro digital de introdução aos sistemas solares. Ribeirão Preto: BlueSol, 2010.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. **A guide to photovoltaic (PV) system design and installation**. California: California Energy Commission, 2001. Disponível em: https://www.abcsolar.com/pdf/2001-09-04_500-01-020.pdf. Acesso em: 10 jun. 2021.

CANADIAN SOLAR INC. **PV Module Product Datasheet: MAXPOWER (1500 V):CS6U-325|330|335|340M**. Guelph: Canadian Solar Inc., 2016.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SERGIO BRITO. **Potencial Solar - SunData v 3.0**. Rio de Janeiro: Cresesb, 2018. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 15 out. 2018.

CLEAN ENERGY COUNCIL. **Grid-Connected Solar PV Systems: No Battery storage, Design Guidelines for Accredited installers**. Melbourne: CEC, 2013. v. 1.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. Systematic Literature Review. *In*: DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. **Design Science Research: A Method for Science and Technology Advancement**. 1. ed. [S. l.]: Springer, 2015. cap. 7, v. 1, p. 129-156.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 4. ed. New Jersey: Wiley, 2013.

ECOMAI S EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Energia Solar**. Itú: Ecomais Ind., 2018. Disponível em: <http://www.ecomais.ind.br/energia-solar>. Acesso em: 15 ago. 2018.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. **Nota Técnica DEA 19/14**: Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos. Brasília, DF: EPE, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estações Automáticas**. Brasília, DF: INMET, 2018.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **International Standard IEC 60364**: Low-voltage electrical installations – Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions. 5. ed. Paris: IEC, 2005a.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **International Standard IEC 61215**: Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval. Geneva: IEC, 2005b.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2016**. Paris: OECD: IEA, 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key world energy statistics 2017**. Paris: OECD: IEA, 2017.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Annual Energy Outlook 2018**. Paris: EIA, 2018.

KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2014. v. 1.

MERTENS, K. **Photovoltaics Fundamental, technology an practice**. 1. ed. Munich: John Wiley & Sons Ltd, 2014.

MONDOC, B.; POP, F. Factor influencing the performance of a photovoltaic power plant. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODERN POWER SYSTEMS, 3., 2010, Cluj-Napoca. **Anais [...]**. Cluj-Napoca: MPS. 2010. p. 271-276. Disponível em: https://ie.utcluj.ro/files/acta/2010/Number5/MPS_2010_Mondoc.pdf. Acesso em: 8 jun. 2018.

PEREIRA, F. A. D. S.; OLIVEIRA, M. Â. S. **Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica**. 1. ed. Porto: Publindústria Edições Técnicas, 2011.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Cresesb: Cepel, 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 15 nov. 2019.

PUCHE, A. P. **Otimização de produção de energia elétrica em parques fotovoltaicos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energias) – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2016. Disponível em: https://repositorio.utad.pt/bitstream/10348/7765/1/msc_appuche.pdf. Acesso em: 15 out. 2018.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. **Renewables 2017 Global Status Report**. Paris: REN21, 2017.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. Sistemas Isolados e conectados à rede. São Paulo: Editora Érica, 2012.

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B; OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.