



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

IVENS GABRIEL DE OLIVEIRA CIRÍACO MENDES

ANÁLISE E ESTUDO TEÓRICO DE CURTO-CIRCUITO NO BARRAMENTO CC
DE UMA USINA FOTOVOLTAICA

FORTALEZA

2022

IVENS GABRIEL DE OLIVEIRA CIRÍACO MENDES

ANÁLISE E ESTUDO TEÓRICO DE CURTO-CIRCUITO NO BARRAMENTO CC DE
UMA USINA FOTOVOLTAICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Kleber de Araújo Lima

FORTALEZA
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M491a Mendes, Ivens Gabriel de Oliveira Ciríaco.

Análise e estudo teórico de curto-circuito no barramento CC de uma usina fotovoltaica / Ivens Gabriel de Oliveira Ciríaco Mendes. – 2022.

54 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Kleber de Araújo Lima.

1. Energia solar fotovoltaica. 2. Curto-circuito. 3. Geração distribuída. 4. Energias renováveis. 5. Modelo de diodo simples. I. Título.

CDD 621.3

IVENS GABRIEL DE OLIVEIRA CIRÍACO MENDES

ANÁLISE E ESTUDO TEÓRICO DE CURTO-CIRCUITO NO BARRAMENTO CC DE
UMA USINA FOTOVOLTAICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Programa de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro Eletricista.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Kleber de Araújo Lima (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Dalton de Araújo Honório
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. MSc. Renato Guerreiro Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Evanizes e Vera

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

A toda minha família, em especial aos meus pais, Evanizes e Vera, que sempre me deram o suporte e o apoio para alcançar os meus sonhos.

Ao professor Dr. Kleber Lima por ter me dado a oportunidade de desenvolver este projeto, bem como a sua orientação durante o desenvolvimento do trabalho.

À turma 2017.1 com os quais compartilhei momentos que guardarei para minha vida toda, além de toda a cooperação para que todos conseguissem êxito, compartilhando provas antigas e revisões momentos antes das provas. Com certeza ninguém se forma sozinho!

A todos que foram e são importantes na minha caminhada, meus amigos do ensino médio do FB, meus amigos e irmãos da minha cidade, todos que de alguma forma passaram pela minha vida, compartilhando suas visões, suas experiências, o que mudou a maneira como eu vejo o mundo e me tornou o ser humano que sou hoje.

“Se enxerguei mais longe, foi por que me apoiei nos ombros de gigantes.”
Isaac Newton

Resumo

O presente trabalho trata da proposição de um modelo matemático que viabilize o cálculo do curto-circuito no barramento CC de uma planta fotovoltaica. Com o marco da geração distribuída no Brasil, a mesma, encabeçada pela geração fotovoltaica, vem ganhando grande espaço e sendo cada vez mais integrada a rede. Pelo sistema *on grid* a planta se conecta à rede em baixa tensão, sistema esse que oferece muitas vantagens seja diminuindo os custos, seja aumentando a confiabilidade do sistema, ou até mesmo, melhorando a qualidade da energia elétrica, porém é notável que um acréscimo em massa desse tipo de geração vai gerar consequências em sistemas de potência, estudar essas consequências e entender elas a fundo pode ser muito útil seja para a garantia da segurança dos equipamentos e usuários, seja para a formulação de normas técnicas visando nortear os profissionais que estão projetando tal planta. Por isso a proposição desse modelo foi baseada em uma revisão bibliográfica, procurando satisfazer dois critérios, fidelidade e simplicidade, assim foi escolhido o modelo de diodo simples, por ser bastante fidedigno e simples. Para a confirmação do modelo foi estabelecida uma simulação utilizando-se de todo o embasamento teórico desenvolvido, no software SIMULINK que possui ferramentas capazes de emular cada detalhe da proposição matemática, que precisou ser generalizada a fim de que fosse simples de simular o arranjo de 21 painéis, em série, por 180 painéis, em paralelo, arranjo esse retirado do diagrama unifilar de uma planta de 3MW a ser instalada no campus do Pici, esse arranjo indica um terço da capacidade da planta, tendo em vista que serão instalados 3 arranjos desse em paralelo. A análise foi realizada através da curva de carga retirada do próprio SIMULINK, que tem seu próprio simulador de arranjo de painéis fotovoltaicos, e contrastando esses dados com a curva de carga gerada através da modelagem matemática proposta. Por esse prisma chegou-se à conclusão de que a corrente de curto-circuito a qual a planta realmente estará exposta é menor do que a dada no datasheet em condições de teste.

Palavra-chave: energia solar fotovoltaica, curto-circuito, geração distribuída, energias renováveis, modelo de diodo simples.

ABSTRACT

This present work deals with the proposition of a mathematical model that enables the calculation of the short-circuit current in the DC bus of a photovoltaic plant. Because with the legal framework of distributed generation in Brazil, it, led by photovoltaic generation, has been gaining great space and being increasingly integrated into the network, by the on grid system, a system that offers many advantages, either by reducing costs, either increasing the reliability of the system, or even improving the quality of electrical energy, but is notable that a massive increase in this type of generation in power systems will generate consequences, studying these consequences and understanding them can be very useful either for guaranteeing the safety of equipment and users, or for the formulation of technical norms aiming to guide the professionals who are designing that plant. Therefore, the proposition of this model was based on a literature review, seeking to satisfy two criteria, fidelity and simplicity, so the simple diode model was chosen, because it is quite trustworthy and simple. To confirm the model, a simulation was established using all the theoretical basis developed, in the SIMULINK software, which has tools capable of emulating every detail of the mathematical proposition, which had to be generalized in order to make it simple to simulate the array of 21 panels, in series, by 180 panels, in parallel, this arrangement taken from the diagram of a 3MW plant to be installed on the PICI campus, this arrangement indicates the third part of the plant's capacity, considering that 3 identical arrays, like this, will be installed. The analysis was based out through the load curve taken from SIMULINK itself, which has its own simulator for a photovoltaic array, and contrasting these data with the load curve generated through the proposed mathematical modeling. Therefore, the short circuit current that the plant will actually be exposed to is less than the rated current on the data sheet under test conditions.

Key Words: solar photovoltaic energy, short circuit, distributed generation, renewable energy, simple diode model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Potencial de Geração solar (IHG) – Brasil <i>versus</i> Alemanha.	16
Figura 2 – Diagrama do painel fotovoltaico com o filtro de Kalman.....	24
Figura 3 – Esquemático do algoritmo do filtro de Kalman.	25
Figura 4 – Resultado da Simulação	26
Figura 7 – Diagrama Unifilar Local.	32
Figura 8 – Modelo Clássico de um painel fotovoltaico com diodo simples.	38
Figura 9 – Método para identificação do fator de idealidade.	40
Figura 10 – Curvas I-V para o painel ideal e para os valores reais dos painéis.	43
Figura 11 – Circuito Completo em Série.....	47
Figura 12 – Circuito Equivalente em série.	48
Figura 13 – Circuito Completo em Paralelo.....	49
Figura 14 – Circuito em Paralelo Redesenhado.	49
Figura 15 – Circuito Equivalente.	50
Figura 16 – Curva de carga do painel escolhido	51
Figura 17 – Curva de carga para o arranjo no simulink.	52
Figura 18 – Curva I-V para o arranjo.	52
Figura 19 – Curva P-V para o arranjo.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caso I: Valores na Saída do Inversor.	33
Tabela 2 – Caso I: Valores no Ponto de Acoplamento.....	33
Tabela 3 – Caso II: Valores na Saída do Inversor.	34
Tabela 4 – Caso II: Valores no Ponto de Acoplamento.	34
Tabela 5 – Caso III: Valores na Saída do Inversor.....	34
Tabela 6 – Caso III: Valores no Ponto de Acoplamento.	35
Tabela 7 – Caso IV: Valores na Saída do Inversor.....	35
Tabela 8 – Caso IV: Valores no Ponto de Acoplamento.....	35
Tabela 9 – Caso IV: Valores no Ponto de Acoplamento.....	36
Tabela 10 – Corrente de falta na barra 6 para os 3 casos.	36
Tabela 11 – Caso V: Tensão e corrente no ponto de acoplamento dos sistemas fotovoltaicos.	36
Tabela 12 – Caso VI: Tensão e corrente no ponto de acoplamento dos sistemas fotovoltaicos.	37
Tabela 13 – Corrente de Curto, Estimada x Medida.	45
Tabela 14 – Parâmetros do painel fotovoltaico escolhido.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BT	Baixa Tensão
EPC	Equipamento de Proteção Coletivo
EPI	Equipamento de Proteção Individual
IEC	Internacional Electrotechnical Commision
IHG	Irradiação Horizontal Global
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LVRT	Low-Voltage Ride Through
MT	Média Tensão
NBR	Norma Brasileira
PCC	Point of Common Coupling
PN	Junção do Diodo
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TC	Transformador de Corrente
VSC	Voltage Source Converter

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Contexto atual	15
1.2	Objetivos.....	16
1.3	Metodologia	17
1.4	Estrutura do trabalho.....	17
2	ARCO ELÉTRICO E ENERGIA INCIDENTE	19
2.1	O arco elétrico	19
2.2	Energia incidente	20
2.3	Arco elétrico e Energia Incidente em uma planta fotovoltaica	20
3	MÉTODOS TEÓRICOS PARA CÁLCULO DO CURTO-CIRCUITO DE UM PAINÉL FOTOVOLTAICO	23
3.1	O Filtro de Kalman.....	23
3.1.1	<i>Fundamentação teórica.....</i>	<i>24</i>
3.1.2	<i>Implementação do algoritmo</i>	<i>25</i>
3.1.3	<i>Resultados</i>	<i>25</i>
3.2	Estratégia de controle LVRT	26
3.2.1	<i>Topologia da integração do painel com o LVRT.....</i>	<i>27</i>
3.2.2	<i>Características do Curto-Circuito</i>	<i>28</i>
3.3	Contribuição em Sistemas de Potência	30
3.3.1	<i>Modelagem Matemática.....</i>	<i>30</i>
3.3.2	<i>Metodologia para Validação.....</i>	<i>31</i>
3.3.3	<i>Resultados Controlando-se a Energia Reativa</i>	<i>33</i>
3.3.4	<i>Resultados Sem o Controle da Energia Reativa.....</i>	<i>34</i>
3.3.5	<i>Resultados Para Vários Sistemas Fotovoltaicos.....</i>	<i>36</i>
3.4	Modelagem Matemática do Circuito	37
3.4.1	<i>Modelagem matemática</i>	<i>37</i>
3.4.2	<i>Fator de Idealidade do Diodo</i>	<i>39</i>
3.4.3	<i>Resistências em série e em paralelo</i>	<i>40</i>
3.4.3.1	<i>Resistência em paralelo.....</i>	<i>41</i>
3.4.3.2	<i>Resistência em série.....</i>	<i>41</i>
3.4.4	<i>Validação do Modelo</i>	<i>43</i>
3.4.5	<i>Resultados</i>	<i>44</i>

4	Estudo de Caso	46
4.1	Diagrama Unifilar	46
4.2	Circuito Equivalente	46
4.2.1	<i>Equivalente em Série</i>	47
4.2.2	<i>Equivalente em Paralelo</i>	48
4.3	Implementação	50
4.4	Resultados	51
5	CONCLUSÃO	54
5.1	Trabalhos Futuros	54
6	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

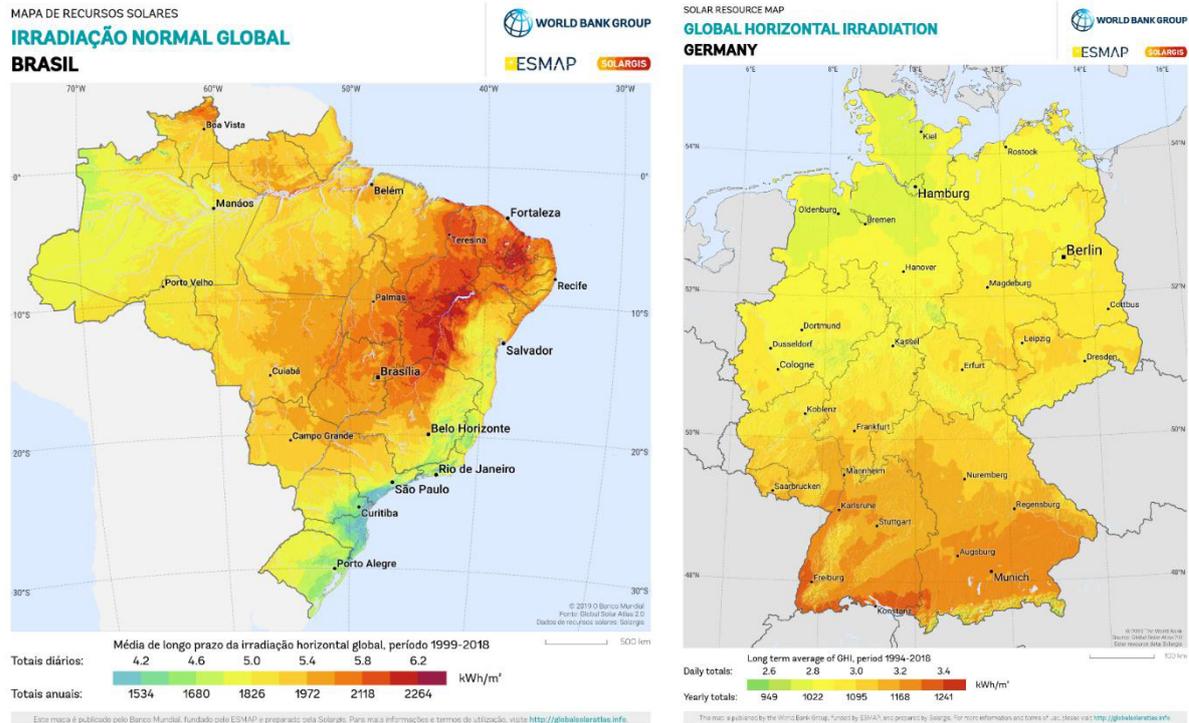
1.1 Contexto atual

Vivendo-se hoje em um mundo globalizado onde as informações viajam na velocidade da luz, a quantidade de informações que as pessoas recebem fazem com que a população tenha opiniões cada vez mais concisas acerca da realidade a sua volta, tal fenômeno pode ser observado, também, através de pesquisas [MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA (2012)] que mostram a evolução da consciência da população com relação ao meio ambiente e como isso afeta as suas vidas.

Nesse contexto é possível entender o aumento da demanda por fontes alternativas de energia, em especial, aqui no Ceará onde a quantidade de residências e estabelecimentos comerciais que geram a sua própria energia por meio de painéis fotovoltaicos aumentou 172%, entre 2019 e 2020, enquanto a média nacional foi de 136% para o mesmo período [AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL (2020)], resultado esse que pode ser entendido, também, pela adição de outro fator, a crise de abastecimento que vem gerando consecutivos aumentos nas tarifas de energia.

Estes fatores associados à incrível capacidade natural de geração de energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos do nosso país, que na sua pior região de incidência solar, tem 23,6% mais potencial para geração, medidos em IHG (kWh/m².ano), do que a Alemanha na sua melhor região, como é mostrado na Figura 1, reforçam que a geração distribuída têm elevado grau de viabilidade no nosso país, dados os contextos econômicos, sociais e ecológicos, além de mostrar que ainda estamos engatinhando no que se refere a utilização dessa tecnologia, afinal países com menor potencial para tal estão mais avançados e ainda há muito espaço para pesquisa, desenvolvimento e implementação dessa tecnologia no nosso país.

Figura 1 – Potencial de Geração solar (IHG) – Brasil versus Alemanha.



Fonte: (SOLARGIS, 1999-2018)

Por esse prisma, é natural que esse setor esteja aquecido economicamente, mas que também seja um terreno fértil para a produção de pesquisa e desenvolvimento. Diversos estudos são feitos buscando descobrir o impacto que a aplicação dessa tecnologia no SEP pode causar, tanto no Brasil quanto no mundo. Dentre essas vertentes de pesquisa, o estudo do curto-circuito no barramento CC das usinas fotovoltaicas, bem como sua simulação em programas visando a correta previsão e proteção do sistema, é bastante oportuno além de ser essencial para a garantia da segurança e confiabilidade do projeto.

1.2 Objetivos

O Objetivo Geral do presente trabalho é propor e estudar um modelo físico para o painel fotovoltaico, para que seja possível se calcular o valor do curto-circuito no barramento CC de uma planta fotovoltaica de 3MW que foi projetada para ser instalada no campus do Pici.

Os Objetivos Específicos desse trabalho são:

- Realizar revisão bibliográfica sobre o tema do arco elétrico e energia incidente;
- Realizar um estudo de caso em planta de 3MW projetada para o campus do Pici;

- Propor e utilizar um modelo matemático para medir o nível de curto na entrada da central inversora.

1.3 Metodologia

No presente trabalho, utilizaram-se dois instrumentos de coleta: pesquisa bibliográfica, que proporcionou base para a Fundamentação Teórica e pesquisa documental, documentos tais como diagrama unifilar da planta teórica.

Para a realização dos procedimentos de estudo de caso, foi utilizado o modelo matemático proposto, além do diagrama unifilar da planta, com o objetivo de calcular a contribuição no momento do curto caso ele ocorresse no barramento CC.

Foi desenvolvida uma simulação no software Simulink do Matlab, exclusivamente para esse estudo, utilizando as equações e os parâmetros exclusivos de cada tipo de painel presente na planta em estudo. Foi utilizado um diagrama unifilar atualizado, contendo todos os equipamentos da planta fotovoltaica, como os transformadores, barramentos, cabos e suas dimensões específicas, entre outros.

A partir dessas informações estudadas e coletadas sobre a planta, foi possível realizar a simulação da condição de curto, atentando-se para a correta estimativa dos parâmetros dos painéis, tomando cuidado sempre para que a fundamentação teórica estivesse fielmente representada pela simulação, ocasionando na correta coleta dos dados.

1.4 Estrutura do trabalho

A estrutura do trabalho é dividida nos seguintes capítulos:

No Capítulo 2, é apresentado um estudo sobre o arco elétrico e sobre a energia incidente, mostrando sua fundamentação teórica, suas características, suas causas, e um breve estudo teórico do histórico desses fenômenos em plantas fotovoltaicas.

O Capítulo 3 trata dos métodos de cálculo da contribuição de uma planta fotovoltaica, partindo, inicialmente, da aproximação através do filtro de Kalman, que possibilita analisar essa grandeza sem o erro de medição característico de outros métodos. Passando pela contribuição em sistemas de potência através da análise da estratégia de controle o que leva a estudar o controle LVRT e a sua aplicação em um diagrama unifilar teórico de um sistema de potência, estudando-se vários casos, para que seja possível analisar se a estratégia de controle

é capaz de alterar a contribuição trifásica do curto, bem como qual estratégia será capaz de reduzir o nível de curto. Finalmente, chegando na proposição e no estudo de um modelo matemático que busca aproximar a resposta de um painel fotovoltaico, analisando o equacionamento teórico e testando o modelo em um banco de dados extraído da pesquisa bibliográfica.

No Capítulo 4, é apresentado o estudo de caso, onde se propôs uma generalização do modelo visto no capítulo 3, para que fosse possível de simular de maneira simples o arranjo de 21 painéis, em série, por 180 painéis, em paralelo. Simulação tal que necessitaria de grande esforço computacional e humano para ser feita sem tal generalização, já que desenhar cada circuito iria demandar além de tempo, muita memória.

Por fim, no Capítulo 5, é mostrada a conclusão do trabalho, apresentando as considerações finais, as melhorias proporcionadas pela realização do estudo de caso e propostas previsões para a continuação da pesquisa em trabalhos futuros.

2 ARCO ELÉTRICO E ENERGIA INCIDENTE

Neste capítulo, são discutidos os efeitos, as características, as causas do arco elétrico e da energia incidente, com o objetivo de trazer à tona a necessidade do cálculo do curto-circuito em sistemas de potência e, de modo especial, em usinas fotovoltaicas.

2.1 O arco elétrico

De acordo com Mardegan e Parise (2018b), o arco elétrico é uma descarga que ocorre quando há uma falha de isolamento em um ponto energizado, quando a diferença de tensão é tamanha que rompe o seu dielétrico, com referencial à terra, à massa ou entre dois potenciais diferentes, e que pode ser exemplificado como sendo um fluxo de descarga entre dois eletrodos através de um meio isolante, como o gás ou vapor. Na ocorrência desse fenômeno, acontece transferência de calor proveniente do curto-circuito, seja ele entre fases ou fase-terra, capaz de liberar energia suficiente para fundir o metal, expandir rapidamente a massa de ar, gerar ondas sonoras, ondas de pressão, luz ultravioleta entre outros.

Vários fatores são capazes de influenciar nas características de um arco elétrico na indústria ou em equipamentos de potência, como magnitude da corrente de curto-circuito, duração do arco, a geometria dos condutores de alimentação, a proximidade entre os equipamentos afetados, a direção com que o arco está constituído e dependendo da tensão os equipamentos podem estar espaçados de maneira diferente fazendo com que para a mesma condição de falta o arco libere mais energia, de modo que a energia que um trabalhador ou usuário seria exposto em um acidente sempre varia dependendo de onde trabalha, de como os equipamentos estão arranjados e da roupa que este estaria usando. (HOAGLAND, Hugh *et al.*, 2016).

Um arco decorrente de uma falta nada mais é que um curto-circuito através do ar ocasionado por um raio direto ou indireto, esse raio aparece entre as extremidades que estão carregadas e gera impulsos luminosos. O arco, quando decorrente de uma falta, é classificado a depender das características da falta que o gerou (DADDA, Samia *et al.*, 2018), sendo chamado de primário, quando é uma falta transitória e monofásica, e secundário quando o sistema já comandou a abertura monopolar da falta, e o arco passou a ser alimentado pelo acoplamento com as fases ainda fechadas após a abertura da fase sob falta (CÂMARA, 2010).

2.2 Energia incidente

A energia incidente é a quantidade de energia transmitida por uma superfície, a uma certa distância da fonte, gerada durante um evento de arco elétrico de acordo com a IEEE 1584 – 2018 (2018).

A energia incidente, por padrão, é expressa em calorias por centímetro quadrado (cal/cm^2) mas pode ser expressa, também, em joules por centímetro quadrado (J/cm^2). Geralmente esse valor é usado para medir o risco e as consequências da ocorrência de um arco elétrico. Pode ser utilizada para decidir roupas resistentes a chamas, bem como toda a gama de EPIs, equipamentos de proteção individual, aos quais os profissionais que estiveram naquela subestação, ou instalação, devem fazer uso. (NFPA 70E, 2021).

A norma IEEE 1584 - 2018 (2018) fez uso de uma metodologia de cálculo para fazer uma estimativa da energia incidente em algum ponto do sistema elétrico, para ser capaz de medir a probabilidade da ocorrência de arcos elétricos, bem como medir os problemas que essa tal ocorrência geraria na instalação em questão, sendo capaz, assim, de decidir quais as melhores atitudes para a proteção dos profissionais bem como a instalação.

De acordo com a NFPA 70E (2021) se a exposição ao arco elétrico tiver energia incidente de até $1,2 \text{ cal}/\text{cm}^2$, a pele humana apresenta limite de suportabilidade capaz de garantir a sobrevivência e terá, como consequência, queimaduras de segundo grau, preservando funções vitais mais primordiais, ultrapassando-se esse valor, faz-se necessária a adoção de medidas como tentar reduzir o nível dessa irradiação de energia, ou utilização dos EPIs, para garantir que as funções vitais serão preservadas.

2.3 Arco elétrico e Energia Incidente em uma planta fotovoltaica

Os perigos do arco elétrico em sistemas fotovoltaicos ou em quaisquer sistemas de corrente contínua, podem acontecer devido a problemas imprevistos nos equipamentos, mesmo quando estes estão bem instalados e com a manutenção em dia, pode-se citar, por exemplo, que uma simples parte de um interruptor, como uma mola, pode quebrar, voltar e gerar um curto-circuito na barra em operação, somado a isso, as extremas condições de operação a que os painéis são expostos como chuva, vento, variações de temperatura e etc., podem fazer com que os isoladores entrem em contato com água provocando, assim, um curto, já que esses equipamentos são instalados ao ar livre. (DOAN; DERER, 2015)

No cálculo da energia incidente para sistemas fotovoltaicos de potência geralmente se dividem em cálculo da energia incidente na porção CA, e depois na porção CC.

A porção CA do sistema deve ser modelada, e a Energia Incidente pode ser calculada usando a metodologia mostrada na norma IEEE 1584-2018 (2018).

Para a porção CC, pode-se calcular a Energia Incidente seguindo o método fruto da pesquisa de Doan (2010), a partir das equações básicas a seguir.

Considerando apenas a parte resistiva pode-se afirmar que:

$$P_{arc} = V_{arc}^2 / R_{arc}. \quad (2.1)$$

P_{arc} : Potência do arco elétrico.

V_{arc} : Tensão do arco em volts.

R_{arc} : Resistência do arco em ohms.

Mas pelo Teorema da máxima transferência de potência, a mesma ocorre quando a resistência em questão é igual a resistência equivalente do sistema, e por conseguinte a tensão, na máxima transferência de potência, deve ser metade da tensão do sistema, de modo que:

$$P_{máx} = (V_{sis}/2)^2 / R_{sis}. \quad (2.2)$$

Como a transferência de potência irá ocorrer de modo constante, basta multiplicar pelo tempo de duração do arco elétrico:

$$E_{máx} = \frac{V_{sis}^2 \cdot t}{4 \cdot R_{sis}}. \quad (2.3)$$

Essa equação está em J, podendo ser convertida para cal:

$$E_{máx} = \frac{0,293 \cdot V_{sis}^2 \cdot t}{4 \cdot R_{sis}}. \quad (2.4)$$

A Energia Incidente deve ser calculada em cal/cm², portanto deve-se dividir a energia máxima transferida pela área, em cm², se a energia for dispersada através de uma esfera, então, a área é dada por:

$$Area = 4 \cdot \pi \cdot D^2. \quad (2.5)$$

Logo:

$$EI_{máx} = \frac{0,293 \cdot V_{sis}^2 \cdot t}{4 \cdot R_{sis} \cdot 4 \cdot \pi \cdot D^2}.$$

$$EI_{máx} = 5,829 \cdot 10^{-3} \frac{V_{sis}^2 \cdot t}{R_{sis} \cdot D^2}. \quad (2.6)$$

Onde:

$EI_{máx}$: Energia Incidente Máxima transferida.

V_{sis} : Tensão do sistema em volts.

R_{sis} : Resistência do sistema em ohms.

t : Tempo de duração do arco elétrico.

D : Distância ao trabalhador em centímetros

Deve-se acrescentar, por prudência, um fator de segurança a essa equação, para que a estimativa da Energia Incidente em um sistema CC esteja completa, e esse fator pode chegar a ser 3 vezes maior que o fator calculado para Energia Incidente em um sistema AC. (DOAN, 2010)

Porém diferente dos outros sistemas de potência em CC, no sistema fotovoltaico a potência máxima deve ser calculada a partir de testes ou dos dados do fabricante (DOAN; DERER, 2015) de modo que a equação (6) não será adequada, geralmente os fabricantes geram várias curvas com a potência máxima, uma para cada nível de irradiação solar. Portanto deve-se utilizar os valores I_{mp} e V_{mp} , que são, respectivamente, a corrente e a tensão no ponto de máxima potência do painel fotovoltaico em questão. Logo:

$$EI_{fv} = \frac{0,293 \cdot V_{mp} \cdot I_{mp} \cdot t}{4 \cdot \pi \cdot D^2}.$$

$$EI_{fv} = 2,331 \cdot 10^{-2} \frac{V_{mp} \cdot I_{mp} \cdot t}{D^2}. \quad (2.7)$$

Onde:

EI_{fv} : Energia Incidente Máxima transferida em um painel fotovoltaico.

V_{mp} : Tensão no ponto de máxima potência.

I_{mp} : Corrente no ponto de máxima potência.

t : Tempo de duração do arco elétrico.

D : Distância ao trabalhador em centímetros

Utilizando essa equação pode-se estimar a Energia Incidente na ocorrência de um arco elétrico, em uma planta fotovoltaica, em cal/cm², quando o trabalhador estiver a uma distância de D centímetros.

3 MÉTODOS TEÓRICOS PARA CÁLCULO DO CURTO-CIRCUITO DE UM PAINÉL FOTOVOLTAICO

Neste capítulo, serão apresentados os principais métodos de cálculo de curto-circuito dos painéis fotovoltaicos, bem como suas aplicações e limitações.

3.1 O Filtro de Kalman

O Dr. Rudolf Emil Kalman foi o coinventor do filtro de Kalman, uma técnica matemática capaz de fazer estimativas dos valores reais de uma variável que está sendo medida, mesmo quando a medição está contaminada com ruídos e outras incertezas. Teoricamente o filtro de Kalman faz estimativas para sistemas lineares dinâmicos, quando esses estão sob a ação de ruídos, o que faz dele ótimo quando se tenta fazer qualquer estimativa do erro de uma função quadrática. (GREWAL; ANDREWS, 2001)

Além do filtro de Kalman, existem vários métodos capazes de fazer aproximações de um fenômeno, *Bayesian, minimum mean square estimation* (MMSE), porém cada método é feito para uma determinada necessidade e, dentro das condições do problema, ele pode ser melhor ou pior que outras ferramentas que tem objetivos semelhantes. No que se refere a obtenção de variáveis de estado sob ação de ruídos, o filtro de Kalman é ideal. (E. Mukherjee *et al.*, 2014)

Sendo a tensão de circuito aberto (V_{oc}) e a corrente de curto-circuito (I_{sc}) variáveis de estado de um painel fotovoltaico, e sendo elas também difíceis de se estimar por variarem de acordo com as condições climáticas, pois dependem de variáveis como irradiação solar instantânea, é natural de se pensar na utilização do método de estimativa proposto por Kalman, que tem, por objetivo, sistemas representados por variáveis de estado. Como os sensores conectados a um único painel não vão medir corretamente as variáveis, já que eles irão medir distúrbios e ruídos, utilizar os valores lidos por eles, para alimentar o filtro de Kalman e a partir daí receber a aproximação, faz com que esse método seja unicamente investigativo, não é possível, através dele, afirmar algo sobre uma planta com vários painéis, são muitas variáveis. (E. Mukherjee *et al.*, 2014)

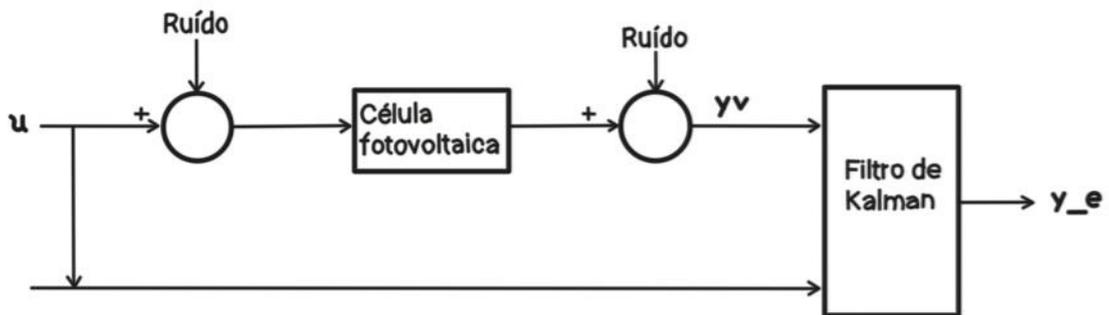
Segundo Grewal e Andrews (2001), essa é uma ferramenta matemática, não física, portanto não é capaz de resolver o problema sozinha, sempre deve-se pensar se esse método poderá ser usado ou não, deve-se verificar o grau de convergência, e por conseguinte a eficácia desse filtro, no entanto este algoritmo consegue facilitar a busca pelo valor real de uma variável

mesmo quando há a presença de perturbações, se trata de processos recursivos, mecânicos que fazem com que o processo de obtenção daquela variável seja mais eficiente.

3.1.1 Fundamentação teórica

Como exposto nos estudos de Mukherjee *et al.* (2014), a figura 2 mostra o esquemático da integração do painel fotovoltaico com o filtro de Kalman.

Figura 2 – Diagrama do painel fotovoltaico com o filtro de Kalman.



Fonte: adaptado de Mukherjee *et al.* (2014).

Onde:

u : O fluxo de irradiação solar.

y_v : Tensão do sistema em volts.

y_e : Saída do filtro de Kalman.

Como pode-se notar, as variáveis medidas alimentam o circuito somadas com ruídos aleatório e que deve ser renovado a cada iteração. Com isso no trabalho de Mukherjee *et al.* (2014), foi escolhido um modelo linear para a modelagem da célula fotovoltaica, onde a corrente de curto-circuito varia linearmente com o fluxo de irradiação, se baseando na expectativa de que a corrente de falta irá começar de zero, quando o fluxo de irradiação for zero, e depois aumentar 10mA a cada segundo, a depender da variação da irradiação solar, de modo que a dinâmica do sistema, representada pela letra Φ , para $dt=0,1$ segundos, seja:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.1.1)$$

Devem ser apresentadas duas variáveis importantes, σ_{mod} e σ_{med} , que são, respectivamente, o desvio padrão do modelo e o desvio padrão da medição, ambos variam de 0,1 a 1 e a partir delas são encontradas as variáveis, P que é a matriz confiança do modelo e R

que é a covariância do erro de medição, de tal sorte que:

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_{mod}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{mod}^2 \end{bmatrix}. \quad (3.1.2)$$

$$R = \sigma_{med}^2. \quad (3.1.3)$$

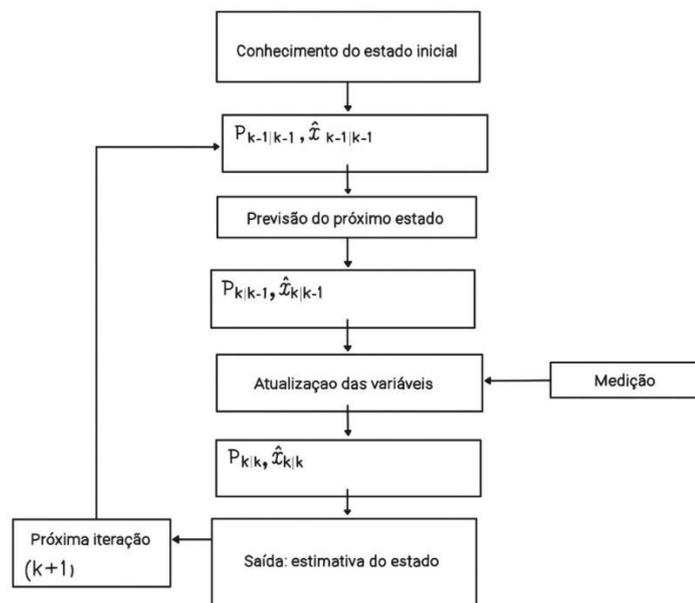
É importante frisar que foi pressuposto que o modelo adotado tem matriz de covariância nula, ou seja, a matriz $Cov_{mod} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, e que o valor real da corrente, X_{true} , deve ser conhecido durante todo o processo.

Sabendo-se que a matriz de medição, M , deve iniciar, na primeira iteração, com os valores $M = [1 \ 0]$. Onde, posteriormente, o primeiro termo será o valor medido da corrente de falta, e o segundo o valor a derivada primeira da corrente, que é zero nesse caso.

3.1.2 Implementação do algoritmo

Sabendo-se os valores iniciais das variáveis de estado, x_{k-1} calcula-se o valor de P_{k-1} inicial de acordo com a equação (2), após isso é calculado o P_k e o x_k , para a iteração atual, e recebendo-se o valor medido dessa iteração é possível calcular o valor da confiança para a próxima iteração bem como as variáveis de estado, então o algoritmo se realimenta e repete o mesmo processo até a convergência. Tal qual o esquemático a seguir.

Figura 3 – Esquemático do algoritmo do filtro de Kalman.

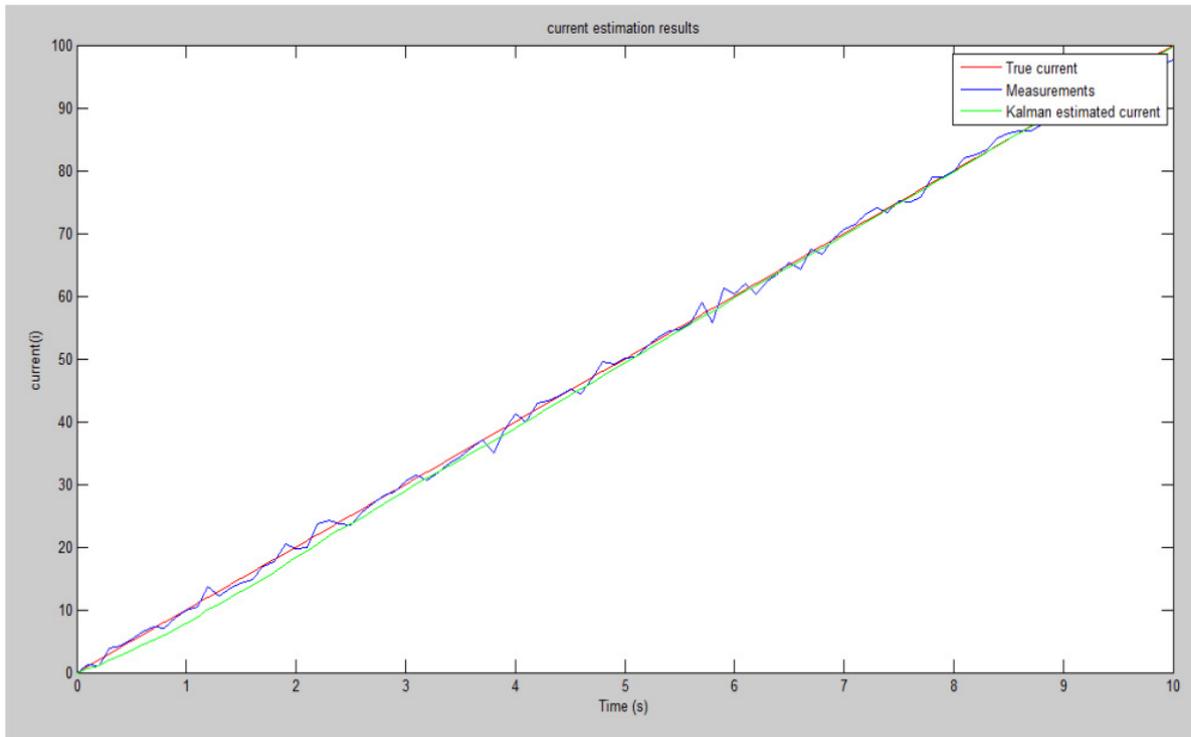


Fonte: adaptado de Mukherjee *et al.* (2014).

3.1.3 Resultados

Simulando esse algoritmo no MATLAB, é possível notar que o filtro de Kalman é perfeitamente capaz de estimar o sistema linear em questão (E. Mukherjee *et al.*, 2014), o que pode ser notado com as figuras a seguir onde se comparou a curva da corrente de falta real, a estimada e a medida.

Figura 4 – Resultado da Simulação



Fonte: Mukherjee *et al.* (2014).

Onde de vermelho está representada a corrente real, de azul a corrente medida com um ruído aleatório e de verde a estimativa do algoritmo.

Portanto, de acordo com os estudos de Mukherjee *et al.* (2014), quando se têm um sistema linear preciso, o filtro de Kalman consegue fazer uma estimativa muito próxima a realidade.

3.2 Estratégia de controle LVRT

Segundo Liu *et al.* (2019), com o objetivo de tornar o sistema mais estável e mais seguro, muitas instalações vêm adotando o uso da estratégia de controle LVRT em usinas fotovoltaicas, contudo esse tipo de instalação é única quanto ao modo de geração e a topologia e essas características associadas ao LVRT entregam um padrão de falta muito diferente dos clássicos motores síncronos, de modo que a complexa corrente de falta gera efeitos indesejados no relés de proteção diminuindo a sua confiabilidade, ou até fazendo com que a proteção não atue.

Portanto, é de suma importância que seja estabelecido um modelo para que a corrente de falta seja estudada. A descoberta de uma solução analítica para o cálculo do curto-circuito será capaz de gerar implicações práticas na precisão e na confiabilidade das proteções, garantindo, assim, a integridade física da instalação e de quem a estiver utilizando. (LIU *et al.*, 2019)

3.2.1 Topologia da integração do painel com o LVRT

No sentido de controlar a tensão de saída do painel fotovoltaico, foi acrescentado um conversor Boost antes do inversor, configurando um segundo estágio, essa topologia também é capaz de garantir que a tensão na saída seja a tensão de máxima potência.

Decorrente dessa topologia, segundo Liu *et al.* (2019), pode-se tirar as seguintes conclusões.

A potência de saída será definida como:

$$\begin{cases} P = u_{gd}i_{gd} + u_{gq}i_{gq} = U_g i_{gd} \\ Q = u_{gq}i_{gd} - u_{gd}i_{gq} = -U_g i_{gq} \end{cases} \quad (3.2.1)$$

Sendo o fator de potência natural do painel fotovoltaico unitário (LIU *et al.*, 2019), e levando em consideração a estratégia de controle da tensão através do conversor Boost, pode-se afirmar:

$$\begin{cases} u_{sd} = (k_P + k_I/s)(i_d^* - i_d) + Ri_d + \omega_1 Li_q + u_{gd} \\ u_{sq} = (k_P + k_I/s)(i_q^* - i_q) + Ri_q - \omega_1 Li_d + u_{gq} \\ i_{gd0}^* = (k_{vP} + k_{vI}/s)(u_{dc}^* - u_{dc}) \\ i_{gq0}^* = 0 \end{cases} \quad (3.2.2)$$

Onde as variáveis com asterisco “*” são os valores escolhidos para controle, k_{vp} e k_{vi} são os valores P e I do controlador PI para a tensão de saída, k_p e k_i são as constantes P e I do controlador PI para o filtro interno da corrente.

Em caso de falta simétrica a equação de controle do LVRT é:

$$\begin{cases} i_{gq1}^* = \begin{cases} 0 & U_T > 0.9 \\ 1.5(0.9 - U_T) & 0.2 \leq U_T \leq 0.9 \\ i_{gmax}^* & U_T < 0.2 \end{cases} \\ i_{gd1}^* = \min(i_{gd0}^*, \sqrt{i_{gmax}^*{}^2 - i_{gq1}^*{}^2}) \end{cases} \quad (3.2.3)$$

Tal que i_{gq1}^* e i_{gd1}^* são os valores de controle para a corrente após a falta, i_{gmax}^*

é o valor de controle para a corrente máxima de saída do inversor, e U_T é a tensão de sequência positiva após a falta.

Caso a falta seja assimétrica, deve-se utilizar um PLL para encontrar a fase e a amplitude da componente de sequência positiva da tensão de saída, e então calcula-se os valores de controle de acordo com a equação (3), fazendo com que a corrente de saída do painel chegue rapidamente aos valores de controle e não haja, na saída, componente de sequência negativa, mesmo em uma falta assimétrica.

3.2.2 Características do Curto-Circuito

Sabendo-se que o tempo de duração da falta geralmente é muito pequeno pode-se dizer que as condições externas como, irradiação solar e temperatura, são constantes, portanto a condição de tensão de saída para o ponto de máxima potência se mantém constante, com isso, durante a falta, a tensão no barramento CC flutua fazendo com que o conversor Boost adequa a tensão para que ela seja a especificada, em outras palavras o conversor ajusta a transferência de potência ativa tornando-a constante mesmo na condição de falta, logo o painel fotovoltaico somado ao conversor podem ser percebidos como uma fonte de potência ativa na condição de falta. (LIU *et al.*, 2019)

Como indicado por Liu *et al.* (2019), o sistema mostrado na figura 8 pode ser expresso através da seguinte equação de segunda ordem:

$$D^2\Delta u_{dc} + \frac{k_p \cdot u_{gd}}{u_{dc}^* \cdot C} D\Delta u_{dc} + \frac{k_i \cdot u_{gd}}{u_{dc}^* \cdot C} \Delta u_{dc} = 0. \quad (3.2.4)$$

Onde D^2 é o operador diferencial de segunda ordem em relação ao tempo, e D é o operador diferencial de primeira ordem, ou seja, essa é uma clássica equação diferencial de segunda ordem homogênea, com as seguintes condições iniciais:

$$\begin{cases} \Delta u_{dc}(t_0) = 0 \\ D\Delta u_{dc}(t_0) = \frac{\delta P_0}{u_{dc}^* \cdot C} \end{cases} \quad (3.2.5)$$

Logo pode-se escrever a equação característica como:

$$\lambda^2 + \frac{k_p \cdot u_{gd}}{u_{dc}^* \cdot C} \lambda + \frac{k_i \cdot u_{gd}}{u_{dc}^* \cdot C} = 0. \quad (3.2.6)$$

Sendo assim essa equação possui dois pares de raízes possíveis, essas raízes podem ser ambas reais ou ambas complexas.

- **Se ambas as raízes forem reais.**

$$\lambda_1 = \frac{k_p \sigma - \sqrt{k_p^2 \sigma^2 - k_i \sigma}}{2}$$

$$\lambda_2 = \frac{k_p \sigma + \sqrt{k_p^2 \sigma^2 - k_i \sigma}}{2}$$

$$\text{Onde: } \sigma = \frac{u_{gd}}{u_{dc}^* \cdot C}$$

De tal modo que a solução para a equação já levando em consideração as condições iniciais é:

$$\Delta u_{dc}(t) = C_1 e^{-\lambda_1 t} - C_1 e^{-\lambda_2 t}$$

$$C_1 = \frac{\delta P_0}{u_{dc}^* \cdot C \cdot \sqrt{k_p^2 \sigma^2 - k_i \sigma}}$$

Com isso têm-se as equações para a corrente de saída, utilizando a equação (3.2.5).

$$\begin{cases} i_{gd}(t) = \frac{P_0}{u_{gd}} + C_2 e^{-\lambda_1 t} - C_3 e^{-\lambda_2 t} \\ i_{gq}(t) = i_{gq}^* \end{cases} \quad (3.2.7)$$

$$\text{Sendo: } C_2 = k_p C_1 - \frac{k_i C_1}{\lambda_1} \text{ e } C_3 = k_p C_1 - \frac{k_i C_1}{\lambda_2}$$

Logo, pode-se obter as variáveis no sistema trifásico:

$$\begin{cases} i_{ga}(t) = C_4 \cos(w_1 t + \varphi_1 + \theta_1) + C_2 e^{-\lambda_1 t} \cos(w_1 t + \varphi_1) - C_3 e^{-\lambda_2 t} \cos(w_1 t + \varphi_1) \\ i_{gb}(t) = C_4 \cos(w_1 t + \varphi_1 + \theta_1 - \frac{2}{3}\pi) + C_2 e^{-\lambda_1 t} \cos(w_1 t + \varphi_1 - \frac{2}{3}\pi) - C_3 e^{-\lambda_2 t} \cos(w_1 t + \varphi_1 - \frac{2}{3}\pi) \\ i_{gc}(t) = C_4 \cos(w_1 t + \varphi_1 + \theta_1 + \frac{2}{3}\pi) + C_2 e^{-\lambda_1 t} \cos(w_1 t + \varphi_1 + \frac{2}{3}\pi) - C_3 e^{-\lambda_2 t} \cos(w_1 t + \varphi_1 + \frac{2}{3}\pi) \end{cases}$$

$$\text{Sendo: } C_4 = \sqrt{\left(\frac{P_0}{u_{gd}}\right)^2 + (i_{gq}^*)^2}$$

- **Se ambas as raízes forem complexas.**

Nesse caso a resposta vai ser da forma:

$$\Delta u_{dc}(t) = A_1 e^{-\alpha t} \text{sen}(-\beta t) \quad (3.2.8)$$

Onde:

$$\alpha = k_p \sigma / 2, \beta = \sqrt{4k_i \sigma - k_p^2 \sigma^2} / 2, A_1 = \frac{2\delta P_0}{u^*_{dc} \cdot C \cdot \sqrt{4k_i \sigma - k_p^2 \sigma^2}}$$

Portanto a solução para a corrente de saída será:

$$\begin{cases} i_{ga}(t) = A_2 e^{-\alpha t} \text{sen}(-\beta t - \theta_2) \\ i_{gq}(t) = i^*_{gq} \end{cases} \quad (3.2.9)$$

$$\text{Sendo: } A_2 = A_1 \sqrt{\frac{k_i}{\sigma}} \text{ e } \theta_2 = \arctan\left(\frac{2\sqrt{4k_i \sigma - k_p^2 \sigma^2}}{3k_p \sigma}\right).$$

Pode-se escrever, então, as coordenadas no sistema trifásico:

$$\begin{cases} i_{ga}(t) = C_4 \cos(w_1 t + \varphi_1 + \theta_1) + A_3 \text{sen}(w_2 t - \theta_2 + \varphi_1) - A_3 \text{sen}(w_3 t - \theta_2 + \varphi_1) \\ i_{gb}(t) = C_4 \cos\left(w_1 t + \varphi_1 + \theta_1 - \frac{2}{3}\pi\right) + A_3 \text{sen}\left(w_2 t - \theta_2 + \varphi_1 - \frac{2}{3}\pi\right) - A_3 \text{sen}\left(w_3 t - \theta_2 + \varphi_1 - \frac{2}{3}\pi\right) \\ i_{gc}(t) = C_4 \cos\left(w_1 t + \varphi_1 + \theta_1 + \frac{2}{3}\pi\right) + A_3 \text{sen}\left(w_2 t - \theta_2 + \varphi_1 + \frac{2}{3}\pi\right) - A_3 \text{sen}\left(w_3 t - \theta_2 + \varphi_1 + \frac{2}{3}\pi\right) \end{cases}$$

3.3 Contribuição em Sistemas de Potência

Devido ao baixo valor da corrente de falta dos painéis fotovoltaicos, a contribuição desse tipo de equipamento geralmente é ignorada no que se refere estudo de proteção, porém com a integração em massa da geração distribuída, a modelagem e o cálculo dessas correntes, afim de garantir a correta proteção das instalações bem como a escolha dos equipamentos capazes de fazer tal proteção, se torna extremamente necessário. (BRACALE *et al.*, 2017)

Segundo Bracale *et al.* (2017), vários estudos foram feitos para analisar a dinâmica dos painéis fotovoltaicos em diversas condições de falta, porém buscando estudar especificamente a resposta do inversor, o que exige muito tempo em simulações que necessitam de poder computacional, já que é necessária a representação no domínio do tempo, o que torna inviável esse tipo de abordagem para a simulação da penetração em massa desses sistemas de geração.

3.3.1 Modelagem Matemática

Supondo-se que a planta seja conectada à rede em um ponto h qualquer, de modo a contribuir com a corrente de curto, pode-se afirmar segundo Bracale *et al.* (2017):

$$P_h = \eta_{fv} P_{ct} - R_{trafo} I_h^2. \quad (3.3.1)$$

Onde:

P_h : Potência ativa que sai no ponto h.

η_{fv} : É a eficiência levando em consideração o painel, inversor e o filtro.

P_{ct} : É a potência do painel, no momento da falta, que depende das condições ambientais.

R_{trafo} : É a resistência do transformador.

N : O número de células fotovoltaicas em série.

Partindo dessa equação, pode-se chegar as equações das correntes de curto nas coordenadas de Park, como demonstrado nos estudos de Bracale *et al.* (2017).

$$i_{df} = |\bar{V}_f| \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\theta_{\bar{I}_f} - \theta_{\bar{V}_f}). \quad (3.3.2)$$

$$i_{qf} = |\bar{I}_f| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\theta_{\bar{I}_f} - \theta_{\bar{V}_f}). \quad (3.3.3)$$

Sendo:

$$\bar{V}_f = (R_{tr} + jX_{tr}) \cdot \bar{I}_{pccf} + \bar{V}_{pccf}. \quad (3.3.4)$$

$$\bar{I}_f = \bar{I}_{pccf} - j \frac{(R_{tr} + jX_{tr}) \cdot \bar{I}_{pccf} + \bar{V}_{pccf}}{X_C}. \quad (3.3.5)$$

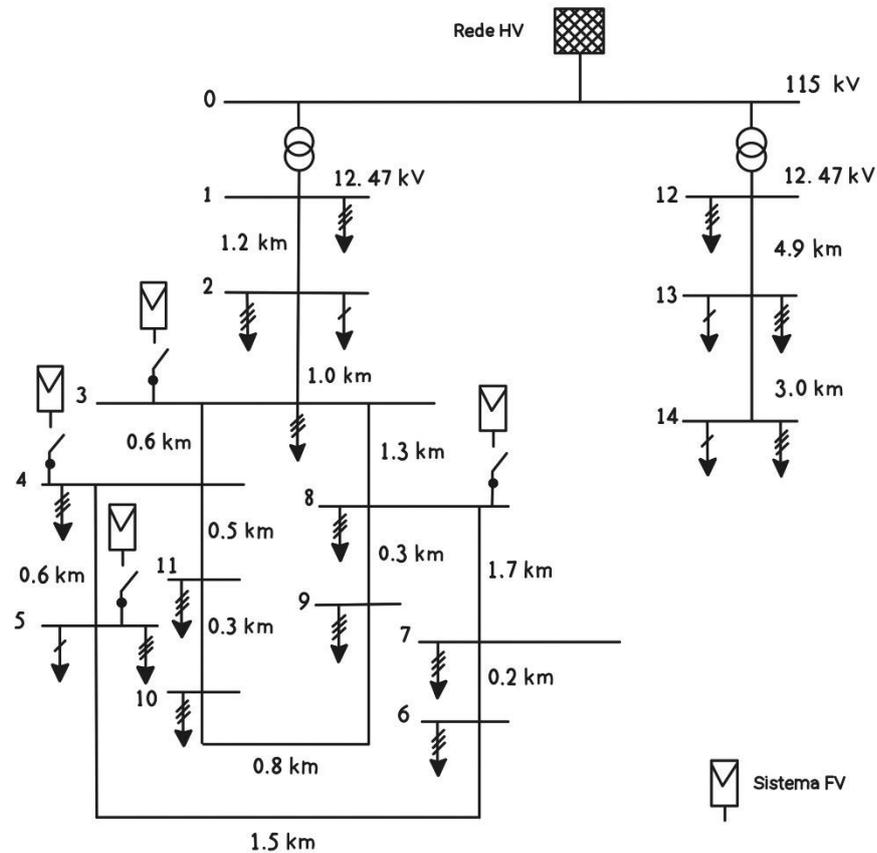
Têm-se que \bar{V}_{pccf} e \bar{I}_{pccf} , são respectivamente o vetor da tensão e da corrente no ponto de acoplamento, R_{tr} e X_{tr} são respectivamente a resistência e a reatância do transformador e os ângulos $\theta_{\bar{I}_f}$ e $\theta_{\bar{V}_f}$ são respectivamente as fases da corrente e da tensão na saída do inversor.

3.3.2 Metodologia para Validação

Para validação do modelo apresentado, foram simuladas, no MATLAB, as respostas para o acréscimo de um único grupo gerador, considerando vários valores para a irradiação, G , e para a resistência de falta, R_f , sempre com a temperatura da junção igual a 40°C, então esses valores foram confrontados, com isso se torna possível fazer uma aproximação para a contribuição desse tipo de geração na corrente de falta. (BRACALE *et al.*, 2017)

Para isso foi simulado este acréscimo ocorrendo na barra 3 do diagrama unifilar a seguir.

Figura 5 – Diagrama Unifilar Local.



Fonte: adaptado de Bracale *et al.* (2017)

Tal grupo gerador têm a capacidade de gerar 1,4 MW de potência, com inversor de 1,5 MW, um filtro passa baixa e essa estrutura acoplada a um transformador de 1,5 MVA com relação de transformação de 0,48/12,47kV.

O controle da energia ativa ocorre através de um controlador, que deve ser capaz de entregar o valor máximo dessa variável em qualquer condição de irradiação, e quanto a energia reativa pode-se considerar 2 métodos, o uso de um controlador de reativo a fim de garantir o fator de potência unitário no ponto de acoplamento, garantindo que a corrente do inversor não ultrapasse 1,2 p.u ou seja, $i_d^* = 2860 A$ e $i_q^* = 1093 A$, ou pode-se ignorar o uso desse controlador desde que seja garantido o valor constante de $i_q^* = 42 A$, o que irá fazer com que $i_d^* = 2860 A$, mesmo sem o controlador. (BRACALE *et al.*, 2017)

3.3.3 Resultados Controlando-se a Energia Reativa

Utilizando-se do controle da energia reativa, foram simulados dois casos, Caso I: A irradiação solar era de $G = 450 \text{ W/m}^2$, e a falta ocorreu na barra 6, mostrada na figura 7, com resistência de falta da ordem de $R_f = 1 \Omega$, e Caso II: A irradiação foi de $G = 850 \text{ W/m}^2$, na barra 6 e com $R_f = 0 \Omega$. (BRACALE *et al.*, 2017)

No primeiro caso a corrente de curto, na barra 6, foi de 2,5 kA e a corrente no inversor não chegou ao limite, de modo que as potências, ativa e reativa, na saída do inversor se mantiveram dentro do esperado, as tabelas 2 e 3 mostram os valores simulados e previstos analiticamente durante a falta, respectivamente, na saída do inversor e no ponto de acoplamento.

Tabela 1 – Caso I: Valores na Saída do Inversor.

	Primeiros Ciclos		Regime Estacionário	
	Analíticos	Simulados	Analíticos	Simulados
$P \text{ (kW)}$	576,6	572,9	576,0	573,6
$Q \text{ (kVAr)}$	-2,890	7,980	81,21	90,36
$v_d \text{ (V)}$	191,9	191,3	196,7	195,9
$v_q \text{ (V)}$	0,0	0,2550	0,0	-0,5199
$i_d \text{ (A)}$	2003	1993	1953	1949
$i_q \text{ (A)}$	-10,04	85,440	-275,3	-284,7

Fonte: adaptado de Bracale *et al.* (2017)

Tabela 2 – Caso I: Valores no Ponto de Acoplamento.

	Primeiros Ciclos		Regime Estacionário	
	Analíticos	Simulados	Analíticos	Simulados
$V_{PA} \text{ (kV)}$	3,453	3,415	3,458	3,431
$I_{PA} \text{ (A)}$	54,51	54,31	53,77	53,76
$\varphi_{PA} \text{ (}^\circ\text{)}$	-8,820	-8,642	3e-12	-2e-04
$P_{PA} \text{ (kW)}$	558,1	554,4	558,0	555,5
$Q_{PA} \text{ (kVAr)}$	-86,98	-84,61	3e-06	0,0017

Fonte: adaptado de Bracale *et al.* (2017)

No segundo caso a corrente de curto, na barra 6, foi de aproximadamente 2,9 kA e nesse caso as correntes chegaram aos limites, portanto o inversor não foi capaz de garantir o fator de potência unitário no ponto de acoplamento, tal qual era previsto pelo modelo matemático proposto, as tabelas 4 e 5 mostram as mesmas variáveis das tabelas passadas, porém, para o caso II.

Tabela 3 – Caso II: Valores na Saída do Inversor.

	Primeiros Ciclos		Regime Estacionário	
	Analíticos	Simulados	Analíticos	Simulados
P (kW)	462,5	466,1	536,6	537,3
Q (kVAr)	16,5	22,84	205,1	207,4
v_d (V)	107,8	108,2	125,1	125,0
v_q (V)	0,0	0,4054	0,0	-0,2498
i_d (A)	2860	2860	2860	2860
i_q (A)	-102,1	-131,2	-1093	-1093

Fonte: adaptado de Bracale *et al.* (2017)

Tabela 4 – Caso II: Valores no Ponto de Acoplamento.

	Primeiros Ciclos		Regime Estacionário	
	Analíticos	Simulados	Analíticos	Simulados
V_{PA} (kV)	1,954	1,964	1,969	1,968
I_{PA} (A)	77,90	78,59	83,50	83,47
φ_{PA} (°)	-21,63	-21,26	-0,805	-1,082
P_{PA} (kW)	424,7	426,6	493,2	493,8
Q_{PA} (kVAr)	-168,5	-165,9	-6,937	-9,425

Fonte: adaptado de Bracale *et al.* (2017)

3.3.4 Resultados Sem o Controle da Energia Reativa

Sem o controle da energia reativa, foram simulados dois casos, Caso III: A irradiação solar era de $G = 300 \text{ W/m}^2$, a falta ocorreu na barra 6, com resistência de falta da ordem de $R_f = 0 \Omega$, e Caso IV: A irradiação foi de $G = 800 \text{ W/m}^2$, na barra 6 e com $R_f = 0 \Omega$. (BRACALE *et al.*, 2017)

No terceiro caso a corrente de curto, na barra 6, foi de 2,9 kA e apesar disso a baixa irradiação solar permitiu que as correntes não chegassem ao limite de modo que não houvesse variação repentina dos valores de potência, ou seja, as condições de potência pré-falta foram as mesmas que as pós-falta, as tabelas 6 e 7 mostram os resultados para o caso III.

Tabela 5 – Caso III: Valores na Saída do Inversor.

	Analíticos	Simulados	
		Primeiros Ciclos	Regime Estacionário
P (kW)	354,2	3499	351,4
Q (kVAr)	-6,760	-4,903	-5,022
v_d (V)	107,6	107,8	107,8
v_q (V)	0,0	-0,0340	0,2223
i_d (A)	2199	2164	2171
i_q (A)	42,00	42,00	42,00

Fonte: adaptado de Bracale *et al.* (2017)

Tabela 6 – Caso III: Valores no Ponto de Acoplamento.

	Analíticos	Simulados	
		Primeiros Ciclos	Regime Estacionário
V_{PA} (kV)	1,956	1,941	1,956
I_{PA} (A)	59,86	58,92	59,22
φ_{PA} (°)	-19,1	-19,19	-19,17
P_{PA} (kW)	331,9	328,5	329,4
Q_{PA} (kVAr)	-114,9	-114,2	-114,5

Fonte: adaptado de Bracale *et al.* (2017)

No quarto caso a corrente de curto, na barra 6, também foi de aproximadamente 2,9 kA e nesse caso as correntes chegaram aos limites, portanto houve mudança repentina nos valores de potência pré-falta e pós-falta, para que a corrente não ultrapassasse os valores máximos o que impossibilita o fator de potência unitário no ponto de acoplamento, os resultados para o caso IV são mostrados nas tabelas 8 e 9.

Tabela 7 – Caso IV: Valores na Saída do Inversor.

	Analíticos	Simulados	
		Primeiros Ciclos	Regime Estacionário
P (kW)	454,1	453,8	451,3
Q (kVAr)	-6,631	-4,961	-5,170
v_d (V)	105,3	105,2	104,9
v_q (V)	0,0	0,2093	0,0404
i_d (A)	2860	2860	2860
i_q (A)	42	42	42

Fonte: adaptado de Bracale *et al.* (2017)

Tabela 8 – Caso IV: Valores no Ponto de Acoplamento.

	Analíticos	Simulados	
		Primeiros Ciclos	Regime Estacionário
V_{PA} (kV)	1,952	1,938	1,953
I_{PA} (A)	77,84	77,79	77,78
φ_{PA} (°)	-24,82	-25,09	-25,10
P_{PA} (kW)	413,9	413,7	413,5
Q_{PA} (kVAr)	-191,4	-193,3	-193,6

Fonte: adaptado de Bracale *et al.* (2017)

Essas tabelas ratificam a boa performance do modelo proposto, pois é notável que os valores simulados e analíticos estão muito próximos tanto para os primeiros ciclos, quanto para o regime estacionário.

Tabela 9 – Caso IV: Valores no Ponto de Acoplamento.

	Analíticos	Simulados	
		Primeiros Ciclos	Regime Estacionário
V_{PA} (kV)	1,952	1,938	1,953
I_{PA} (A)	77,84	77,79	77,78
φ_{PA} (°)	-24,82	-25,09	-25,10
P_{PA} (kW)	413,9	413,7	413,5
Q_{PA} (kVAr)	-191,4	-193,3	-193,6

Fonte: adaptado de Bracale *et al.* (2017)

3.3.5 Resultados Para Vários Sistemas Fotovoltaicos

Com a validação do modelo, o passo posterior foi simular a contribuição para o acréscimo de 3 sistemas fotovoltaicos idênticos entre si e ao exposto no tópico 3.4.2, esses sistemas foram acoplados nas barras 3, 4 e 8 da figura 13 com limites de 2,0 p.u. para suas correntes. Mesmo com valores de controle diferentes, os resultados também foram retirados a partir de dois casos, Caso V: A irradiação solar era de $G = 450 \text{ W/m}^2$, porém apenas os sistemas conectados na barra 3 e 4 tinham controle de energia reativa, o sistema conectado na barra 8 era controlado através de um LVRT, e é desconectado no instante $t = 0,6 \text{ s}$ e Caso VI: A irradiação foi de $G = 450 \text{ W/m}^2$, porém todos os sistemas fotovoltaicos estavam equipados apenas com controle LVRT e todos foram desconectados no instante $t = 0,6 \text{ s}$, em ambos os casos a falta ocorreu na barra 6 e com $R_f = 0 \Omega$. Esses dois casos foram comparados ao Caso 0, que é quando não há a presença de geração fotovoltaica, e os resultados estão mostrados nas tabelas a seguir. (BRACALE *et al.*, 2017)

Tabela 10 – Corrente de falta na barra 6 para os 3 casos.

	Caso 0	Caso V		Caso VI
		Primeiros Ciclos	Regime Estacionário	Primeiros Ciclos
I_{SC} (kV)	2882	2926	2916	3163

Fonte: adaptado de Bracale *et al.* (2017)

Tabela 11 – Caso V: Tensão e corrente no ponto de acoplamento dos sistemas fotovoltaicos.

	Na Barra 3		Na Barra 4		Na Barra 8	
	Primeiros Ciclos	Regime Estacionário	Primeiros Ciclos	Regime Estacionário	Primeiros Ciclos	Regime Estacionário
V_{PA} (kV)	1,96	1,97	1,46	1,47	1,27	1,25
I_{PA} (A)	94,5	84,6	120,0	108,1	139,5	0

Fonte: adaptado de Bracale *et al.* (2017)

Tabela 12 – Caso VI: Tensão e corrente no ponto de acoplamento dos sistemas fotovoltaicos.

	Na Barra 3	Na Barra 4	Na Barra 8
V_{PA} (kV)	2,09	2,59	1,37
I_{PA} (A)	139,6	139,5	139,4

Fonte: adaptado de Bracale *et al.* (2017)

Na tabela 10 são mostradas as correntes de falta para todos os casos, o que mostra que a contribuição da geração distribuída é relevante e pode prejudicar o funcionamento dos equipamentos de proteção, as tabelas 11 e 12 comparam os casos V e VI, deixando claro que a estratégia de controle é relevante no valor final da corrente de falta, sendo a estratégia LVRT a que mais gerou aumento da corrente de falta.

3.4 Modelagem Matemática do Circuito

Os métodos anteriores dizem respeito a como calcular a contribuição de plantas fotovoltaicas em sistemas de potência, porém na saída do inversor, para o objetivo desse estudo, se busca calcular o valor do curto-circuito no barramento CC da planta, para isso se escolheu estudar o modelo matemático com um único diodo.

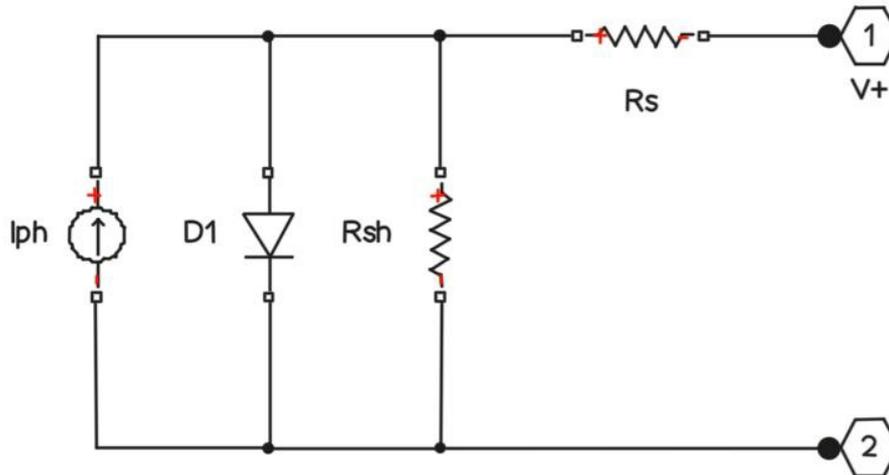
Um das aplicações desse modelo foi estudada por Tan *et al.* (2013), observando que uma das maneiras mais simples de se calcular a irradiação solar é através da corrente que passa na junção PN de um diodo, viu-se que é natural pensar na utilização de um painel fotovoltaico para medir a irradiação solar, existem vários métodos para se fazer isso, e um desses métodos é a partir da modelagem matemática do circuito do painel fotovoltaico.

Com tudo, é possível fazer tal estimativa unicamente calculando a corrente de curto-circuito, de tal sorte que será desnecessária a instalação de um piranômetro, contribuindo para que a estimativa da performance e da eficiência a geração solar naquela instalação seja mais barata e em tempo real. (TAN *et al.*, 2013)

3.4.1 Modelagem matemática

Utilizando-se do modelo matemático para um diodo simples como base, é possível modelar o painel fotovoltaico chegando-se bem próximo a realidade. Classicamente, o modelo utilizado é tal qual mostrado na figura 8, onde se têm um resistor, R_s , em série com a combinação em paralelo de uma fonte de corrente, I_{ph} , um diodo, D_1 e uma resistência shunt, R_{sh} .

Figura 6 – Modelo Clássico de um painel fotovoltaico com diodo simples.



Fonte: adaptado de Tan *et al.* (2013)

Onde a fonte de corrente representa a corrente gerada através da transferência de energia dos fótons emitidos pelo sol para o painel, o chamado efeito fotoelétrico. O diodo representa a junção PN existente bem como a corrente de saturação reversa a que o painel irá apresentar no seu funcionamento. O resistor shunt, R_{sh} ou R_p , representa a corrente de fuga e a resistência em série, R_s , é a resistência interna equivalente do módulo. (TAN *et al.*, 2013)

Portanto pode-se encontrar a seguinte equação:

$$I_{RS} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+I_{RS} \cdot R_s}{v_t}} - 1 \right) - \frac{V+I_{RS} \cdot R_s}{R_p}. \quad (3.4.1)$$

Onde v_t é a tensão térmica do diodo, que obedece a seguinte equação:

$$v_t = \frac{f_i \cdot k \cdot T \cdot N}{q}. \quad (3.4.2)$$

Sendo:

f_i : O fator de idealidade, que varia de 1 a 2.

k : A constante de Boltzman, $1,38 \cdot 10^{-23}$.

T : A temperatura da junção PN em Kelvin.

N : O número de células fotovoltaicas em série.

q : A carga do elétron, $1,6 \cdot 10^{-19}$.

Sabe-se, também, que a corrente I_{ph} é a corrente que a fonte gera para determinado valor de irradiação, na condição de curto a tensão em cima do diodo vai ser muito pequena, de modo que a corrente que passe por ele será muito próxima de 0 A, fazendo com que o circuito seja simplesmente um divisor de corrente entre as resistências R_s e R_p , de modo que a equação para o I_{ph} , seja dada da seguinte maneira: (VILLALVA *et al.*, 2009)

$$I_{ph} = \frac{R_s \cdot R_p}{R_p} \cdot I_{sc} \cdot \frac{G}{G_n} \quad (3.4.3)$$

Onde:

G : Constante de Irradiação Solar.

I_{sc} : Corrente de Curto-circuito do manual.

Levando em consideração, assim, a corrente que passa por R_p na condição de curto, e emulando corretamente a corrente de curto para qualquer condição.

A corrente de saturação reversa do diodo deve ser calculada na condição de circuito aberto, ou seja, a corrente que a fonte entrega é a nominal para 1000 W/m², I_{sc} , a corrente no resistor em série é 0 já que o circuito está aberto, logo, nessa condição, temos:

$$I_s = \frac{I_{ph} - V_{oc}/R_p}{\left(e^{\frac{V_{oc}}{v_t}} - 1\right)} \quad (3.4.4)$$

Utilizando-se as equações de (1) a (4), pode-se encontrar o valor do curto, porém dificilmente no datasheet dos painéis comercializados estarão informados valores como o fator de idealidade do diodo, f_i , ou as resistências em série e em paralelo, R_s e R_p .

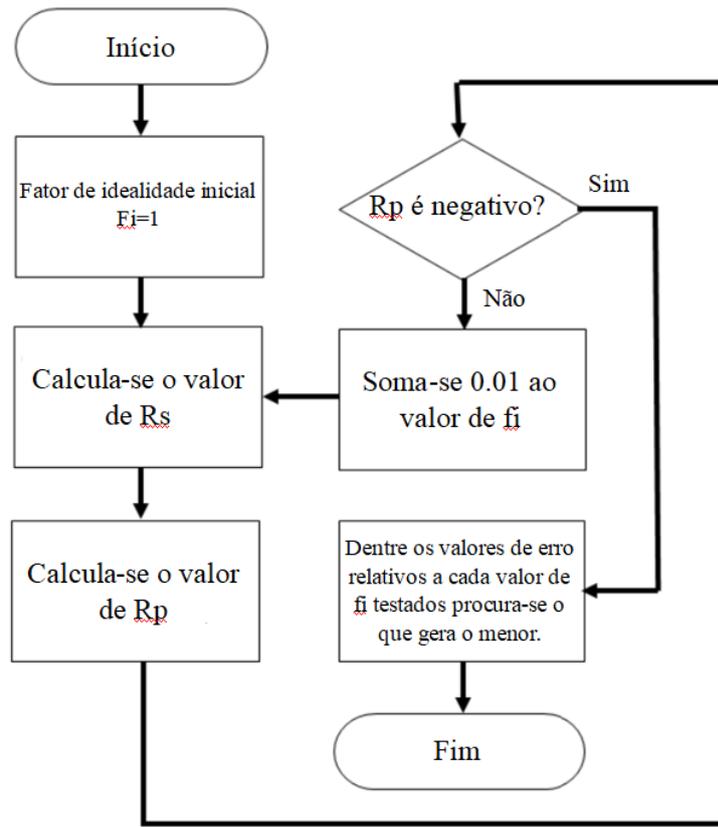
3.4.2 Fator de Idealidade do Diodo

Segundo Tan *et al.* (2013), várias fontes existentes na literatura estimam o fator de idealidade para determinados tipos de materiais, além disso para o mesmo material o processo de dopagem do semicondutor pode não ser exato, portanto, assumir um único valor para todos os painéis pode não ser a maneira mais eficaz.

Porém o valor de f_i varia entre 1 e 2, e na prática pode-se escolher um valor arbitrário, por que as alterações que essa variável gera no sistema são bem precisas. (VILLALVA *et al.*, 2009)

Por isso foi propõe-se um método iterativo, que busca encontrar um par (R_s , R_p) para cada valor de f_i , de modo que ao final se escolha o f_i , bem como o par (R_s , R_p) que gerou o menor módulo do erro.

Figura 7 – Método para identificação do fator de idealidade.



Fonte: Autor próprio.

O algoritmo busca encontrar a melhor aproximação para o f_i comparando os valores de potência no seu ponto de máxima potência, buscando minimizar o erro nesse ponto o que é perfeitamente possível já que V_{mp} e I_{mp} são dados pelo fabricante no manual.

Primeiro se supõe-se o valor 1 para a o valor inicial do fator de idealidade, após deve-se encontrar as resistências em série e em paralelo, se esta última for negativa deve-se parar de testar os fatores de idealidade e escolher aquele que minimiza o módulo do erro.

3.4.3 Resistências em série e em paralelo

Apesar de serem variáveis muito importantes no que se refere a modelagem do painel fotovoltaico e de representar as perdas internas dos módulos, a resistências equivalentes em série, R_s , e em paralelo, R_p , dificilmente são retratadas nos manuais dos fabricantes. (TAN *et al.*, 2013)

3.4.3.1 Resistência em paralelo

No ponto de máxima potência é possível afirmar que $I_{ph} = \frac{R_s \cdot R_p}{R_p} \cdot I_{sc}$, já que $G = 1000 \text{ W/m}^2$ e que $I_{RS} = I_{mp}$.

É possível, também, descobrir o valor de I_s pela equação (4), utilizando sempre o R_p da iteração passada para calcular essa constante, sendo o primeiro valor de R_p o seu valor mínimo que é dado pela relação (VILLALVA *et al.*, 2009):

$$R_{p_min} = \frac{V_{mp}}{I_{ph} - I_{mp}} - \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}}. \quad (3.4.5)$$

Com isso e partindo da equação (1), pode-se achar a relação de R_p com R_s :

$$\begin{aligned} I_{mp} &= I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V + I_{mp} \cdot R_s}{vt}} - 1 \right) - \frac{V + I_{mp} \cdot R_s}{R_p}. \\ \frac{V + I_{mp} \cdot R_s}{R_p} &= I_{sc} - I_s \left(e^{\frac{V + I_{mp} \cdot R_s}{vt}} - 1 \right) - I_{mp}. \\ R_p &= \frac{V + I_{mp} \cdot R_s}{I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V + I_{mp} \cdot R_s}{vt}} - 1 \right) - I_{mp}}. \end{aligned} \quad (3.4.6)$$

E assim se encontra o R_p de cada iteração.

3.4.3.2 Resistência em série

Para encontrar o valor da resistência em série foi proposto que a cada iteração o valor da resistência cresça $0,01 \Omega$, partindo de 0, depois deve-se calcular o valor de R_p a fim de calcular a potência no ponto de máxima potência para esse par, pois usando a equação (6) é possível encontrar um R_p , para cada R_s , fazendo com que a curva P-V passe pelo ponto (Pmp, Vmp), mas não necessariamente esse será o valor máximo dessa curva, o par que deve ser encontrado pelo algoritmo é aquele que o ponto máximo da curva P-V gerada coincide com o Pmp.

Para encontrar a curva da potência é necessário encontrar o valor de I dessa curva para todos os valores de V desde 0 até V_{oc} , utilizando a equação (1) para todos esses pares (I, V):

$$I_{RS} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V + I_{RS} \cdot R_s}{vt}} - 1 \right) - \frac{V + I_{RS} \cdot R_s}{R_p}.$$

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+I \cdot R_s}{vt}} - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_s}{R_p}. \quad (3.4.7)$$

Percebe-se que não é possível isolar analiticamente a variável I em função da variável V, portanto deve-se utilizar um método numérico para que se encontre o valor de I sabendo-se somente o valor de V, o método escolhido foi o Newton-Raphson, que tem como premissa encontrar a raiz de uma função, partindo da equação (7) pode-se escolher uma função g tal que:

$$g = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+I \cdot R_s}{vt}} - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_s}{R_p} - I. \quad (3.4.8)$$

Encontrando o valor de I que zera a função g para todos os valores V será possível obter a curva P-V e então descobrir qual dessas curvas têm o ponto Pmp no seu máximo.

O método se baseia em, partindo de um ponto inicial, x_i , de uma curva qualquer $f(x)$, escrever a equação da reta tangente a curva nesse ponto:

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - y}{x_i - x}.$$

Essa equação ainda não está no formato padrão para uma reta, mas o que se necessita dela é a raiz, que é o valor de x quando o y é zero, pois a raiz da reta tangente em um ponto sempre está mais próxima de um zero que o próprio ponto, logo:

$$\begin{aligned} x_i - x &= \frac{f(x_i) - y}{f'(x_i)}. \\ x_0 &= x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}. \end{aligned} \quad (3.4.9)$$

Onde x_0 é a raiz da reta tangente no ponto x_i , e é uma aproximação da raiz da função $f(x)$, logo existe um erro atrelado a esse valor, basta fazer esse processo iterativamente até que o erro seja pequeno o suficiente.

Para fazer o mesmo com a função g, será necessário entregar g' ao algoritmo e essa função é dada por:

$$g' = -I_s \left(e^{\frac{V+I \cdot R_s}{vt}} - 1 \right) \cdot \frac{R_s}{vt} - \frac{R_s}{R_p} - 1. \quad (3.4.10)$$

Com isso:

$$I_n = I_{n-1} - \frac{g(I_{n-1})}{g'(I_{n-1})}. \quad (3.4.11)$$

Encontrando o valor de I para cada V o valor de P deve ser calculado:

$$P = V \cdot \left[I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+I \cdot R_s}{vt}} - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_s}{R_p} \right]. \quad (3.4.12)$$

Com isso é rastreado o maior valor dessa curva e é verificado se ele está próximo

do valor P_{mp} , caso essas variáveis não coincidam se acrescenta $0,01 \Omega$ ao valor de R_s , então se começa o ciclo novamente.

3.4.4 Validação do Modelo

O painel estudado foi o SLP080-12M que possui as seguintes especificações, de acordo com o datasheet:

$$V_{mp} = 17,2V.$$

$$I_{mp} = 4,65A.$$

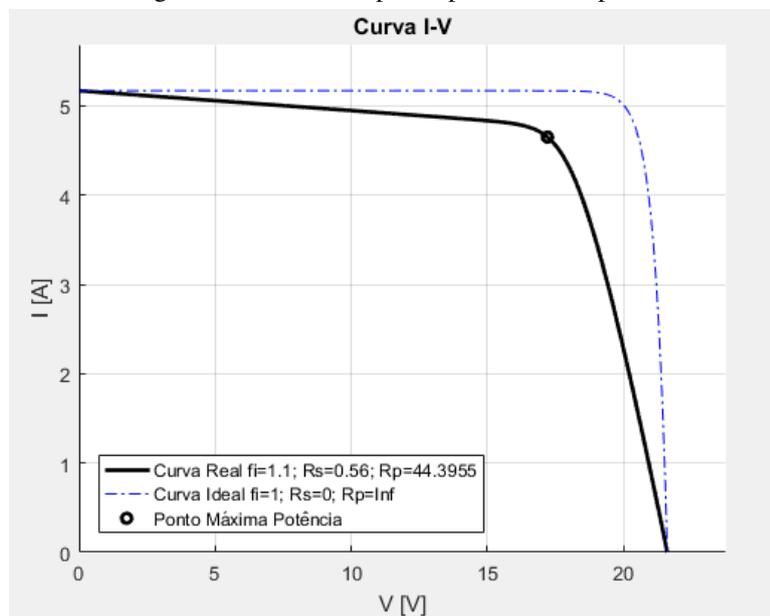
$$V_{oc} = 21,6V.$$

$$I_{sc} = 5,17A.$$

$N = 18$. pois, pelo datasheet são 36, (2x18), portanto tem 18 células série.

A partir dos resultados encontrados foram traçadas 2 curvas de carga, como mostrado na figura a seguir:

Figura 8 – Curvas I-V para o painel ideal e para os valores reais dos painéis.



Fonte: Autor próprio.

A curva tracejada em azul, mostra como seria a curva de carga para os valores ideais, $f_i = 1$ e $R_s = 0$ e $R_p = Inf$, nota-se que ela não passa pelo ponto (V_{mp}, I_{mp}). Em preto está representada a curva de carga depois de descobertos os valores reais, $f_i = 1,1$ e $R_s = 0,56 \Omega$ e $R_p = 44.3955 \Omega$, percebe-se que a curva real para o painel está em pleno acordo com o manual do fabricante, visto que ela passa pelo ponto de máxima potência.

Partindo da equação (1), pode-se encontrar a relação da corrente de saída com a irradiação solar:

$$G = \frac{I_{RS} - I_s \left(e^{\frac{V + I_{RS} \cdot R_s}{v_t}} - 1 \right) - \frac{V + I_{RS} \cdot R_s}{R_p}}{I_{ph}}$$

Sabendo-se que numa condição de curto o valor de $I_{RS} = I_{cc}$ bem como o valor de $V = 0$.

$$G = \frac{I_{cc} - I_s \left(e^{\frac{I_{cc} \cdot R_s}{v_t}} - 1 \right) - \frac{I_{cc} \cdot R_s}{R_p}}{I_{ph}} \quad (3.4.13)$$

Percebe-se que, a partir dessa modelagem, é possível descobrir o Valor da constante de irradiação, e multiplicando-a pelo fator de 1000 W/m² (TAN *et al.*, 2013), é possível encontrar a Irradiação Solar, porém não há uma maneira analítica de isolar o I_{cc} nessa equação em função da irradiação, é necessário um método numérico para dar essa solução.

3.4.5 Resultados

Um método bem simples é definir a valores iniciais para as variáveis G_e e I_{cc} , que são, respectivamente, o valor esperado da constante de irradiação e a corrente de curto, além de definir o valor mínimo para o erro. O algoritmo se baseia em alterar o valor de I_{cc} , aumentando caso G seja menor que G_e , ou diminuindo, caso G seja maior que G_e , até que a variável G , calculada a cada iteração pela equação (3.4.13), seja tão próxima de G_e quanto o erro estimado, e nesse momento tem-se a aproximação da variável I_{cc} .

Nos estudos de Tan *et al.* (2013), foi mostrada uma tabela que indica valores de G para dados níveis de curtos medidos e que compara esses valores com medidos por um piranômetro, porém, com o intuito de medir a assertividade da modelagem na obtenção da corrente de curto, sabendo-se o valor da irradiação solar, é possível utilizar os dados do piranômetro, jogá-los no algoritmo proposto anteriormente e comparar a corrente de curto estimada, com a corrente de curto medida experimentalmente.

Tabela 13 – Corrente de Curto, Estimada x Medida.

Piranômetro (W/m²)	Corrente de Curto Medida (A)	Corrente de Curto Estimada (A)	Erro da estimativa (%)	Erro Total (%)
50	0,27	0,26	0,007	3,7
122	0,64	0,64	0,059	0
144	0,84	0,77	0,066	8,3
230	1,31	1,21	0,097	7,6
481	2,56	2,56	0,005	0
502	2,63	2,67	0,031	1,5
531	2,81	2,81	0,086	0
610	3,22	3,24	0,080	0,6
682	3,39	3,61	0,074	6,4
718	3,84	3,80	0,058	1,0
818	4,31	4,33	0,054	0,4
883	4,58	4,69	0,032	2,4

Fonte: adaptado de Tan *et al.* (2013)

Logo percebe-se que a modelagem chegou muito próxima ao valor medido na prática, tanto para a corrente de curto como visto na tabela 13, como para a irradiação solar, como visto no trabalho de Tan *et al.* (2013).

4 Estudo de Caso

Neste capítulo será apresentada e simulada uma planta de geração fotovoltaica de 3MW de potência desenvolvida para ser integrada no campus do Pici em média tensão, essa planta foi desenvolvida por Silva (2016), procura-se encontrar os valores da contribuição em caso de curto no barramento CC dessa planta a fim de entender o quão preparados os elementos de proteção devem estar para que seja possível garantir a estabilidade, segurança e confiabilidade do sistema.

4.1 Diagrama Unifilar

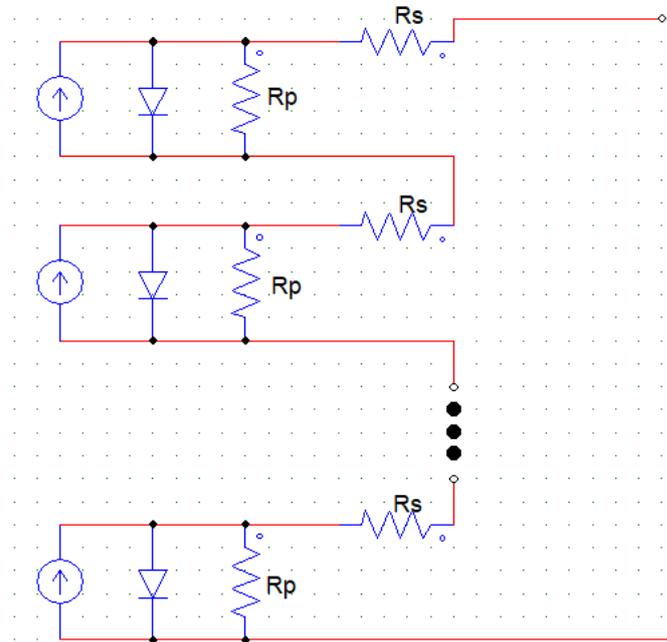
Silva (2016) propôs que a geração fosse composta por *strings* com 21 módulos em série e 15 séries dessas em paralelo, sendo que cada central inversora vai receber 12 desses agrupamentos sendo assim será equivalente a ter 21 módulos em série com 180 séries dessas em paralelo.

4.2 Circuito Equivalente

Para que seja possível realizar a simulação dessa planta é necessário encontrar um circuito equivalente para essa configuração de 21 módulos em série e 180 séries dessas em paralelo, para isso pode-se utilizar-se da estratégia a seguir:

4.2.1 Equivalente em Série

Figura 9 – Circuito Completo em Série.



Fonte: Autor Próprio

Com a figura acima buscou-se desenhar o arranjo do modelo matemático para N_s módulos em série, e a partir dele pode-se chegar a seguinte equação:

$$[R_p \cdot (I_m - I_o) - R_s \cdot I_o] \cdot N_s = V_o. \quad (4.2.1)$$

Onde:

R_p : Resistência em paralelo.

R_s : Resistência em série.

I_o : Corrente de saída.

N_s : Número de painéis em série.

V_o : Tensão de saída.

Já que por todas as resistências R_p e R_s , passam a mesma corrente, $(I_m - I_o)$ e I_o , respectivamente.

Onde I_m é a corrente que sai da fonte de corrente menos a corrente que passa pelo diodo e I_s deve ser calculado pela equação (3.4.4).

$$I_m = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V_d}{v_t}} - 1 \right). \quad (4.2.2)$$

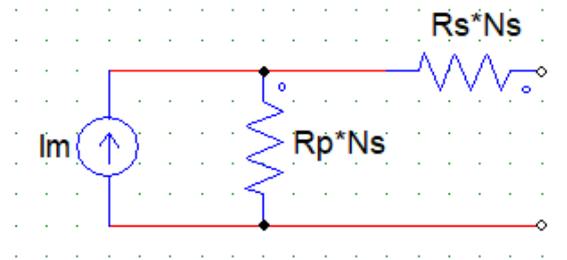
E sabendo que o I_s deve ser calculado pela equação (4) do tópico 3.2.1.

Logo passando o N_s para dentro do colchete pode-se obter:

$$[(R_p \cdot N_s) \cdot (I_m - I_o) - (R_s \cdot N_s) \cdot I_o] = V^+ - V^- = V_o. \quad (4.2.3)$$

E essa equação leva a um circuito que pode ser desenhado da seguinte forma:

Figura 10 – Circuito Equivalente em série.



Fonte: Autor Próprio

Matematicamente é como se as resistências ficassem em série, quando os módulos são ligados em série e esse resultado é esperado pela teoria.

É válido ressaltar que o arranjo da fonte de corrente em série com o diodo foi substituído unicamente por uma fonte de corrente I_m que obedece a equação (4.2.1), pois se fosse mantido o diodo a tensão em cima dele teria a forma:

$$V_d = V_0 + N_s \cdot R_s \cdot I_0. \quad (4.2.4)$$

Porém matematicamente isso não seria correto. A tensão em cima do diodo altera o resultado da equação (2) fazendo com que o I_m fosse diferente, para que a corrente I_m se mantenha a tensão em cima do diodo deveria ter a seguinte forma:

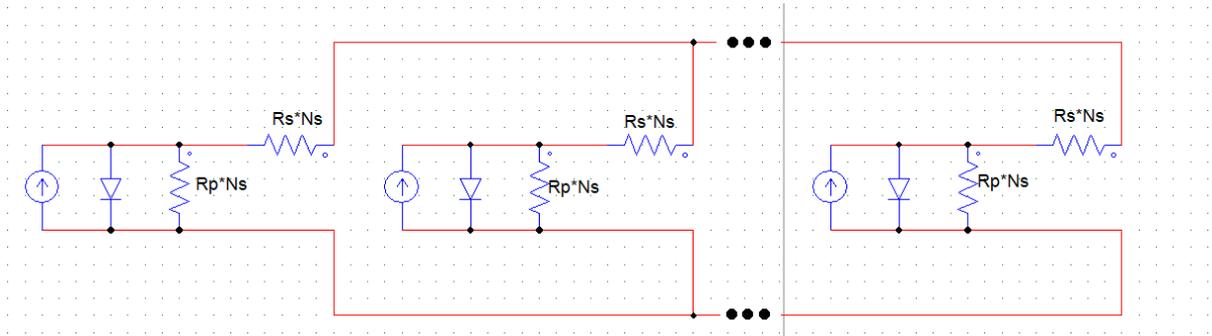
$$V = \frac{V_0}{N_s} + R_s \cdot I_0. \quad (4.2.5)$$

Que era a tensão em cima do diodo para o circuito original, na figura 15, percebe-se, para fins de simulação, que ao entregar a tensão em cima do diodo para o circuito a mesma deve ser dividida por N_s fazendo com que a equação (4) se torne a equação (5) e o circuito simule corretamente o resultado matemático da equação (3).

4.2.2 Equivalente em Paralelo

Agora deve-se utilizar o circuito encontrado acima liga-lo em paralelo e encontrar o equivalente em paralelo, para isso pode-se utilizar a figura a seguir:

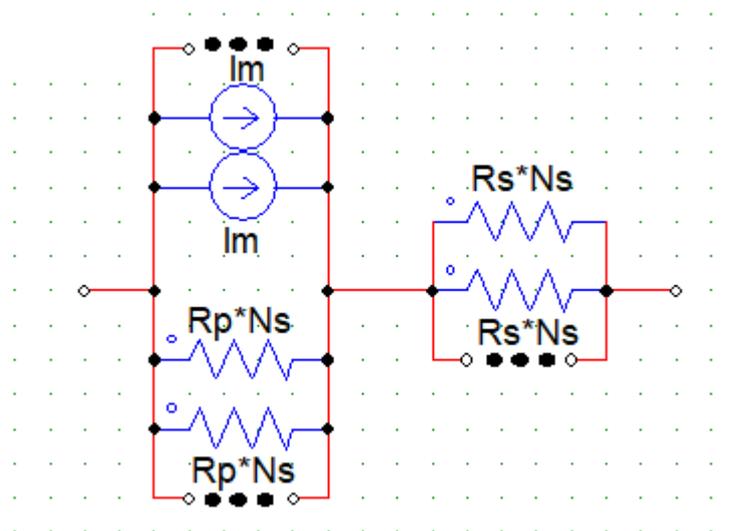
Figura 11 – Circuito Completo em Paralelo.



Fonte: Autor Próprio

Com a figura acima buscou-se desenhar o arranjo do modelo matemático para N_p módulos em paralelo, e observando a simetria do sistema percebe-se que todas as resistências estão sob a mesma diferença de potencial elétrico, fazendo com que o circuito possa ser redesenhado da seguinte forma.

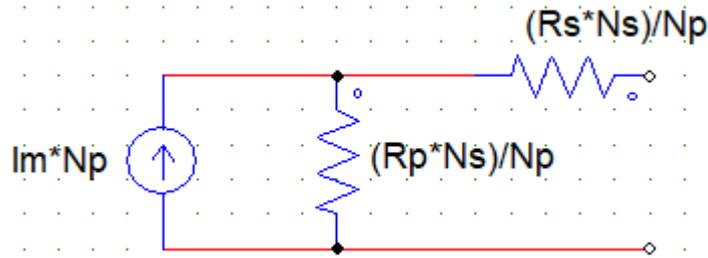
Figura 12 – Circuito em Paralelo Redesenhado.



Fonte: Autor Próprio

Sendo N_p fontes de corrente em paralelo, N_p resistências R_p em paralelo e também, N_p resistências R_s em paralelo. Logo pode-se desenhar o circuito equivalente:

Figura 13 – Circuito Equivalente.



Fonte: Autor Próprio

Desta forma, encontrou-se uma forma bem simples de emular as ligações em série e em paralelo para que a simulação do arranjo seja mais fácil.

Para isso basta alterar as resistências tal qual na figura 15 e calcular a corrente I_m da seguinte forma:

$$I_m = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V_d}{v_t \cdot N_s}} - 1 \right). \quad (4.2.5)$$

Pode-se também alterar as equações anteriores acrescentando a interferência que a temperatura faz na geração, utilizando-se os valores dos coeficientes de temperatura dados no datasheet, sempre multiplicando o valor do coeficiente pela diferença da tensão se este coeficiente não estiver em $\%/^{\circ}\text{C}$, se caso o coeficiente estiver em $\%/^{\circ}\text{C}$ deve-se multiplicar também pelo valor nominal, de modo que as equações mudem de acordo com os exemplos a seguir:

$$I_{ph} = (I_{sc} \cdot K_i \cdot \Delta T) \frac{G}{G_n}. \quad (4.2.6)$$

Sendo possível calcular a corrente levando em consideração não só a razão da irradiância pela irradiância nominal, mas também a diferença da temperatura para a temperatura nominal. O mesmo pode ser feito para outros valores como V_{oc} que em uma temperatura diferente de 298 K se tornaria:

$$V_{oc} = V_{ocn} \cdot K_v \cdot \Delta T. \quad (4.2.7)$$

Sempre utilizando o K_i para alterar as constantes relacionadas a corrente, e o K_v para as constantes relacionadas a tensão. Alguns datasheets especificam coeficientes de temperatura para cada variável, nesse caso deve-se estar atento às informações do datasheet para utilizar os coeficientes corretamente.

4.3 Implementação

No estudo desenvolvido por Silva (2016), foi escolhido um painel constituído de

72 células de silício na configuração de (6x12) contendo, portanto, 12 células em série e com os seguintes parâmetros:

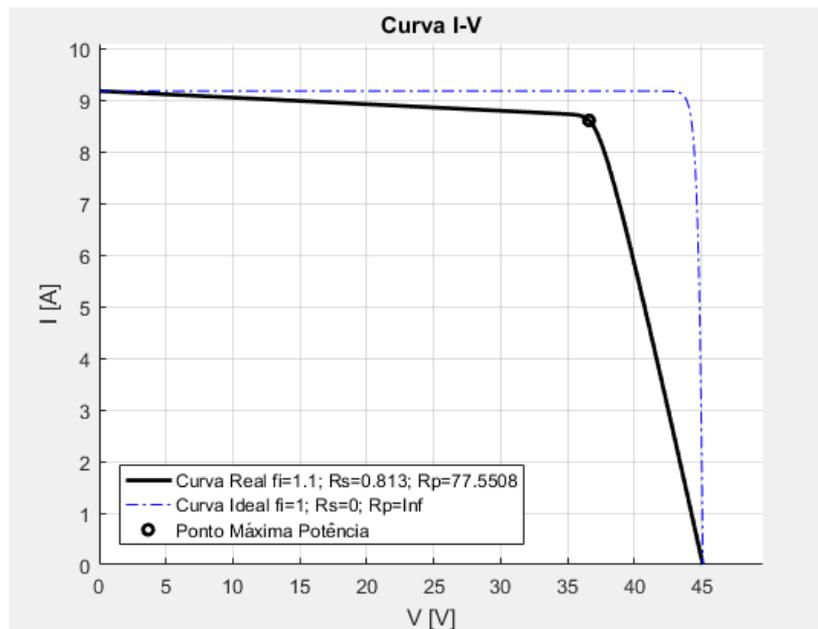
Tabela 14 – Parâmetros do painel fotovoltaico escolhido.

Parâmetros	
Potência Nominal P_n (W)	315
Tensão no ponto de máxima potência V_{mp} (V)	36,6
Corrente no ponto de máxima potência I_{mp} (A)	8,61
Tensão de circuito aberto V_{oc} (V)	45,1
Corrente de Curto Circuito I_{sc} (A)	9,18
Coef. de temp. da potência K_p (%/°C)	-0,41
Coef. de temp. da V_{oc} K_{voc} (%/°C)	-0,31
Coef. de temp. da I_{sc} K_{isc} (%/°C)	0,053
Coef. de temp. da V_{mp} K_{vmp} (%/°C)	-0,463

Fonte: adaptado de Silva (2016)

Com isso pode-se simular o algoritmo para que sejam encontrados os outros parâmetros que não são dados no datasheet. E foi encontrado que $f_i = 1,1$ e $R_s = 0,813 \Omega$ e $R_p = 77,5508 \Omega$ valores que geram as figuras a seguir:

Figura 14 – Curva de carga do painel escolhido



Fonte: Autor Próprio

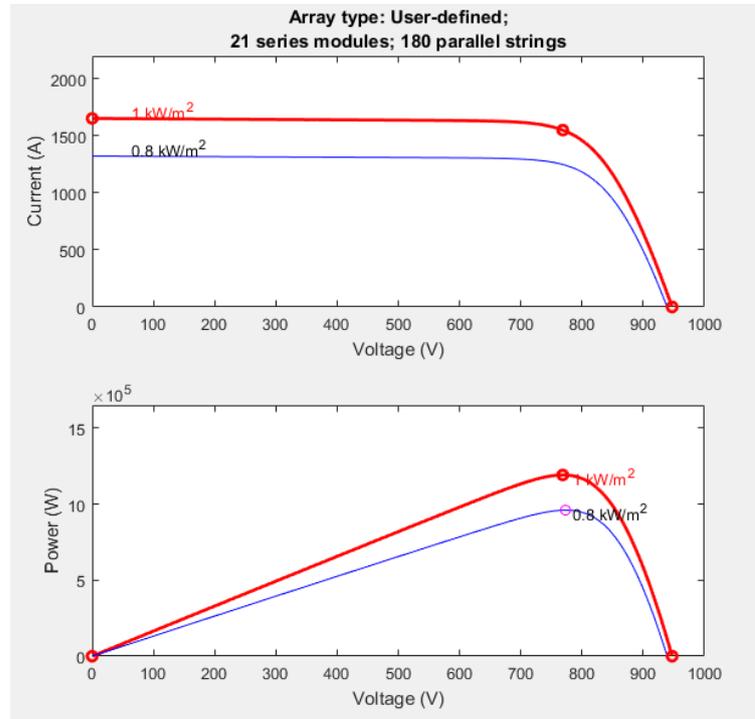
4.4 Resultados

O sistema com os valores mostrados na secção anterior foi simulado no simulink, e comparado com o próprio bloco de arranjo de painéis fotovoltaicos do simulink, a fim de que toda a formulação teórica estuda e encontrada na secção 4.2 fosse testada.

Para isso nos testes foram levantadas as curvas de carga para 2 casos, Caso I: Com irradiância $G = 1000 \text{ W/m}^2$ e Caso II: Com irradiância $G = 800 \text{ W/m}^2$.

As curvas para o próprio bloco do simulink são dadas a seguir:

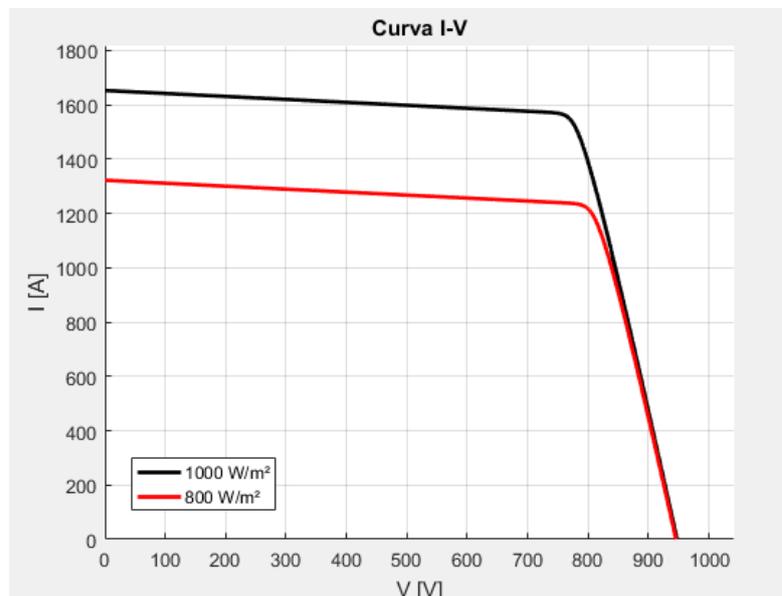
Figura 15 – Curva de carga para o arranjo no simulink.



Fonte: Autor Próprio

Já para a simulação feita utilizando-se a base teórica desenvolvida anteriormente foram geradas as curvas a seguir:

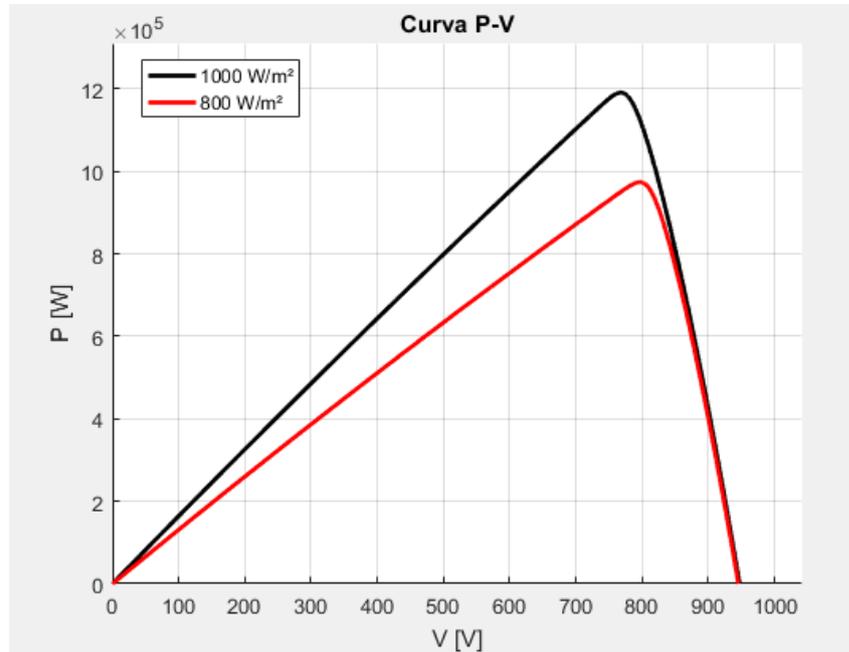
Figura 16 – Curva I-V para o arranjo.



Fonte: Autor Próprio

Bem como a curva para a potência:

Figura 17 – Curva P-V para o arranjo.



Fonte: Autor Próprio

Logo percebe-se que os resultados simulados ratificam que o modelo matemático foi capaz de emular corretamente o arranjo. Portando sendo capaz de dar o valor da corrente de curto não só na condição de 1000 W/m², mas também em qualquer outra condição de irradiação e de temperatura.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo de curto-circuito no barramento CC de uma planta fotovoltaica utilizando uma modelagem matemática apresentada no próprio estudo, a fim de que melhorias fossem propostas.

Portanto propõe-se que ao invés de fazer o estudo de proteção baseando-se na irradiância e na temperatura nominal, tendo em mão o modelo matemático, pode-se estudar o nível de irradiância e temperatura no local onde vai ser instalada a planta, para que seja evitado qualquer tipo de sobredimensionamento, que seria prejudicial já que olhando as condições nominais do datasheet, o valor do curto seria na ordem de 1,6 kA sendo que a uma menor irradiância, 800 W/m², a corrente é da ordem de 1,3 kA, esse sobredimensionamento poderia levar à não confiabilidade do sistema de proteção, que não iria atuar na condição a qual o sistema realmente será exposto.

Os objetivos específicos foram alcançados através dos diversos testes mostrados no trabalho. Foi mostrada a importância de se conhecer o modelo matemático, as resistências em série, e em paralelo, bem como o fator de idealidade dos painéis, a fim de que seja possível fazer essa simulação em qualquer condição.

Foram expostos, os tipos e os riscos do arco elétrico e a energia incidente para a segurança e proteção dos trabalhadores e dos equipamentos do sistema elétrico através da análise de alguns textos normativos referentes à segurança em eletricidade e ao arco elétrico.

Como resultado, pode-se concluir que a planta, objeto da pesquisa, tende a obter muitos benefícios ao utilizar esse estudo e a proposta de cálculo de curto para aumentar a confiabilidade do sistema de proteção. Assim, por meio da correta aplicação do método proposto, observando que cada um dos objetivos específicos atingidos e a apresentação dos resultados que respondem ao problema da pesquisa, considera-se o objetivo geral da pesquisa atendido.

5.1 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, observou-se que o acréscimo de mais um diodo no modelo, pode levar a uma melhor estimativa, por isso estudar esse modelo atualizado, bem como sanar as dificuldades que aparecerão na resolução das equações matemáticas com esse acréscimo ou estudar nossos algoritmos para estimação dos parâmetros do painel após essa mudança no circuito, serão de grande importância para que esse modelo seja complementado.

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Número de consumidores de energia solar cresce 172% no Estado.** Disponível em: <<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/negocios/numero-de-consumidores-de-energia-solar-cresce-172-no-estado-1.3007921>>. Acesso em 01/10/2021.

BRACALE, A. *et al.* Modeling the three-phase short-circuit contribution of photovoltaic systems in balanced power systems. **International Journal Of Electrical Power & Energy Systems**, [S.L.], v. 93, p. 204-215, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.05.032>.

CÂMARA, A. S. B. **Modelagem de Arco Elétrico no Ar. Aplicação em Sistemas de Potência.** COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, v. Tese de Doutorado, Novembro 2010.

DADDA, Samia *et al.* **Primary Arc Modeling in Transmission Line.** 2018 International Conference On Electrical Sciences And Technologies In Maghreb (Cistem), [S.L.], v. -, n. -, p. 1-3, out. 2018. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/cistem.2018.8613355>.

DOAN, Daniel R.. **Arc Flash Calculations for Exposures to DC Systems.** Ieee Transactions On Industry Applications, [S.L.], v. 46, n. 6, p. 2299-2302, nov. 2010. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tia.2010.2070480>.

DOAN, Daniel R.; DERER, Richard M.. **Arc Flash Calculations for a 1.3-MW Photovoltaic System.** Ieee Transactions On Industry Applications, [S.L.], v. 51, n. 1, p. 62-68, jan. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tia.2014.2347236>.

GREWAL, Mohinder; ANDREWS, Angus. **Kalman filtering: Theory and Practice Using MATLAB.** 2. ed. [S.I]: Wiley-Interscience, 2001. 401 p.

HOAGLAND, Hugh *et al.* **Measurements, observations and implications of moving electrical arc behavior and effect of reclosure events on overhead lines and worker protection.** 2015 Ieee Ias Electrical Safety Workshop, [S.L.], v. -, n. -, p. 1-7, jan. 2015. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/esw.2015.7094940>.

“IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations”. **IEEE Std 1584-2018 (Revision of IEEE Std 1584-2002)**, vol., no., pp.1-134, 30 Nov. 2018, doi: 10.1109/IEEEESTD.2018.8563139.

LIU, Huiyuan *et al.* Research on Theoretical Calculation Methods of Photovoltaic Power Short-Circuit Current and Influencing Factors of Its Fault Characteristics. **Energies**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 316, 20 jan. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en12020316>.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 144, p. 28-33, Jan 2018.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo,

ed. 145, p. 30-35, Fev 2018.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 146, p. 32-37, Mar 2018.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 147, p. 36-41, Abr 2018.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 148, p. 38-40, Maio 2018.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 149, p. 36-39, Jun 2018.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 150, p. 26-29, Jul 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **MEIO AMBIENTE: brasileiro está mais consciente**. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/o-que-o-brasileiro-pensa-do-meio-ambiente-e-do-consumo-sustentavel>>. Acesso em 01/10/2021.

MUKHERJEE, E. *et al.* A heuristic approach of estimation of short-circuit current of a photovoltaic cell by Kalman filter. **2014 Ieee Global Humanitarian Technology Conference - South Asia Satellite (Ghtc-Sas)**, [S.L.], v. -, n. -, p. 222-226, set. 2014. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ghtc-sas.2014.6967587>.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION NFPA 70E. **Standard for Electrical Safety in the Workplace**, 2021. Disponível em: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=70E>. Acesso em 16 outubro 2021.

SILVA, Karlos Daniel Menezes e. **PROJETO DE MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA SOLAR FOTOVOLTAICA DE 3 MW PARA O CAMPUS DO PICI DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**. 2016. 96 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Dee, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SOLARGIS. **Investigate your region with Solargis solar resource maps**. Bratislava, Eslováquia, 1999-2018. Disponível em: <<https://solargis.com/maps-and-gis-data/overview>>. Acesso em 01/10/2021.

TAN, Rodney H. G. *et al.* Solar irradiance estimation based on photovoltaic module short circuit current measurement. **2013 Ieee International Conference On Smart Instrumentation, Measurement And Applications (Icsima)**, [S.L.], v. -, n. -, p. 1-4, nov. 2013. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/icsima.2013.6717943>.

VILLALVA, M. *et al.* "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, May 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2