



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

JOSÉ EDIVAM ANDRADE CAVALCANTE JUNIOR

**ESTUDO DE CASO PARA VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO DE
ENERGIA INCIDENTE EM SISTEMAS DE CORRENTE CONTÍNUA: USINA
FOTOVOLTAICA DO INSTITUTO LEÃO SAMPAIO EM JUAZEIRO DO NORTE-
CE**

FORTALEZA

2020

JOSÉ EDIVAM ANDRADE CAVALCANTE JUNIOR

ESTUDO DE CASO PARA VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO DE ENERGIA
INCIDENTE EM SISTEMAS DE CORRENTE CONTÍNUA: USINA FOTOVOLTAICA
DO INSTITUTO LEÃO SAMPAIO EM JUAZEIRO DO NORTE-CE

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. M. Sc. Carlos Gustavo Castelo Branco.

FORTALEZA

2020

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)

- C364e Cavalcante Junior, José Edivam Andrade.
Estudo de caso para validação dos Modelos de Cálculo de Energia Incidente em Sistemas de Corrente Contínua: usina fotovoltaica do Instituto Leão Sampaio em Juazeiro do Norte - CE / José Edivam Andrade Cavalcante Junior. – 2020.
95 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2020.
Orientação: Prof. Me. Carlos Gustavo Castelo Branco.
1. Arco elétrico. 2. Corrente contínua. 3. Energia incidente. 4. Modelos de energia incidente. 5. Comparação de modelos. I. Título.

CDD 621.3

JOSÉ EDIVAM ANDRADE CAVALCANTE JUNIOR

ESTUDO DE CASO PARA VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO DE ENERGIA
INCIDENTE EM SISTEMAS DE CORRENTE CONTÍNUA: USINA FOTOVOLTAICA
DO INSTITUTO LEÃO SAMPAIO EM JUAZEIRO DO NORTE-CE

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Elétrica do Centro
de Tecnologia da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: ___/___/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. M. Sc. Carlos Gustavo Castelo Branco. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Eng. Paulo Wesley Costa Tavares de Oliveira
GPS Engenharia

A Deus.

Aos meus pais, Edivam e Sônia.

À minha irmã, Amanda.

Aos meus amigos e professores.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Edivam e Sônia, por me mostrarem o caminho que escolhi seguir.

À minha irmã, Amanda, por sua sabedoria e conselhos que me ajudaram a ser respeitoso e cuidadoso com minhas decisões.

Aos meus amigos, Jonas, Machado, Stenio, Enzo, Fábio, Rodrigo e Gilberto, por me fazerem companhia no decorrer dos anos de curso, e por todos os projetos e dificuldades dentro e fora do campus que enfrentamos e superamos.

Ao meu orientador, Gustavo Castelo, por mostrar os possíveis caminhos na elaboração deste trabalho.

A todos os meus amigos do meu antigo estágio na Carmehil Soluções Industriais, que contribuíram para a minha formação profissional e pessoal, e que até hoje me acompanham.

A todos os meus colegas da Universidade Federal do Ceará que compartilharam comigo esta caminhada, ou que participaram de alguma forma dela.

Aos professores do curso, que de diversas formas me abriram os olhos para realidades nunca antes cogitadas dentro do universo estudantil.

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.” (HAMMED, 2004).

“A coisa mais indispensável a um homem é reconhecer o uso que deve fazer do seu próprio conhecimento.” (PLATÃO).

RESUMO

Com o aumento da utilização da Geração Distribuída a necessidade de proteção contra faltas que possam gerar arco elétrico em sistemas de corrente contínua tem aumentado tanto quanto, demandando uma comparação entre modelos de cálculo da energia incidente visando elencá-los para cada circunstância, para melhor dimensionar equipamentos de proteção em corrente contínua e equipamentos de proteção individual, visando mitigar danos ao quadro elétrico e aos indivíduos que irão operar o quadro ou que estejam nas proximidades do quadro. Este estudo visa apresentar os modelos de cálculo da energia incidente em corrente contínua de Ralph Lee, Stokes & Oppenlander e Paukert e compará-los, a fim de mostrar em quais situações a sua aplicabilidade se encaixa melhor e em outras que não devem ser adotadas. Os modelos apresentados são comparados através de gráficos de correntes e potência de arco por corrente de curto circuito, visando comparar as curvas entre os modelos. Afinal, qual deles é o mais confiável? O mais conservativo? E com isso abrindo discussões sobre as metodologias abordadas pela NFPA 70E e IEEE 1584. Este trabalho também apresenta um estudo de caso que aplica os modelos de cálculo de energia incidente e a partir dos resultados obtidos, compara novamente as metodologias a fim de validar as comparações anteriormente feitas.

Palavras-chave: Arco elétrico. Corrente contínua. Energia incidente. Modelos de energia incidente. Comparação de modelos.

ABSTRACT

With the increase in the use of Distributed Generation the need for protection against faults that can generate electric arc in direct current systems has increased as well, demanding a comparison between calculation models of incident energy aiming to list them for each circumstance, to better dimension direct current protection equipment and personal protective equipment to mitigate damages to the electrical panel, which holds the equipment, and the individuals who will operate the panel or that are in the vicinity of the board. This study aims to present Ralph Lee, Stokes & Oppenlander and Paukert's models for calculating incident energy in direct current and compare them, in order to show in which situations their applicability fits better and in others that should not be adopted. The models presented are compared using current and arco power graphs by short circuit current, in order to compare the curves between the models. After all, which one is the most reliable? The most conservative? And with that opening discussions about the methodologies covered by NFPA 70E and IEEE 1584. This work also presents a case study that applies the incident energy calculation models and from the results obtained, again compares the methodologies in order to validate the comparisons previously made.

Keywords: Electric arc. Direct current. Incident energy. Incident energy models. Comparison between models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Arco elétrico em uma subestação	20
Figura 2	– Exemplo de cabo enlaçando o quadro	29
Figura 3	– Sensor em funcionamento	30
Figura 4	– Relés de arco VAMP	31
Figura 5	– EPIs para cada categoria de energia incidente	32
Figura 6	– Capacete com viseira, Categorias 1 e 2	33
Figura 7	– Bota de couro	34
Figura 8	– Luvas Categoria 4	34
Figura 9	– Capuz Categoria 4	34
Figura 10	– Túnica Categoria 4	35
Figura 11	– Circuito equivalente para situação de arco	37
Figura 12	– Circuito equivalente para curto-circuito	48
Figura 13	– Imagem de satélite do Instituto e do local dos módulos	70
Figura 14	– Gerador heliotrópico	72
Figura 15	– Fileira de heliotrópicos	72
Figura 16	– Inversor solar SG60KTL	74
Figura 17	– Diagrama unifilar da fileira de heliotrópicos	77
Figura 18	– Fileira com nove painéis e um inversor	78
Figura 19	– Dados de arco elétrico Modelo RL	79
Figura 20	– Dados de arco elétrico Modelo PK	79
Figura 21	– Dados de arco elétrico Modelo SO 5 mm	80
Figura 22	– Dados de arco elétrico Modelo SO 20 mm	80
Figura 23	– Dados de arco elétrico Modelo SO 50 mm	81

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Curvas de Corrente por tensão de arco do modelo SO	41
Gráfico 2	– Modelos SO, PK e RL em 250 VCC e 5 mm $I_{arc}\%$ x I_{cc}	50
Gráfico 3	– Modelos SO, PK e RL em 250 VCC e 5 mm $P\%$ x I_{cc}	50
Gráfico 4	– Modelos SO, PK e RL em 250 VCC e 20 mm $I_{arc}\%$ x I_{cc}	51
Gráfico 5	– Modelos SO, PK e RL em 250 VCC e 20 mm $P\%$ x I_{cc}	52
Gráfico 6	– Modelos SO, PK e RL em 250 VCC e 50 mm $I_{arc}\%$ x I_{cc}	53
Gráfico 7	– Modelos SO, PK e RL em 250 VCC e 50 mm $P\%$ x I_{cc}	53
Gráfico 8	– Modelos SO, PK e RL em 125 VCC e 20 mm $I_{arc}\%$ x I_{cc}	55
Gráfico 9	– Modelos SO, PK e RL em 125 VCC e 20 mm $P\%$ x I_{cc}	55
Gráfico 10	– Modelos SO, PK e RL em 500 VCC e 20 mm $I_{arc}\%$ x I_{cc}	56
Gráfico 11	– Modelos SO, PK e RL em 500 VCC e 20 mm $P\%$ x I_{cc}	57
Gráfico 12	– Modelos SO, PK e RL em 1000 VCC e 20 mm $I_{arc}\%$ x I_{cc}	58
Gráfico 13	– Modelos SO, PK e RL em 1000 VCC e 20 mm $P\%$ x I_{cc}	58
Gráfico 14	– Energia incidente x Distância dos três modelos	63
Gráfico 15	– Energia incidente x Distância dos três modelos	64
Gráfico 16	– Tensão de arco x <i>Gap</i>	66
Gráfico 17	– Resistência de arco x <i>Gap</i>	67
Gráfico 18	– Energia incidente x <i>Gap</i>	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos tempos de extinção de arco	30
Tabela 2 – Fórmulas empíricas de arco para $100 \text{ kA} > I_{\text{arc}} > 100 \text{ A}$	44
Tabela 3 – Fórmulas empíricas de arco para $I_{\text{arc}} < 100 \text{ A}$	45
Tabela 4 – Dados de testes dos modelos SO e PK	49
Tabela 5 – Equações para energia incidente	61
Tabela 6 – Valores de potência nos três modelos	62
Tabela 7 – Valores de potência nos três modelos	64
Tabela 8 – Dados do módulo FV utilizado no Gerador Solar Heliotrópico	73
Tabela 9 – Dados do inversor solar SG60KTL	75
Tabela 10 – Dados de arco para <i>gap</i> de 5 mm	81
Tabela 11 – Dados de arco para <i>gap</i> de 20 mm	82
Tabela 12 – Dados de arco para <i>gap</i> de 50 mm	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
ATPV	Arch Thermal Performance Value
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
EBT	Energy Breakopen Threshold
EPC	Equipamentos de Proteção Coletivos
EPI	Equipamentos de Proteção Individual
FV	Fotovoltaico
IEEE 1584	Padrão 1584 do Institute of Electrical and Electronic Engineers, intitulado <i>“Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations”</i>
NBR IEC 61439-1	Norma Brasileira desenvolvida na International Electrotechnical Commission, intitulada “Conjunto de manobra e comando de baixa tensão”
NBR IEC 62271- 200:2007	Norma Brasileira desenvolvida na International Electrotechnical Commission, intitulada “Conjunto de manobra e comando de alta tensão”, Versão corrigida em 2007
NFPA 70E	Padrão 70E do National Fire Protection Association, intitulado <i>“Standard for Electrical Safety in the Workplace”</i>
NR-10	Norma Regulamentadora nº 10
NR-12	Norma Regulamentadora nº 12
PK	Modelo de Paukert
PTTA	Partially Type-Tested Assemblies
RL	Modelo de Ralph Lee
RMS	Root Mean Square
SO	Modelo de Stokes & Oppenlander
TTA	Type-Tested Assemblies

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Relevância do tema	15
1.2	Objetivos	16
1.3	Metodologia	17
1.4	Estrutura do trabalho	17
2	ARCO ELÉTRICO	19
2.1	Definição	19
2.2	Causas da falta por arco elétrico	20
2.2.1	<i>Seccionamento energizado</i>	20
2.2.2	<i>Curto-circuito</i>	21
2.3	Danos causados pelo arco elétrico	22
2.3.1	<i>Danos aos quadros elétricos</i>	22
2.3.2	<i>Danos aos indivíduos</i>	25
3	PROTEÇÃO E SELETIVIDADE	27
3.1	Seletividade	27
3.1.1	<i>Seletividade cronológica</i>	27
3.1.2	<i>Seletividade lógica</i>	28
3.2	Importância da proteção e seletividade contra o arco elétrico	28
3.2.1	<i>Equipamentos de proteção do sistema</i>	28
3.2.2	<i>Equipamentos de proteção individuais (EPIs)</i>	31
3.3	Considerações finais	35
4	MODELOS PARA CÁLCULO DE ENERGIA INCIDENTE CC	36
4.1	Modelos	36
4.1.1	<i>Método da máxima potência (Ralph Lee)</i>	36
4.1.1.1	<i>Equacionamento</i>	37
4.1.1.2	<i>Conclusões</i>	39
4.1.2	<i>Modelo de Stokes & Oppenlander</i>	39
4.1.2.1	<i>Características do modelo</i>	40
4.1.2.2	<i>Equacionamento</i>	40
4.1.2.3	<i>Equacionamento para modelo de invólucros</i>	42
4.1.2.4	<i>Conclusões</i>	43

4.1.3	Modelo de Paukert	43
4.1.3.1	<i>Características do modelo</i>	43
4.1.3.2	<i>Equacionamento</i>	44
4.1.3.3	<i>Conclusões</i>	45
4.2	Considerações Finais	45
5	COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE	47
5.1	Metodologia	47
5.2	Stokes & Oppenlander x Paukert x Máxima potência	48
5.2.1	<i>Corrente de arco x Corrente de curto-circuito e Potência de arco x Corrente de curto-circuito</i>	49
5.2.1.1	<i>Tensão de alimentação constante e gap variando</i>	49
5.2.1.1.1	<i>Gap de 5 mm</i>	49
5.2.1.1.2	<i>Gap de 20 mm</i>	51
5.2.1.1.3	<i>Gap de 50 mm</i>	52
5.2.1.1.4	<i>Conclusões</i>	54
5.2.1.2	<i>Tensão de alimentação variando e gap constante</i>	54
5.2.1.2.1	<i>Tensão de alimentação de 125 V</i>	54
5.2.1.2.2	<i>Tensão de alimentação de 250 V</i>	56
5.2.1.2.3	<i>Tensão de alimentação de 500 V</i>	56
5.2.1.2.4	<i>Tensão de alimentação de 1000 V</i>	57
5.2.2	<i>Considerações finais dos gráficos</i>	59
5.3	Comparação dos modelos pela energia incidente	60
5.3.1	<i>Equações para cálculo da energia incidente</i>	60
5.3.2	<i>Comparação entre os modelos pela distância do epicentro do arco até o ponto desejado</i>	61
5.3.2.1	<i>Metodologia Comparativa</i>	61
5.3.2.2	<i>Comparação em 250 VCC, 20 mm e 60 kA de corrente de curto</i>	62
5.3.2.3	<i>Comparação em 125 VCC, 20 mm e 60 kA de corrente de curto</i>	63
5.3.3	<i>Comparação entre os modelos pela variação do gap</i>	65
5.3.3.1	<i>Metodologia Comparativa</i>	65
5.3.3.2	<i>Gráficos das resistências e tensões de arco</i>	66
5.3.3.3	<i>Gráfico da energia incidente</i>	67

5.3.4	<i>Considerações finais</i>	68
6	ESTUDO DE CASO DE UMA PLANTA FOTOVOLTAICA	70
6.1	Descrição da instalação fotovoltaica	70
6.2	Descrição da planta com geradores heliotrópicos	71
6.2.1	<i>Descrição do módulo fotovoltaico</i>	73
6.2.2	<i>Descrição do inversor solar</i>	74
6.3	Metodologia do estudo de caso	76
6.4	Parâmetros	76
6.4.1	<i>Simulação</i>	76
6.4.1.1	<i>Modelagem</i>	77
6.4.1.2	<i>Simulação de arco elétrico no barramento/entrada do inversor</i>	78
6.4.1.2.1	Simulação de arco elétrico Modelo RL	78
6.4.1.2.2	Simulação de arco elétrico Modelo PK	79
6.4.1.2.3	Simulação de arco elétrico Modelo SO	80
6.5	Resultados	81
6.5.1	<i>Energia incidente para gap de 5 mm</i>	81
6.5.2	<i>Energia incidente para gap de 20 mm</i>	82
6.5.3	<i>Energia incidente para gap de 50 mm</i>	82
6.6	Equipamentos de Proteção Individual recomendados	83
7	CONCLUSÃO	84
	REFERÊNCIAS	87
	LEITURA COMPLEMENTAR	91
	ANEXO A – PLANTA DE SITUAÇÃO	93
	ANEXO B – DIAGRAMA UNIFILAR DA INSTALAÇÃO ELÉTRICA	94
	ANEXO C – DIAGRAMA TRIFILAR REFERENTE ÀS FILEIRAS 1, 2, 3, 4 E 5	95
	ANEXO D – DETALHES TORRES HELIOTRÓPICAS	96

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho foca no estudo do cálculo da energia incidente e na proteção contra o arco elétrico em sistemas de corrente contínua (CC), abordando as metodologias de cálculo da corrente de arco e comparando os modelos de cálculo entre si, analisando qual deles se aproxima mais da realidade e qual se distancia mais. Após a comparação, um estudo de caso é realizado em inversores de painéis fotovoltaicos, visando apontar as devidas medidas de proteção dos indivíduos que operam esse sistema e a proteção do sistema em si.

1.1 Relevância do tema

Esse estudo foca na importância da proteção de sistemas de corrente contínua, que vem se popularizando bastante através da geração distribuída, principalmente na geração por energia solar. Com o uso da corrente contínua aumentando cada vez mais, os estudos de proteção relacionados a eles devem acompanhar o andamento, e os efeitos perigosos que o arco elétrico pode causar merecem atenção especial.

Os dados apresentados neste trabalho têm como base os testes de arco elétrico na entrada de inversores presentes em quadros de conversão de sistemas fotovoltaicos, onde a energia gerada fornece uma corrente contínua ao inversor, que tem como saída corrente alternada para a fonte consumidora. Este arco elétrico gerado pode ser destrutivo suficiente para danificar a estrutura do quadro, seus equipamentos e possíveis operadores que estejam manobrando o quadro. No caso de inversores mais usuais, que possuem tensão de trabalho por volta de 600 Vcc, os riscos para o equipamento e operadores é considerável e deve ser previsto a fim de evitar acidentes e imprevistos, já que a falta da utilização dos EPIs adequados para o manuseio desses quadros e a falta de medidas de proteção contra arco elétrico nessas condições são muito comuns.

É imprescindível que os operadores de quadros elétricos tenham um treinamento adequado para atuar de forma correta, respeitando a distância entre eles e o quadro (que deve estar delimitada por uma faixa ao redor da região de risco) e que estejam utilizando o equipamento de proteção adequado mesmo que limitem certos movimentos do usuário. Além disso, o sistema de proteção do quadro deve ser capaz de identificar faltas e falhas às quais o sistema elétrico possa ser submetido. Neste caso específico, os relés de arco são os equipamentos de proteção que este trabalho ressalta para melhor proteger o operador e o sistema elétrico local, extinguindo o arco antes que possa atingir um dos dois.

Para determinar as medidas e equipamentos de proteção é necessário o cálculo da energia incidente proveniente do arco elétrico, que pode ser calculada através de vários métodos, porém são métodos voltados a sistemas de corrente alternada, que geralmente possuem maior potência e, devido a maior segurança nas suas aplicações, recebem maior atenção quanto à proteção contra o arco elétrico. Mas se o estudo da proteção contra o arco em sistemas de corrente contínua evoluir, a sua possível utilização em situações de potência mais elevadas e de tensão mais elevada será bem mais frequente, levando confiabilidade aos estudos científicos e podendo abrir novas possibilidades em diferentes aplicações da corrente contínua.

A maioria dos métodos para cálculo de arco elétrico são empíricos e visam apenas cálculo da corrente de arco, dois desses modelos foram aplicados na obtenção da energia incidente. O método teórico da máxima potência também foi aplicado no cálculo da energia incidente. A comparação entre os modelos de cálculo de energia incidente para sistemas de corrente contínua se faz necessária para validar os métodos entre si

1.2 Objetivos

O objetivo principal desse estudo é a apresentação e comparação dos modelos de cálculo de energia incidente em sistemas de corrente contínua. Comparar cada um dos parâmetros para calcular a energia incidente, utilizando métodos voltados para corrente contínua e outros métodos adaptados para serem utilizados nesses sistemas.

O próximo objetivo é realizar um estudo de caso em plantas fotovoltaicas instaladas no Instituto Leão Sampaio de Ensino Universitário, Campus Lagoa Seca, em Juazeiro do Norte, Estado do Ceará. A instalação é composta por uma planta fixa com potência nominal de 208,08 kWp e uma planta com seguimento solar de 540,54 kWp, onde a segunda planta apresenta fileiras de heliostáticos com um inversor cada. O objetivo do estudo de caso será realizar as comparações entre os modelos realizando faltas nos inversores presentes na segunda planta.

Os resultados obtidos através do estudo de caso serão comparados, sendo possível concluir qual deles melhor define os equipamentos de proteção a serem utilizados.

Assim, este trabalho também identifica a importância que deve ser dada ao estudo da proteção contra arco elétrico em sistemas de corrente contínua e a disseminação do conhecimento adquirido sobre ela, a fim de melhor proteger os operadores desse tipo de sistema e os próprios equipamentos que utilizam ou venham a utilizar esse tipo de fonte.

1.3 Metodologia

Com o intuito de melhor apresentar o arco elétrico em sistemas CC, são apresentadas algumas definições essenciais, que serão pautadas através de citações e desenvolvidas de acordo com a necessidade do conteúdo a ser detalhado.

A partir dos conceitos apresentados, os modelos de cálculo de energia incidente serão demonstrados e aplicados comparativamente, visando designar cada um para uma situação que os caiba. Gráficos serão desenvolvidos a fim de comparar melhor os modelos pelos seus valores de corrente e potência de arco, bem como sua energia incidente.

Os métodos também serão comparados no estudo de caso, analisando as entradas dos inversores presentes nas fileiras da planta fotovoltaica através do *software* ETAP com a finalidade de designar as medidas de proteção cabíveis, ajustando os parâmetros para melhor preparar os quadros e os ambientes que receberão este tipo de circuito e os EPIs que os operadores utilizarão.

1.4 Estrutura do trabalho

Com tantas definições a serem exploradas, este trabalho foi organizado em capítulos, a fim de organizar os conhecimentos necessários para chegar a conclusões palpáveis e questionamentos relevantes, possibilitando a extensão deste estudo em trabalhos futuros sugeridos no decorrer e no fim desta análise.

- a) Capítulo 1 – Introdução. Neste capítulo o tema e os objetivos do trabalho são apresentados.
- b) Capítulo 2 – Arco Elétrico. Este segmento fala das definições do arco elétrico e suas causas e consequências.
- c) Capítulo 3 – Proteção e Seletividade. Aqui são pontuados assuntos importantes que serão utilizados no Capítulo 4 com intuito de calcular a energia incidente.
- d) Capítulo 4 – Modelos Para Cálculo de Energia Incidente CC. São apresentados os três modelos mais conhecidos para cálculo de energia incidente em sistemas CC: Ralph Lee, Stokes & Openlander, e Paukert.
- e) Capítulo 5 – Comparação dos Modelos de Cálculo da Energia Incidente. Os três modelos do capítulo anterior são comparados para mostrar as vantagens e desvantagens de cada modelo em cada parâmetro. Depois, os modelos são

novamente comparados, mas desta vez diretamente com a energia incidente, obtendo uma conclusão sobre a aplicabilidade de cada modelo.

f) Capítulo 6 – Estudo de Caso. Os modelos apresentados nos capítulos anteriores são utilizados para calcular a energia incidente proveniente de um arco elétrico na entrada de inversores presentes na planta fotovoltaica em questão.

g) Capítulo 7 – Conclusão. Este capítulo apresenta as considerações finais sobre o tema. Também enumera sugestões para trabalhos futuros.

2 ARCO ELÉTRICO

2.1. Definição

O arco elétrico consiste na propagação da corrente elétrica por meios isolantes, rompendo o dielétrico e produzindo uma descarga de plasma. São vários os meios isolantes, como por exemplo os gases, que em alguns casos são utilizados para gerar o arco propositalmente (ESCOLA ELECTRA, 2010, p. 21).

O maior exemplo das ocorrências do arco elétrico indesejado é o ar. O meio em que o arco se propaga entra em combustão, atingindo temperaturas de até 20.000°C, sendo a fonte de calor mais quente encontrada no planeta, resultando em uma energia incidente muito alta e perigosa (ABRACOPEL, 2020).

Quando o arco ocorre na pressão atmosférica, ele atinge temperaturas extremamente elevadas, como citado anteriormente, ionizando parcialmente os gases presentes no ambiente e formando, portanto, íons positivos e negativos, possibilitando a passagem de corrente elétrica pelo arco (APPROBATO, 2019).

Apesar de parecer um fenômeno que precisa ser evitado, é muito utilizado na indústria para soldagens, cortes a plasma, e também é utilizado em aparelhos eletrônicos como projetores, monitores de plasma e em equipamentos de iluminação. A aplicação do arco elétrico nos exemplos anteriores varia conforme a situação, sendo controlado para servir da melhor forma possível às suas finalidades e não causar danos aos operadores e usuários (MUNDO DA ELÉTRICA, [2017?]).

É importante lembrar também que as descargas atmosféricas são arcos elétricos, neste caso de grandes magnitudes, na qual o meio de propagação do arco é o ar e os “eletrodos” são as nuvens e a terra, podendo ser gerados entre as nuvens com diferentes potenciais e entre nuvens e o solo ou objetos que se aproximam mais do caminho que o arco tende a seguir.

Mesmo existindo uma vasta gama de possibilidades para a utilização de arcos elétricos e até mesmo fenômenos naturais, eles são indesejados e perigosos no sistema de distribuição de energia, sejam em subestações, na rede ou em quadros elétricos. Esses incidentes podem não só danificar uma parte do sistema elétrico (equipamentos e distribuição de energia), como também ocasionar ferimentos graves a operadores do sistema que estejam próximos. Mesmo que estejam devidamente protegidos, podem ocorrer danos letais devido à energia incidente (*arc flash*), que será abordada mais adiante neste trabalho.

2.2 Causas da falta por arco elétrico

Existem várias causas para formação de arcos elétricos (que, inclusive, foram citadas anteriormente), porém, restringindo essas causas para faltas no sistema elétrico tendo como foco o estudo da proteção estrutural e funcional de quadros de média e baixa tensão, é possível reduzir as possibilidades e explicar mais especificamente como cada uma delas acontece.

A seguir, os dois principais fatores que causam o arco elétrico.

2.2.1 Seccionamento energizado

A abertura de equipamentos seccionadores sem que antes o fornecimento de eletricidade tenha sido cortado pode gerar um arco elétrico (dependendo da intensidade da corrente), fazendo com que, ao abrir o contato energizado, a corrente elétrica supere a isolamento do ar, ou de outro gás presente no meio, e forme um arco entre os condutores. Isto pode acontecer pelo erro de operação do sistema, causando danos ao equipamento e aos operadores sujeitos ao arco. (ESCOLA ELECTRA, 2010, p. 21)

Na figura a seguir é possível analisar a surgimento do arco entre os condutores em uma subestação.

Figura 1 – Arco elétrico em uma subestação.



Fonte: Escola Electra (2010, p. 22).

Vale ressaltar que o arco elétrico gerado por uma corrente alternada tende a se extinguir mais rapidamente que um arco gerado por corrente contínua, já que a corrente CA é cíclica e pontua o valor zero a cada transição de polaridade, enquanto que a corrente CC não passa pelo zero em nenhum instante enquanto está sendo fornecida (ALBANY, 2019).

Até mesmo em disjuntores gerais de residências o arco elétrico ocorre. Quando o circuito é aberto o arco se forma, entretanto é rapidamente extinguido pela câmara de extinção de arco elétrico. A peça laminada é responsável pela extinção do arco formado pela abertura do disjuntor. (VIERRA, 2016).

Como o arco elétrico é proporcional à intensidade da corrente que percorre o circuito, essa situação não é necessariamente perigosa, mas quanto maior a corrente, mais destrutivas as consequências se tornam.

2.2.2 Curto-circuito

O curto-circuito nada mais é do que um caminho de baixa impedância que a corrente irá percorrer ao invés do caminho normal ao qual ela foi designada. No caso do arco elétrico, algumas falhas no material ou externas podem ocasionar o rompimento do dielétrico, ligando uma, duas ou três fases à terra por através do arco.

As correntes de falta por arco são de curto-circuito monofásico, bifásico e trifásico, sendo o mais recorrente no sistema elétrico de potência a falta fase terra (monofásico), que pode evoluir até um curto trifásico por arco ocasionando danos severos aos circuitos envolvidos (MARDEGAN; PARISE, 2018, p. 30).

As faltas por arco elétrico a terra (curto-circuito monofásico), que são as mais comuns, tem duas causas; a redução da isolamento por temperatura, umidade e condições não ideais para seu funcionamento e danos físicos a isolamento, que podem ser causados por sobretensões eventuais – desgastando a isolamento – ou erros operacionais durante manutenções ou manobras (MARDEGAN; PARISE, 2018, p. 30).

As faltas por arco elétrico fase-terra e faltas francas fase-terra diferem no valor da impedância entre o condutor de fase e a terra. Pelo fato do curto que gera a falta franca não ter nenhuma impedância considerável, ela é maior que a falta por arco, que por sua vez pode variar entre 20% a 100% do valor da falta franca. Apesar do valor menor da corrente de falta por arco, ela é bem mais destrutiva do que a falta franca, pois não há energia incidente quando não existe impedância. No caso da falta por arco temos a impedância do meio que se encontra entre a fase

e a terra (MARDEGAN; PARISE, 2018, p. 31). O cálculo da energia incidente será explanado no Capítulo 3.

Mesmo com disjuntores dimensionados para certos valores de curto-circuito, não há garantia de proteção contra um arco elétrico gerado em uma área comprometida da instalação, por isso a grande importância da manutenção preventiva do material da instalação, a fim de prevenir a formação do arco elétrico. No entanto, situações como desequilíbrios de tensão em terminais da instalação ou até mesmo curtos-circuitos podem vir a ocorrer, fazendo-se necessário o estudo da seletividade no sistema de proteção, minimizando ainda mais as possíveis faltas que possam gerar o arco (MARDEGAN, 2011, p. 38).

2.3 Danos causados pelo arco elétrico

Como mencionado anteriormente, o arco elétrico pode ser mortal e extremamente destrutivo. Para que o estudo de proteção contra arco seja feito de forma adequada, os danos causados por ele devem ser obtidos com exatidão, rendendo dados suficientes para que as medidas de proteção do sistema elétrico e da própria estrutura do local sejam tomadas da melhor forma.

A seguir, uma análise dos possíveis danos que o arco elétrico pode causar nos quadros elétricos (onde podem se originar), nas pessoas (operadores em geral) e na estrutura onde o quadro elétrico se localiza. Esta ordem analisada se deve ao caminho destrutivo do arco, começando a analisar no quadro elétrico, onde o arco é gerado e possui a maior energia incidente (*arc flash*). Depois, a análise foca no indivíduo que está sujeito à energia incidente emanada do quadro e, por fim, na estrutura onde o quadro é posto.

2.3.1 Danos aos quadros elétricos

Com o passar dos anos, os quadros elétricos foram melhorando sua estrutura para suportar a demanda de componentes e espaço interno, tudo isso seguindo padrões e metodologias de proteção de várias normas, e mesmo assim são encontradas várias dificuldades para se conter os danos causados pelo arco elétrico.

Para obter um quadro elétrico que resista a uma boa quantidade de energia incidente e mantenha a integridade do seu interior faz-se necessário o conhecimento das consequências destrutivas do arco no interior ou nas proximidades do quadro.

As normas técnicas internacionais em associação com o Brasil e as normas nacionais são responsáveis pela cobrança de qualidade dos quadros elétricos, garantindo que eles passem por testes criteriosos e sejam classificados de acordo com seus rendimentos. Os quadros elétricos que passam por todos os testes são denominados TTA (*Type-Tested Assemblies*, ou Conjunto de Tipo Testado). A norma que rege a fabricação de conjuntos de manobra e controle de baixa tensão (até 1000 VCA, 1500 Vcc e 1000 Hz) é a Norma ABNT NBR IEC 61439-1.

Até o ano de 2017 alguns quadros podiam ser liberados para utilização mesmo não passando por todos os testes propostos pelas normas, sendo denominados como PTTA (*Partially Type-Tested Assemblies*, ou Conjunto de Tipo Parcialmente Testado), até que a versão corrigida da NBR IEC 61439-1 foi posta em prática estimulando a extinção dos painéis PTTA, visando que todos sejam do tipo TTA. Para que um quadro tenha a denominação de TTA ele deve ser aprovado em uma série de testes que podem simular as situações mais drásticas no ambiente em que será instalado. Esses testes são:

- a) elevação de temperatura: visa ver a resistência contra o derretimento de certos componentes do invólucro do painel.
- b) propriedades dielétricas: visa checar a isolamento de certas partes do painel.
- c) corrente suportável de curto-circuito: visa obter a máxima corrente de curto que os componentes que compõem o quadro suportam sem danificar o mesmo.
- d) grau de proteção: proteção contra penetração de corpos sólidos e proteção contra penetração de líquidos, primeiro e segundo algarismos respectivamente (LEGRAND, 2017).
- e) eficácia do circuito de proteção: caso não eficaz, pode vir a danificar componentes e até mesmo partes do quadro.
- f) distância de escoamento e de isolamento: visa checar a distância entre certas partes do painel para garantir o não contato de certas partes.
- g) funcionamento mecânico: algumas falhas podem danificar gavetas ou compartimentos do quadro.

Com estes possíveis danos ao quadro elétrico sendo testados e com o quadro sendo aprovado, garante-se o funcionamento do painel em condições extremas, minimizando danos ao equipamento e aos operadores em condições de falhas, atendendo à demanda das normas regulamentadoras NR-10 e NR-12, desta forma facilitando a segurança do trabalho dos operadores (LEGRAND, 2017).

Para os quadros de média tensão, é necessário que eles suportem as condições severas impostas pelo arco elétrico. Eles devem atender a alguns critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR IEC 62271-200:2007/Versão Corrigida:2007 enquanto estiverem em condições normais de operação, sendo estes:

- a) tampas e portas do quadro não se abrem;
- b) componentes internos ou partes do quadro firmes (não sendo arremessadas);
- c) o invólucro intacto (sem perfurações);
- d) os indicadores verticais externos sem inflamação;
- e) os indicadores horizontais externos sem inflamação;
- f) todas as conexões à terra eficazes.

2.3.2 Danos aos indivíduos

A associação NFPA (*National Fire Protection Association*) produziu normas para a proteção contra eletricidade, criando a NFPA 70E, que é definida pela associação como *Standard for Electrical Safety in the Workplace* (Padrão para Segurança Elétrica no Local de Trabalho). Ela é voltada para os operadores do setor elétrico, os quais se expõem a riscos trabalhando com eletricidade. Basicamente, esta norma mostra como os trabalhadores devem se portar diante do sistema elétrico, conscientizando dos perigos e dos devidos cuidados que devem ser tomados com relação aos equipamentos, manutenção, dentre outros (NFPA 70E, 2015, p. 1/14).

Muito semelhante a essa norma, a Norma Regulamentadora nº 10 também possui tais informações sobre as maneiras seguras de operar não somente painéis elétricos, mas também qualquer tipo de procedimento que envolva eletricidade. Também estipula quais os EPIs (Equipamentos de Proteção Individual) que devem ser utilizados para garantir a máxima segurança aos trabalhadores. É uma norma totalmente voltada para os operadores e técnicos que lidam diretamente com os perigos da eletricidade (NR-10, 2010).

Para a proteção do indivíduo sujeito a tais perigos do arco, os EPIs correspondentes devem atender a três critérios básicos, que são: Condutibilidade, Inflamabilidade e Influências Externas. Seguindo as recomendações das vestimentas mais usuais da NFPA 70E, ainda não se tem uma proteção plena, tendo apenas 95% de chance de não sofrer danos (NFPA 70E, 2015, p. 31 e 32).

Vários testes são feitos no material utilizado para criação dos EPIs específicos para proteção contra arco. Esses testes seguem a norma IEC 61482-1-1 2009, que pede um número mínimo de 20 amostras. Os dados coletados são das:

- a) condições de exposição ao arco: estas condições levam em conta a quantidade de arcos a que o material é submetido, a corrente RMS de arco, os seus valores de pico, a duração do arco e a energia dissipada. Com todas essas condições juntas, pode-se ter uma ideia da resistência do material contra a energia incidente;
- b) energia incidente: existem sensores de temperatura nas amostras, levantando dados da elevação de temperatura, possibilitando a plotagem da distribuição da energia incidente do arco elétrico. A energia incidente é a energia proveniente de um arco elétrico, liberando calor desde seu epicentro até suas proximidades (NFPA 70E, 2015, p. 12);
- c) finalização: são realizados fotografias e vídeos do material exposto no painel para análise posterior.

Alguns cuidados também devem ser tomados quanto ao tratamento do material já sendo utilizado pela empresa. A lavagem do material de algodão se limita a 100 procedimentos de limpeza, pois após isso não há mais garantia de continuidade do fator de proteção. O material pode ser melhorado com fibra, aumentando o número de lavagens (DSST, 2016, p. 3 e 4).

Mesmo com todos esses cuidados com relação aos EPIs e ao manuseio deles, o arco elétrico se mostra como um ponto fora da curva em relação às outras faltas, sendo suficientemente destrutivo para causar danos fatais aos indivíduos que estejam operando o painel mesmo equipados com a proteção adequada no momento. Isto se deve ao fato da progressão da falta, que pode evoluir de um curto-circuito por arco monofásico até um trifásico, aumentando a energia incidente de acordo com a passagem do tempo em que a falta não é extinta (DSST, 2016, p. 3 e 4).

Não limitando a proteção dos envolvidos na operação dos quadros e painéis elétricos aos EPIs, também existem os EPCs (Equipamentos de Proteção Coletivos), que são voltados para a proteção de um time de operadores que estiverem no local.

3 PROTEÇÃO E SELETIVIDADE

Este capítulo visa dar uma breve passagem no conteúdo de proteção e seletividade com a finalidade de mostrar como o sistema elétrico pode se comportar com relação a faltas como o arco elétrico e como a coordenação dos disjuntores pode ajudar a proteger equipamentos e a integridade do quadro como um todo. Também destaca os equipamentos de proteção que devem ser utilizados em cada possível valor de energia incidente.

3.1 Seletividade

A principal função da seletividade é selecionar qual equipamento de proteção deve atuar em qual situação, como por exemplo, na ocorrência de um curto-circuito, o sistema de proteção atua e interrompe a falta apenas no local mais próximo da ocorrência, não desenergizando partes que não foram atingidas pela falta. Dessa forma, além de facilitar a detecção do problema que ocasionou a falta, impede que esta danifique os equipamentos próximos e elimina a falta de forma rápida e, possivelmente, coordenada (MARDEGAN, 2011, p. 30).

Existem vários tipos de seletividade de proteção, dos quais dois são mais importantes para visar a proteção contra o arco elétrico: as seletividades cronológica e lógica, brevemente explicadas a seguir.

3.1.1 Seletividade cronológica

A seletividade cronológica é a medida de proteção utilizada quando se quer que certa região de proteção seja ativada primeiro que outra, temporizando de forma diferente esses equipamentos e de forma intencional, a fim de priorizar a ação de um no lugar do outro. No caso, um desses equipamentos terá o tempo menor que o do outro, a fim de ser ativado primeiro, retardando intencionalmente a ação do outro equipamento e isolando a falta no local determinado pela temporização (MARDEGAN, 2011, p. 31).

3.1.2 Seletividade lógica

A seletividade lógica é um conceito bem recente que trata de relés digitais programáveis, possibilitando a atuação mais rápida, coordenada e confiável dos equipamentos de proteção.

Como o tempo de atuação dos relés digitais é extremamente rápido, chegando a 50 milissegundos, alguns ajustes devem ser feitos a fim de coordenar a sua atuação com a atuação de fusíveis que possam existir no circuito em questão, priorizando a atuação deles, os quais podem levar até 200 ms para atuar, já causando uma grande emissão de energia incidente quando se fala de arco elétrico. (MARDEGAN, 2011, p. 31)

A principal função da seletividade lógica é oferecer uma alta velocidade de resposta dos relés quanto às possíveis faltas do sistema e oferecer também a possibilidade de coordenação entre todos os equipamentos de proteção, de forma que o engenheiro eletricista programe toda a cadeia de proteção para que elimine as faltas e as isole de forma rápida. Assim, os equipamentos de todo o sistema elétrico exposto a essas condições não sofrerão tantos danos como antes, já que a seletividade lógica possibilita a atuação precisa na falta onde ela ocorre. Lembrando que, quanto mais próximo da fonte alimentadora do sistema, maiores os tempos de atuação dos relés, a fim de priorizar manter a alimentação em funcionamento (MARDEGAN, 2011, p. 32).

3.2 Importância da proteção e seletividade contra o arco elétrico

Quanto maior o tempo de duração do arco elétrico, maior a sua capacidade destrutiva, aumentando a energia incidente e danificando cada vez mais os componentes, sistemas e arriscando a integridade dos indivíduos que possam estar no raio de perigo do local, portanto é de suma importância a utilização da proteção de forma precisa e rápida no local da falta (MARDEGAN; PARISE, 2018, p. 31 a 34). A proteção com equipamentos convencionais pode não garantir isso por si só, é preciso a ajuda de componentes específicos que atuem exclusivamente com a aparição de uma falta que possua a ocorrência de arco elétrico.

3.2.1 Equipamentos de proteção do sistema

Existem relés com funções específicas que possibilitam uma ação de proteção contra arcos elétricos. São basicamente duas funções adicionais no relé; uma delas é o sinal de

sobrecorrente, que possui resposta mais rápida que em relés comuns, indicando a possível presença de um curto-circuito que pode indicar um arco; e o outro é o sinal luminoso, onde o relé fotossensível irá identificar o *flash* e mandar um sinal para que a proteção possa atuar devidamente. O sinal que capta a luz neste relé fotossensível é constituído de um cabo de fibra óptica que enlaça o invólucro, enquanto o sinal de sobrecorrente é dado pelo relé (SCHNEIDER ELECTRIC).

O cabo de fibra que enlaça o invólucro (caso seja subdividido, é recomendado um ou dois sensores para cada divisão, visando a proteção de barramentos verticais e horizontais) tem um sensor na sua extremidade que emite um sinal luminoso enquanto em funcionamento. Este sensor capta a luz proveniente do arco e envia o sinal para o relé em questão de milissegundos, mitigando a falta mais rapidamente do que sistemas de proteção usuais. (LITTELFUSE, 2018).

A seguir um esquema exemplificando a explicação anterior, onde o cabo branco é o cabo de fibra óptica e as suas terminações são os sensores.

Figura 2 – Exemplo de cabo enlaçando o quadro.



Fonte: Littelfuse (2018).

Figura 3 – Sensor em funcionamento.



Fonte: Littelfuse (2018).

Caso o sensor não esteja emitindo sinal luminoso, o quadro deve ser fechado imediatamente para a segurança do operador (LITTELFUSE, 2018).

Um exemplo de equipamento para proteção contra arco em corrente alternada são os relés de proteção contra arco VAMP, da Schneider. Comparando a sua atuação específica com sistemas comuns, temos:

Tabela 1 – Comparação dos tempos de extinção de arco.

	Proteção Convencional	Proteção Específica
Saída de alimentador	Função ANSI 50 50 ms + 60 a 110 ms da abertura do disjuntor	Relé VAMP 7 ms + 60 a 67 ms da abertura do disjuntor
Entrada de alimentador	Função ANSI 51 50 ms + 60 a 410 ms da abertura do disjuntor	Relé VAMP 7 ms + 60 a 67 ms da abertura do disjuntor
Tempo total de falta	Tempo prolongado, maior tempo de arco	Extinção da falta entre 67 a 74 ms

Fonte: Schneider Electric.

Onde:

- a) Função ANSI 50 – função de sobrecorrente instantânea;
- b) Função ANSI 51 – função de sobrecorrente temporizada.

Como se pode observar em dados tirados diretamente do fornecedor, a prioridade é extinguir o arco antes de 100 ms, pois passando dessa faixa de tempo existe a certeza de que os equipamentos e o próprio quadro elétrico serão danificados. É possível observar que no sistema de proteção convencional, que não prevê o arco elétrico no seu planejamento de proteção, levam de 110 a 450 ms para isolar a falta, o que pode causar o agravamento do arco.

A seguir, imagens do relé VAMP de proteção contra arco para melhor ilustrar:

Figura 4 – Relés de arco VAMP.



Fonte: Schneider Electric.

3.2.2 Equipamentos de proteção individuais (EPIs)

Primeiramente, os equipamentos de proteção são as últimas linhas de defesa no sistema de proteção contra faltas, e o fato de ser indispensável em situações onde exista a possibilidade de um arco elétrico ressalta ainda mais o perigo que ele oferece. Nem mesmo os equipamentos mais preparados para receber a energia incidente evitam 100% dos danos (DSST, 2016, p. 1 a 3).

Por mais que o sistema de proteção conte com relés ultrarrápidos, sistemas elaborados para que as falhas não venham a acontecer, a ocorrência do arco elétrico ainda é possível, e tendo em vista que a energia incidente proveniente da falta é muito nociva ao corpo humano, e mesmo que não seja em contato direto, o uso dos EPIs se faz obrigatório. Além do que, em sistemas de corrente contínua, não existem equipamentos específicos para proteger o sistema de arcos elétricos. Para melhor prevenir essas situações, vestimentas foram especialmente desenvolvidas levando em consideração os estudos da NFPA 70E para proteger os operadores e indivíduos expostos em áreas que possam ser atingidas.

Esses equipamentos de proteção são separados de acordo com o nível de ATPV (*Arch Thermal Performance Value*) e EBT (*Energy Breakopen Threshold*) do tecido, que

representam o nível de energia incidente que o equipamento pode receber sem causar danos ao indivíduo que o veste e o nível de energia incidente necessária para romper o equipamento respectivamente (HOAGLAND, 2016).

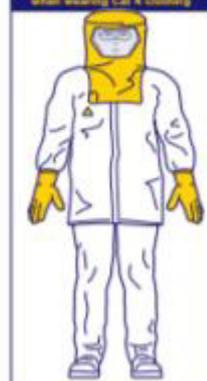
Quando os testes de arco elétrico são realizados, as duas medidas são obtidas, ATPV e EBT. O valor que determinará a classificação das vestimentas será o limitante, ou seja, se o valor de EBT for igual ou menor o de ATPV, então a EBT será utilizada como avaliação do arco elétrico no teste em questão. Caso for maior que o valor de ATPV, então este último será utilizado como avaliação do arco (HOAGLAND, 2016).

Os estágios de risco que os operadores correm ao trabalhar com quadros que podem emitir uma quantidade elevada de energia incidente são classificados em categorias, designando os diferentes materiais para a construção dos EPIs (DSST, 2016, p. 4 e 5). Essas categorias que os equipamentos devem suportar são:

- a) Não Aplicável: menor que 1,2 cal/cm²;
- b) Risco Mínimo (Categoria 0): de 1,2 a 4 cal/cm²;
- c) Risco Moderado (Categoria 1): de 4,1 a 8 cal/cm²;
- d) Risco Elevado (Categoria 2): de 8,1 a 25 cal/cm²;
- e) Risco Elevadíssimo (Categoria 3): de 25 a 40 cal/cm²;
- f) Categoria 4: de 40 cal/cm² em diante.

Segue uma figura que representa os EPIs para cada categoria de energia incidente:

Figura 5 – EPIs para cada categoria de energia incidente.

0 cal/cm ²	4 cal/cm ²	8 cal/cm ²	25 cal/cm ²	40 cal/cm ²
PPE CATEGORY	PPE CATEGORY	PPE CATEGORY	PPE CATEGORY	PPE CATEGORY
0	1	2	3	4
				

Fonte: Energy Safe Victoria – ESV ([2019?], p. 4).

Em todas as categorias é necessário o uso de calça ou macacão com classificação de arco e botas de couro. A partir da Categoria 1 é obrigatório o uso de luvas de couro com classificação de tensão para cada categoria e camisas de manga longa com classificação de arco.

Na Categoria 1, são necessários capacetes com viseiras para a proteção da face e proteção auricular.

Na Categoria 2, é necessário um terno com classificação de arco para a energia incidente nos itens acima.

Na Categoria 3, é necessária uma capa com classificação de arco para proteção da cabeça e pescoço, além de vestimenta superior com classificação de arco para energia incidente da categoria.

Na Categoria 4, é necessária uma vestimenta superior com classificação de arco para energia incidente da categoria.

É importante frisar que as categorias maiores também usam as proteções base citadas nas primeiras categorias. Tendo isto em mente, essas divisões ajudarão a classificar os equipamentos de proteção necessários no estudo de caso mais à frente no trabalho.

A seguir algumas fotos dos EPIs de algumas das categorias:

Figura 6 – Capacete com viseira, Categorias 1 e 2.



Fonte: Mercado Livre.¹

¹ Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-992169071-capacete-viseira-protetor-facial-incolor-seguranca-trabalho- JM> Acesso em: 27 out. 2020.

Figura 7 – Bota de couro.



Fonte: Super EPI.²

Figura 8 – Luvas Categoria 4.



Fonte: EPI Brasil.³

Figura 9 – Capuz Categoria 4.



Fonte: EPI Brasil.⁴

² Disponível em: <https://www.superepi.com.br/bota-de-seguranca-fujiwara-em-couro-he400-tamanho-especial-48-ao-50-bico-de-pvc-ca-28945-p1731/> Acesso em: 27 out. 2020.

³ Disponível em: <https://www.epibrasil.com.br/luva-de-cobertura-nomex-categoria-4-atpv-48-0-p5602/> Acesso em: 27 out. 2020.

⁴ Disponível em: <https://www.epibrasil.com.br/capuz-eletricista-categoria-4-atpv-40-p4950/> Acesso em: 27 out. 2020.

Figura 10 – Túnica Categoria 4.



Fonte: Casa do EPI.⁵

3.3 Considerações finais

Para que o sistema de proteção e os EPIs funcionem de forma correta, é necessário que o dimensionamento seja feito apropriadamente, levando em conta os valores de energia incidentes calculados e testados, sem contar as medidas de segurança implantadas no local onde o quadro elétrico foi instalado e no próprio sistema elétrico.

A relevância dessa proteção é indispensável para quadros elétricos de qualquer tipo, incluindo quadros que recebem a energia gerada por geração distribuída. A corrente que chega nesses quadros é CC e os cálculos de energia incidente apresentados na NFPA 70E e IEEE 1584 são voltadas para corrente CA, inviabilizando a aplicação dos modelos lá apresentados nesses quadros.

Daí vem a importância do aprofundamento do estudo do cálculo da energia incidente em sistemas CC, que são amplamente utilizados na geração distribuída, aumentando cada vez mais com o passar dos anos, já que a viabilidade da implementação é deveras atrativa.

Para se ter medidas precisas de proteção, é necessário que haja cálculos precisos de corrente e tensão, visto que esses são diretamente proporcionais à potência, possibilitando valores precisos de energia incidente levando ao dimensionamento correto dos equipamentos de proteção do sistema e individuais.

⁵ Disponível em: <https://casadoepi.com.br/produto/macacao-nomex-ae-categoria-4-dupont/> Acesso em: 27 out. 2020.

4 MODELOS PARA CÁLCULO DE ENERGIA INCIDENTE CC

Neste capítulo serão apresentados os métodos científicos disponíveis para calcular a energia incidente proveniente do arco elétrico relativos a sistemas de corrente contínua, equacionando os parâmetros com o intuito de mensurar o poder destrutivo do arco a fim de proteger os operadores ou indivíduos próximos ao acontecimento da falta.

O modelo utilizado na corrente alternada por Ralph Lee pode ser utilizado, com suas devidas alterações, na corrente contínua, que foi incluída nos estudos da IEEE em 2010 juntamente com novos modelos e ganhou espaço na NFPA 70E em 2012, completamente adaptado para modelos de corrente contínua.

4.1 Modelos

Existem, basicamente, três modelos mais relevantes para o estudo do arco elétrico em sistemas CC para o cálculo da energia incidente, que são:

- a) método da máxima potência (Ralph Lee);
- b) método de Stokes & Oppenlander;
- c) método de Paukert.

O primeiro método citado foi também o primeiro modelo a ser implementado, no ano de 1982 por Ralph Lee, porém foi voltado para sistemas CA e, em 2010, depois de 28 anos, foi adaptado para sistemas CC por Daniel R. Doan. (DOAN, 2010, p. 2299 a 2302).

Com o intuito de melhor entender o modelo de Ralph Lee como um todo, será mostrado o que ele assumiu para que fosse possível o equacionamento da energia incidente.

4.1.1 Método da máxima potência (Ralph Lee)

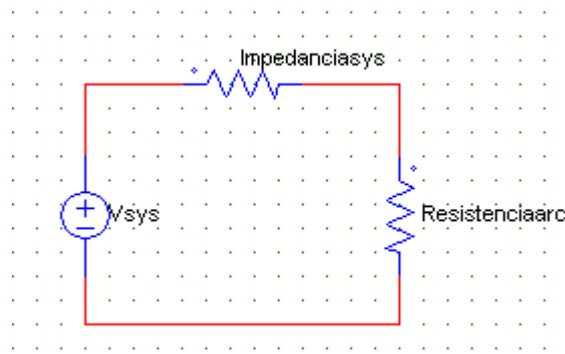
Ralph Lee assumiu primeiramente que o arco elétrico, e seu modelo, fossem considerados como uma esfera e utilizou a teoria da transferência de calor. Portanto, a grandeza da energia incidente é dada por calorias por centímetro quadrado (cal/cm^2) para estipular quanta energia será transferida do arco elétrico até outra esfera, que no caso seria um indivíduo (LEE, 1982, p. 247 e 248).

Em termos de circuito, para saber a quantidade de energia transferida do arco elétrico para algum corpo, que se assume como uma carga já que se comportará como uma, é necessário saber a resistência e a queda de tensão nessa carga. Como não se tinha como saber

essas características, Lee adotou que a resistência da carga seria equivalente a impedância do circuito e que a queda de tensão na carga, por consequência, seria a metade da tensão da fonte do circuito, logo, igual à queda de tensão na impedância do circuito (DOAN, 2010, p. 2299)

Abaixo, um circuito que sintetiza o que foi descrito no parágrafo passado, com suas duas resistências idênticas para que haja a máxima transferência de potência.

Figura 11 – Circuito equivalente para situação de arco.



Fonte: elaborada pelo autor.

Onde:

- a) V_{sys} – Tensão do sistema;
- b) $Impedancia_{sys}$ – Impedância do sistema;
- c) $Resistencia_{arc}$ – Resistência da carga.

Essas suposições levam exatamente ao estudo da máxima transferência de potência em circuitos, dando nome ao modelo que Ralph Lee criou.

4.1.1.1 Equacionamento

Com essas considerações, tem-se que a corrente de arco é a metade da corrente de curto-circuito, facilitando a demonstração da equação da energia incidente.

Primeiro passo será calcular a potência do arco. Como já se sabe a queda de tensão e a resistência da carga (DOAN, 2010, p. 2299), tem-se que:

$$P_{arc} = \frac{V_{arc}^2}{R_{arc}} \quad (1)$$

Onde:

- a) P – Potência do arco (W)
- b) V_{arc} – Queda de tensão na carga (V)
- c) R – Resistência da carga (Ω)

Passo 1:

Utilizando o que foi assumido anteriormente, temos que a queda de tensão na carga é metade da tensão do sistema e que a resistência da carga é igual à do sistema para que haja a máxima transferência de potência, obtendo a seguinte equação (DOAN, 2010, p. 2299):

$$P_{arc} = \frac{\frac{V_{sys}^2}{2}}{R_{arc}} \quad (2)$$

Onde:

- a) V_{sys} – Tensão do sistema

Passo 2:

Agora, para calcular a energia proveniente do arco é preciso multiplicar a potência pelo tempo, e para obter o valor energético em calorias é preciso multiplicar a equação pela constante 0,239, obtendo a seguinte equação (DOAN, 2010, p. 2299):

$$E = 0,239 \cdot \frac{\frac{V_{sys}^2}{2}}{R_{arc}} \cdot T_{arc} \quad (3)$$

Onde:

- a) E - Energia (cal)
- b) T_{arc} – Tempo de duração do arco (s)

Passo 3:

Para se obter a energia incidente em calorias por centímetro quadrado, é preciso saber a área que o arco irá atuar (DOAN, 2010, p. 2300). Foi adotado que ele atua de forma esférica, portanto temos que a área utilizada é:

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

Onde:

a) D – Distância do arco até a carga (cm)

Passo 4:

Dividindo a energia pela área, temos a equação final da energia incidente (DOAN, 2010, p. 2300):

$$IE = 0,005. \frac{V_{sys}^2}{R_{arc}. D^2}. T_{arc} \quad (5)$$

Todo esse equacionamento foi feito para ambientes abertos. No caso de o quadro estar fechado quando o arco ocorrer, se faz necessário multiplicar por três o resultado obtido pela equação (5).

4.1.1.2 Conclusões

Tendo em vista que suas suposições não foram tão precisas, esse método é considerado extremamente conservador. Testes foram feitos na época (durante a década de 1980) para avaliar a precisão do método de Ralph Lee. Com os dados obtidos, os testes de referência da NFPA 70E apontaram que:

- a) em sistemas de baixa tensão, o método da máxima potência chega a 80% dos valores reais;
- b) em sistemas de média tensão, o método da máxima potência diverge bastante dos valores reais.

A partir dessas análises do método da máxima potência, a NFPA 70E estipulou que a usabilidade deste método só seria válida até a tensão de 1000 Vcc.

4.1.2 Modelo de Stokes & Oppenlander

No ano de 2010, um artigo foi publicado na IEEE que analisava testes de arco elétrico em corrente contínua nos anos 1990. Eram mais de nove modelos dedicados a esses testes com o intuito de se obter a iluminação que o arco elétrico pode fornecer, como

mencionado no capítulo introdutório. Desses nove modelos publicados, os que melhor se aplicam ao cálculo da energia incidente a fim de proteger os indivíduos expostos são os de Stokes & Oppenlander (AMMERMAN *et. al.*, 2010, p. 1810).

Para compreender melhor o desenvolvimento do modelo de Stokes & Oppenlander é preciso salientar que se trata de um método empírico, onde os cientistas levantam dados de testes a fim de traçar curvas que descrevam as características do fenômeno estudado, para que então o modelo possa ser criado através do equacionamento pelas variáveis conhecidas e utilizadas no teste.

4.1.2.1 Características do modelo

O estudo conduzido realizou o teste de arco elétrico CC, verticais e horizontais, em ambiente aberto (AMMERMAN *et. al.*, 2010, p. 1813 e 1814). Para que o modelo fosse levantado de forma direcionada, certos parâmetros foram alinhados de forma a corroborar com os testes. A seguir tem-se as características as quais os testes foram realizados:

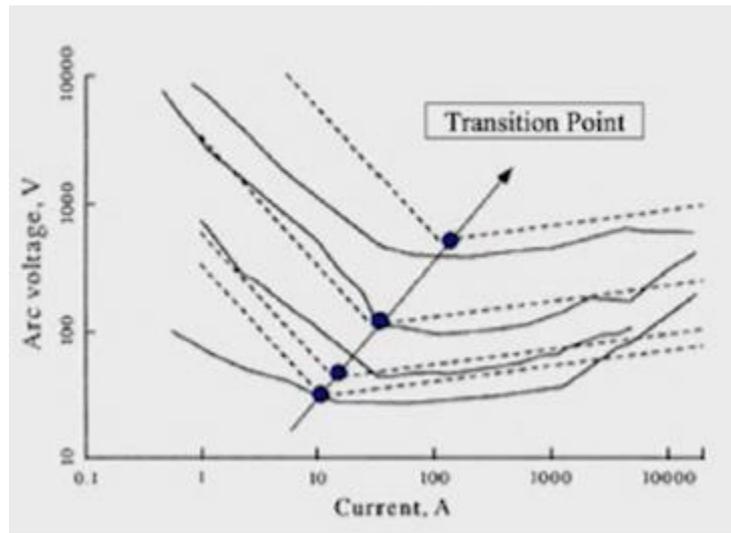
- a) corrente menor que 1 kA contínua;
- b) corrente menor que 20 kA alternada (50 Hz);
- c) *gaps* de 5 a 500 mm;
- d) tensão de alimentação 6 kV ou 100 kV.

4.1.2.2 Equacionamento

Através dessas características de teste, os cientistas levantaram curvas de tensão de arco por corrente e, a partir das curvas obtidas, traçaram novas curvas a partir dos parâmetros pré-estabelecidos, como o tamanho do *gap*, a tensão de arco, tensão de entrada, e a corrente de arco (AMMERMAN *et. al.*, 2010, p. 1814).

No gráfico a seguir, cada curva representa um valor de *gap*, que são 5, 20, 100 e 500 milímetros, respectivamente, de baixo para cima.

Gráfico 1 – Curvas de Corrente por tensão de arco do modelo SO.



Fonte: Ammerman *et. al.*, 2010, p. 1814.

O gráfico mostra que a corrente cai à medida que a tensão de arco sobe até o ponto de transição, onde o oposto começa a acontecer.

Com essas análises empíricas, apesar de analisar o gráfico apenas pela tensão de arco, o equacionamento do modelo de Stokes & Oppenlander resultou nas seguintes equações:

$$V_{arc} = (20 + 0,534 \cdot Zg) \cdot I_{arc}^{0,12} \quad (6)$$

$$R_{arc} = \frac{(20 + 0,534 \cdot Zg)}{I_{arc}^{0,88}} \quad (7)$$

Onde:

- a) V_{arc} – Tensão de arco (V)
- b) R_{arc} – Resistência do arco (Ω)
- c) Zg – *Gap* do eletrodo
- d) I_{arc} – Corrente de arco (A)

A partir dos equacionamentos de resistência de arco e tensão de arco, é possível estimar a energia incidente proveniente do arco elétrico com as equações de potência e energia. Para que essas equações sejam precisas quando se compara aos valores reais, os valores das equações de tensão e resistência de arco devem ser precisos.

A continuação desse equacionamento foi feita por R. F. Ammerman, que utilizou os equacionamentos empíricos de Stokes & Oppenlander para equacionar a energia incidente proveniente do arco elétrico (AMMERMAN *et. al.*, 2010, p. 1816). Começando com a energia, que se dá pela potência vezes o tempo, temos a seguinte equação:

$$E = V.I.T \quad (8)$$

Com os equacionamentos de tensão de arco e resistência de arco, é possível obter o resultado da energia na equação (8), que nos leva ao equacionamento da energia incidente.

O modelo de Ralph Lee foi aproveitado por Ammerman para calcular a energia incidente. A consideração feita por Lee de que a energia do arco se espalharia como um a esfera foi adotada por Ammerman, portanto, no equacionamento – da mesma forma que foi feito da equação (3) a (5) – deve-se dividir a equação (8) pela equação (4) (AMMERMAN *et. al.*, 2010, p. 1816), obtendo:

$$IE = \frac{V_{arc}.I_{arc}.T_{arc}}{4.\pi.D^2} \quad (9)$$

Esse foi o modelo que Ammerman obteve após equacionar a energia incidente a partir dos equacionamentos empíricos de Stokes & Oppenlander.

4.1.2.3 Equacionamento para modelo de invólucros

A maioria dos equacionamentos focam no arco elétrico em ambientes abertos, de forma vertical e horizontal, pelo fato das ocorrências da maioria dos arcos elétricos se darem em situações de manobra, como citado no capítulo introdutório. Porém, existe a possibilidade de a energia liberada pelo arco elétrico em invólucros fechados incidir em algum indivíduo próximo ao quadro, que pode ser fatal bem como em situações de invólucros abertos.

Como cada quadro elétrico possui sua arquitetura, visando acomodar da melhor forma os equipamentos que estarão em seu interior, os parâmetros adotados para calcular a energia incidente são os mais variados possíveis, focando o número de componentes, espaço livre dentro do quadro, temperatura de operação, dentre outros. O modelo apresentado por Ammerman foi voltado em uma equação adaptativa, onde o engenheiro responsável seria capaz de calcular com os parâmetros do quadro em mãos (AMMERMAN *et. al.*, 2010, p. 1817).

A seguir, a equação para invólucros fechados:

$$IE = k \cdot \frac{V_{arc} \cdot I_{arc} \cdot T_{arc}}{a^2 + D^2} \quad (10)$$

Onde:

a) k e a – Parâmetros que dependem das configurações do invólucro.

4.1.2.4 Conclusões

O método empírico de Stokes & Oppenlander, juntamente com o equacionamento da energia incidente de Ammerman, tinham como objetivo encontrar valores menos conservadores quando se diz respeito à proteção dos indivíduos, levantando dados a partir de testes e traçando curvas a fim de ter uma precisão bem definida.

Os testes foram realizados com uma vasta faixa de valores de tensão de entrada e de *gaps*, com a finalidade de ver como as curvas se comportam com o aumento e diminuição desses valores. Desta forma, pode-se limitar a utilização do equacionamento pelos parâmetros adotados inicialmente, assegurando o funcionamento da aplicação na faixa de valores apresentada no começo do tópico 4.1.2.1.

4.1.3 Modelo de Paukert

O modelo de Paukert também se baseou em um estudo empírico, porém utilizou dados coletados de seus próprios estudos e testes, tendo dados ainda mais específicos para cada situação de arco. Mais uma vez, esses estudos foram realizados em ambiente aberto, tendo em vista que a aplicação do cálculo da energia incidente só se deu nos equacionamentos de Ammerman, que também se aplica ao modelo de Paukert.

4.1.3.1 Características do modelo

Assim como Stokes & Oppenlander, Paukert estabeleceu os valores que seriam trabalhados para executar os testes de forma mais eficiente e concisa (AMMERMAN *et. al.*, 2010, p. 1814), definindo as seguintes faixas de valores:

a) correntes entre 0.3 A até 100 kA alternada (50 hz);

b) corrente menor que 1 kA;

c) *gaps* de 1 a 200 mm.

É importante salientar que Paukert também realizou estudos em correntes de impulso e também analisou arcos elétricos na horizontal e na vertical, bem como no modelo anterior (AMMERMAN *et. al.*, 2010, p. 1814).

4.1.3.2 Equacionamento

O equacionamento de Paukert visou a tensão e resistência, como nos modelos passados, utilizando testes e gráficos para elaborar equações em cima de parâmetros já conhecidos, mostrando mais uma vez o quão seu trabalho é empírico (AMMERMAN *et. al.*, 2010, p. 1814).

Diferentemente do modelo de Stokes & Oppenlander, Paukert equacionou a tensão e a resistência com valores fixos de *gap*, alterando a equação para cada passo do *gap*. Essa configuração visava obter valores mais precisos da energia incidente em cada caso (AMMERMAN *et. al.*, 2010, p. 1814).

Os valores obtidos em cada um destes testes estão na tabela abaixo, que apresenta os equacionamentos levando em conta as faixas de valores de corrente de arco maiores que 100 A e menores que 100 kA.

Tabela 2 – Fórmulas empíricas de arco para $100 \text{ kA} > I_{\text{arc}} > 100 \text{ A}$.

Gap (mm)	Tensão de arco (V)	Resistência de arco (Ω)
1	$13,04 \cdot I_{\text{arc}}^{0,098}$	$13,04 \cdot I_{\text{arc}}^{-0,902}$
5	$14,13 \cdot I_{\text{arc}}^{0,211}$	$14,13 \cdot I_{\text{arc}}^{-0,838}$
10	$16,68 \cdot I_{\text{arc}}^{0,163}$	$16,68 \cdot I_{\text{arc}}^{-0,836}$
20	$20,11 \cdot I_{\text{arc}}^{0,190}$	$20,11 \cdot I_{\text{arc}}^{-0,810}$
50	$29,35 \cdot I_{\text{arc}}^{0,194}$	$29,35 \cdot I_{\text{arc}}^{-0,805}$
100	$34,18 \cdot I_{\text{arc}}^{0,241}$	$34,18 \cdot I_{\text{arc}}^{-0,759}$
200	$52,63 \cdot I_{\text{arc}}^{0,264}$	$52,63 \cdot I_{\text{arc}}^{-0,735}$

Fonte: Ammerman *et. al.*, 2010, p. 1814.

Já valores obtidos nos equacionamentos levando em conta as faixas de valores de corrente de arco menores que 100 A estão na tabela abaixo:

Tabela 3 – Formulas empíricas de arco para $I_{arc} < 100$ A.

Gap (mm)	Tensão de arco (V)	Resistência de arco (Ω)
1	$36,32 \cdot I_{arc}^{-0,124}$	$36,32 \cdot I_{arc}^{-1,124}$
5	$71,39 \cdot I_{arc}^{-0,186}$	$71,39 \cdot I_{arc}^{-1,186}$
10	$105,25 \cdot I_{arc}^{-0,230}$	$105,25 \cdot I_{arc}^{-1,230}$
20	$153,63 \cdot I_{arc}^{-0,278}$	$153,63 \cdot I_{arc}^{-1,278}$
50	$262,02 \cdot I_{arc}^{-0,310}$	$262,02 \cdot I_{arc}^{-1,310}$
100	$481,20 \cdot I_{arc}^{-0,350}$	$481,20 \cdot I_{arc}^{-1,350}$
200	$662,34 \cdot I_{arc}^{-0,283}$	$662,34 \cdot I_{arc}^{-1,283}$

Fonte: Ammerman *et. al.*, 2010, p. 1814.

Com o valor fixo do *gap*, todas as fórmulas se focam na corrente de arco obtida nos testes realizados por Paukert e nos dados de suas pesquisas. Assim como no método anterior, Ammerman aplicou esses equacionamentos da tensão e da resistência de arco no procedimento do cálculo da energia incidente, que consiste no mesmo esqueleto das equações (8) a (10), porém aplicando o modelo de Paukert (AMMERMAN *et. al.*, 2010, p. 1814).

4.1.3.3 Conclusões

O modelo de Paukert se assemelha muito com o modelo de Stokes & Oppenlander, o que levou Ammerman a juntar os seus trabalhos e modelar a energia incidente de acordo com os equacionamentos empíricos deixados pelos três. Com certas limitações comparado ao modelo anterior, como a faixa de valores do *gap*, o modelo de Paukert se destaca pela fixação dos valores das aberturas e equacionamento por um único parâmetro, que seria a corrente de arco.

Apesar de algumas considerações diferentes terem sido tomadas com relação aos modelos empíricos apresentados, a sua semelhança é inegável, deixando a dúvida sobre a semelhança entre os resultados práticos desses estudos e sua aplicabilidade em certas situações.

4.2 Considerações Finais

Dentre os três modelos apresentados, o que mais se distancia da metodologia adotada entre eles foi o modelo de Ralph Lee, que se justifica devido ao período em que foi

desenvolvido, tendo todas as limitações da época e com pouco conhecimento em testes sobre arco. Este modelo foi mais teórico e conservador que os outros apresentados, mas fez suposições cruciais sobre a forma de energia que o arco elétrico espalha sendo representado como uma esfera, ajudando bastante nos cálculos não só de seu modelo, mas como nas aplicações de Ammerman em modelos futuros.

Os modelos empíricos de Stokes & Oppenlander e Paukert são bem semelhantes, diferindo apenas na forma em que o seu equacionamento foi concebido, onde os primeiros estudiosos visavam utilizar o *gap* como uma variável a ser adicionada no equacionamento, e onde Paukert fixou esses valores e utilizou apenas a corrente de arco como sua variável para o equacionamento. Ambos utilizaram como valores de saída a tensão de arco e a resistência de arco, possibilitando que Ammerman apenas aplicasse o conceito de potência, energia e energia incidente, finalizando a aplicação desses modelos no estudo da energia incidente.

Estes três métodos, dentre os diversos disponíveis sobre arco elétrico em sistemas de corrente contínua, são os mais palpáveis e mais difundidos quando se trata de proteção de indivíduos contra a ação da energia incidente. A partir deles são estipulados os EPIs necessários para operar quadros nos quais o perigo de arco seja ao menos cogitado, favorecendo a proteção do usuário e, não obstante, são levantados dados suficientes para sinalizações no ambiente em que o quadro estiver instalado, indicando regiões perigosas onde indivíduos não treinados não podem trafegar.

5 COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE

Neste capítulo, os três modelos apresentados anteriormente serão comparados com o intuito de demonstrar quais deles são efetivos em determinadas situações, utilizando os parâmetros de cada um como ponto em comum para comparar os valores obtidos de tensão de arco, corrente de arco e resistência de arco, sem contar com a energia incidente, que é o foco da comparação.

Como a energia incidente apresentada anteriormente foi basicamente toda aplicada por Ammerman, tendo em vista que os modelos empíricos focaram apenas na resistência e tensão de arco, comparar esses modelos precisará da ajuda de ferramentas computacionais para aplicar valores nos equacionamentos de Ammerman e compará-los a fim de traçar curvas e checar se estão próximas entre si ou se diferem demais. A necessidade de ferramentas computacionais se deve ao fato de que os equacionamentos de Stokes & Oppenlander e Paukert são não-lineares, o que dificulta bastante uma análise mais direta.

5.1 Metodologia

Como visto no capítulo anterior, cada um dos modelos utilizou limitações iniciais a fim de obter resultados mais controlados no fim dos seus testes, utilizando valores de tensão, de corrente e de *gaps* limitados. Comparando os modelos de Stokes & Oppenlander (SO) e Paukert (PK), temos algumas características em comum. Essa interseção será feita para ajustar os valores que foram testados e autenticados nos modelos de ambos, sem sair da faixa de valores de nenhum dos dois modelos. Quando os valores divergirem bastante, serão nivelados pela menor faixa apresentada entre os modelos, e assim também será feito entre esses e o modelo de máxima potência de Ralph Lee.

O foco será na plotagem de gráficos para comparar o comportamento da resistência de arco, corrente de arco e energia incidente. Para direcionar melhor a análise, serão utilizados certos valores, levando em conta as limitações também impostas nos modelos:

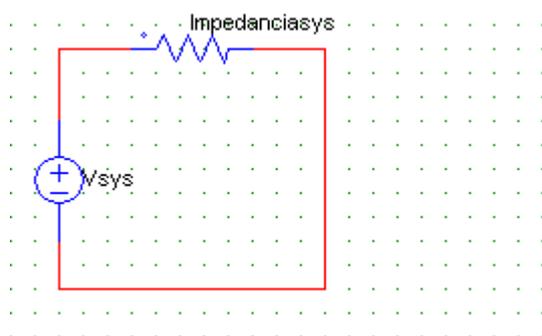
- a) tensão de operação: 250 Vcc, 500 Vcc e 1000 Vcc;
- b) *gap*: 5 mm, 25 mm, 50 mm, 100 mm e 200 mm;
- c) corrente de curto-circuito: 1 kA até 100 kA.

Dessa forma, já temos as faixas de valores a serem comparadas com a dos modelos, gerando uma intercessão plausível para trabalhar as comparações.

Assim como no cálculo do modelo da máxima potência, o circuito utilizado para os modelos SO e PK é o mesmo da Figura 11 do item 4.1.1, onde os valores de corrente de arco serão considerados para calcular as resistências e tensões de arco a fim de descobrir a impedância do sistema.

Com a impedância do sistema calculada, a corrente de curto-circuito pode ser calculada, já que será a corrente circulando no circuito onde a resistência de arco é desprezada, representado pelo circuito a seguir:

Figura 12 – Circuito equivalente para curto-circuito.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com este circuito representativo da Figura 12 e os valores da tensão do sistema e impedância do sistema, a corrente que circula na malha é a corrente de curto-circuito, que será utilizada para comparar os modelos e suas correntes de arco.

5.2 Stokes & Oppenlander x Paukert x Máxima potência

Começando pela comparação destes três modelos, é preciso pegar as considerações de limitação feitas no início do trabalho sobre cada um. Essas faixas de valores já foram apresentadas no capítulo anterior, mas, para fins didáticos e comparativos, serão repetidos.

A seguir, tem-se as considerações feitas pelos dois modelos:

Tabela 4 – Dados de testes dos modelos SO e PK.

	SO	PK
Corrente	Até 1 kA	Até 1 kA
Corrente de Curto-circuito	1 kA ou 100 kA	0,3 kA a 100 kA
Gap	5 mm a 500 mm	1 mm a 200 mm

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na tabela 4 o *gap* é limitado para uma faixa de valores de 5 a 200 mm usando a intercessão dos dois modelos, a corrente de curto é nivelada por baixo a partir de 1kA e as correntes do sistema convergem para o valor de 1kA. É importante lembrar que o fator limitante entre os dois é a tensão de alimentação, nivelada por baixo pelo valor de 6 kV no modelo SO.

Como o modelo RL não foi desenvolvido a partir de testes, a única limitação será a tensão, recomendada pela NFPA 70E de 1000Vcc para este modelo.

5.2.1 Corrente de arco x Corrente de curto-circuito e Potência de arco x Corrente de curto-circuito

Como mencionado no capítulo introdutório, a corrente de arco é comparada em porcentagem com a corrente de curto-circuito e a potência de arco é comparada em porcentagem com a máxima potência. A corrente de arco pode variar bastante do valor total do curto-circuito dependendo das circunstâncias, bem como a potência de arco. Entretanto, a energia incidente proveniente do arco é extremamente maior que a do curto-circuito. Com essa informação, será traçado um gráfico comparando a porcentagem das correntes de arco em relação as correntes de curto-circuito dos três modelos em diferentes situações de tensão de alimentação e de *gaps*.

5.2.1.1 Tensão de alimentação constante e gap variando

Com esta análise é possível identificar o comportamento dos modelos quando o *gap* varia. A variação dos valores de *gap* será feita de acordo com os valores encontrados no modelo de Paukert, já que neste existe um equacionamento de resistência e tensão para cada valor de *gap* de 1 até 200 mm.

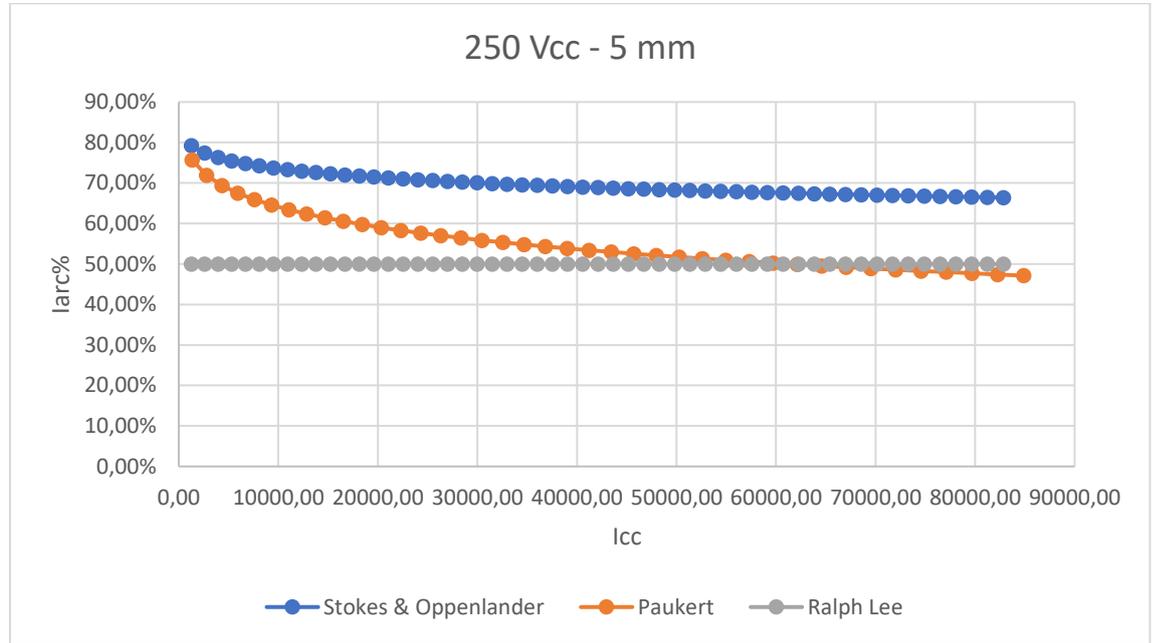
P% - Porcentagem que a potência de arco representa da máxima potência

Iarc% -Porcentagem que a corrente de arco representa da corrente de curto circuito

5.2.1.1.1 *Gap* de 5 mm

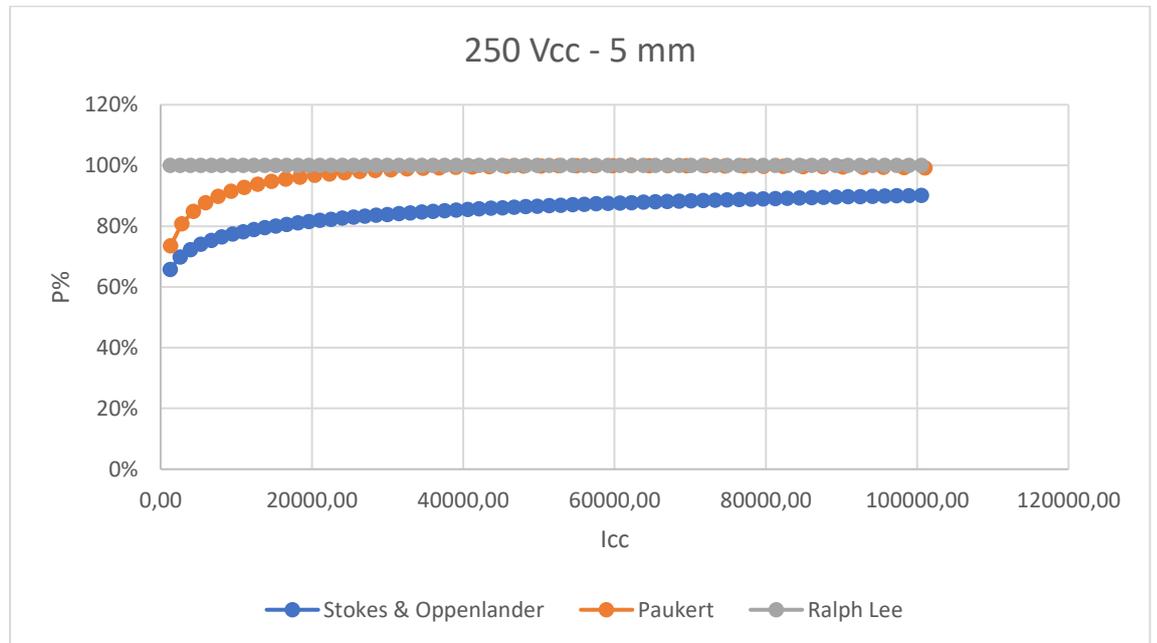
Segue o gráfico comparativo:

Gráfico 2 – Modelos SO, PK e RL em 250 Vcc e 5 mm Iarc% x Icc.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 – Modelos SO, PK e RL em 250 Vcc e 5 mm P% x Icc.



Fonte: Elaborado pelo autor.

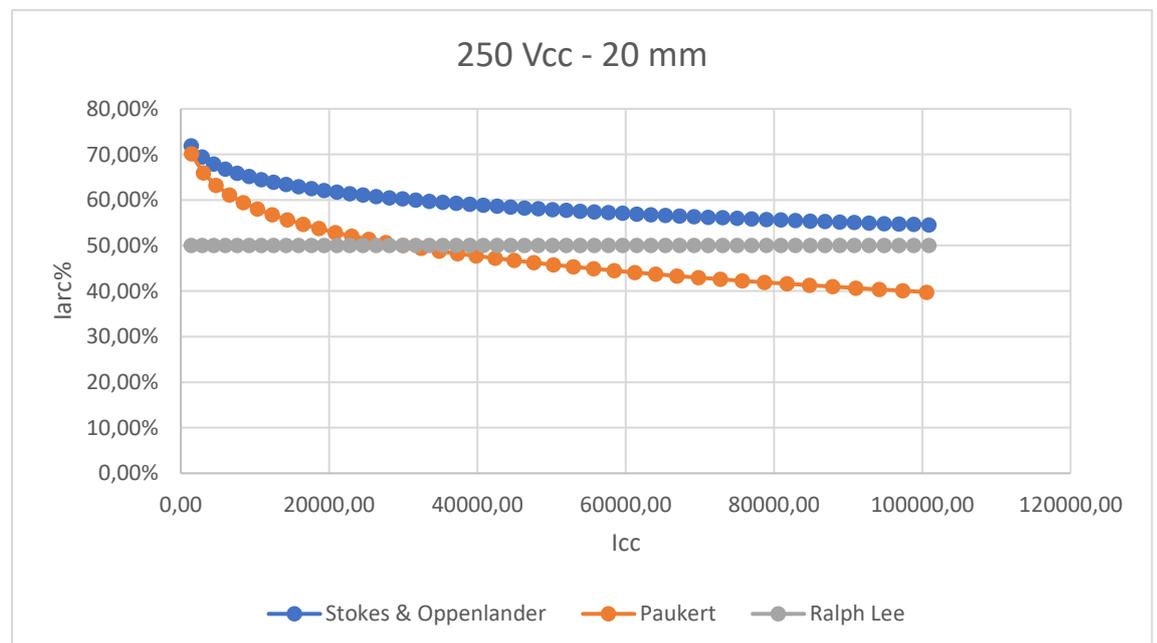
É possível notar que, como esperado, o modelo de Ralph Lee da máxima potência mantém a corrente de arco constante em 50% do valor da corrente de curto, enquanto o modelo PK vai se estabilizando próximo aos 50% e o modelo SO se estabilizando na faixa de 70%. Neste caso, a convergência entre o modelo RL e o modelo PK foi evidente, destoando apenas do modelo SO que apresentou valores mais elevados de corrente de arco.

O comportamento das curvas de potência mostra ainda melhor a convergência entre os modelos PK e RL, onde esses convergem para a máxima potência, o que era de se esperar já que suas correntes também convergiram. Já o modelo SO, que encontrou valores maiores de corrente de arco, acabou estabilizando na faixa dos 90% da máxima potência.

5.2.1.1.2 *Gap* de 20 mm

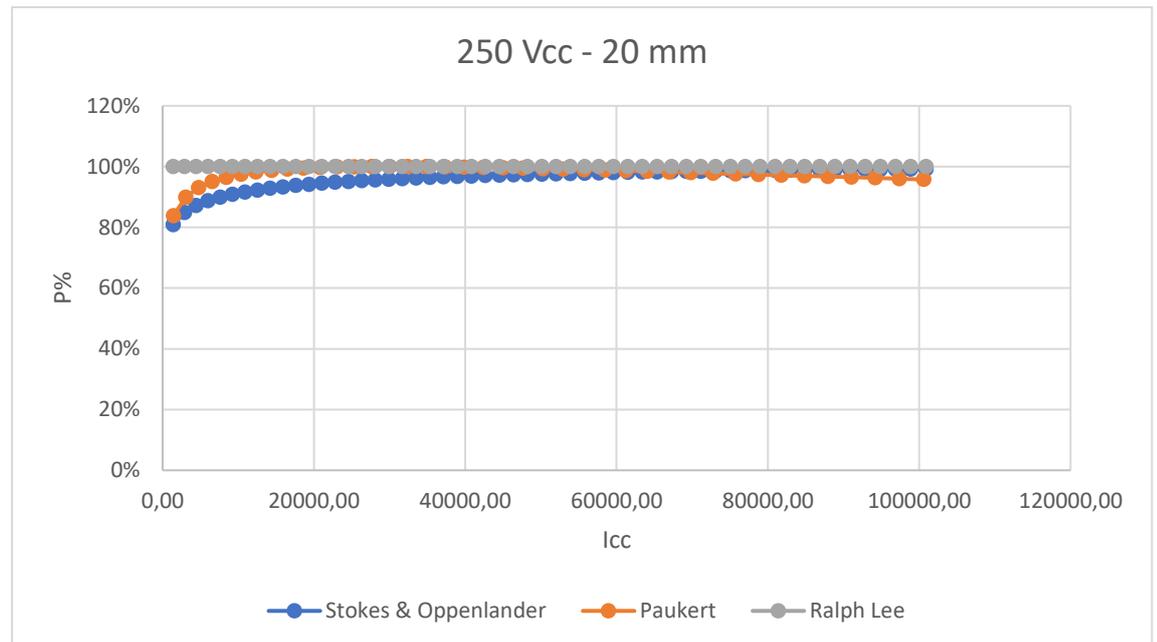
Segue o gráfico comparativo:

Gráfico 4 – Modelos SO, PK e RL em 250 Vcc e 20 mm $I_{arc}\%$ x I_{cc} .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 5 – Modelos SO, PK e RL em 250 Vcc e 20 mm P% x Icc.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com este novo valor de *gap*, o modelo SO se aproximou do modelo RL e PK, validando a aplicação desses três modelos em situações com parâmetros iguais aos abordados neste caso, com os três modelos convergindo a corrente de arco para 50% do valor da corrente de curto-circuito, ainda que os valores encontrados no modelo SO tenham sido maiores que os de PK.

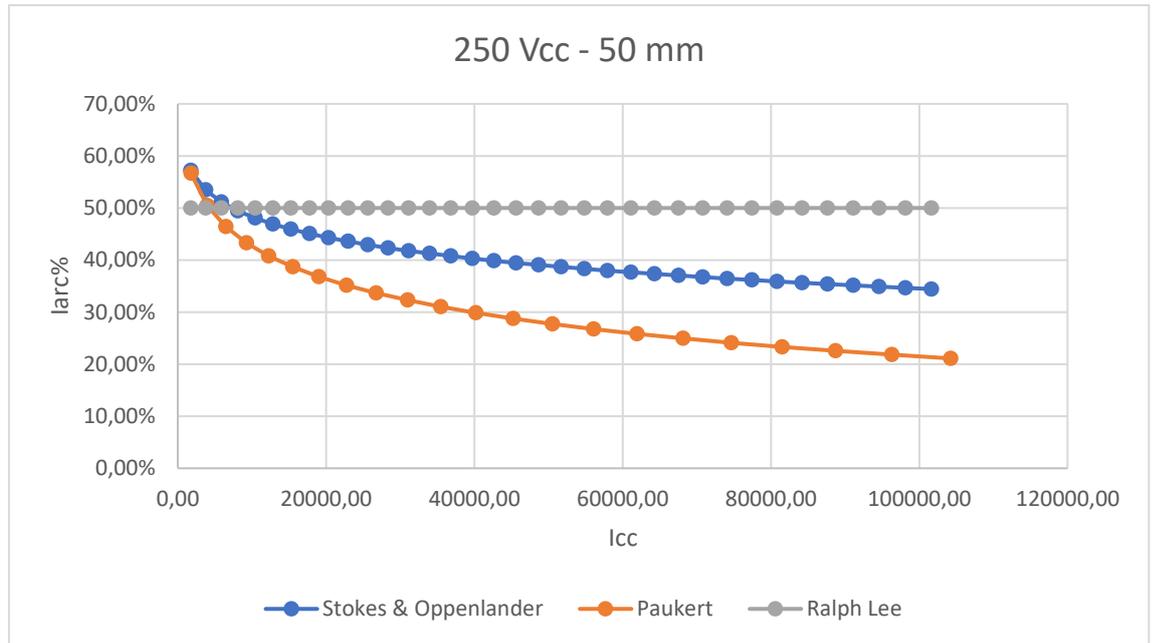
Olhando para a curva de potência, a convergência ficou ainda mais clara, os três modelos se comportando de forma bem parecida levando a potência de arco à máxima potência.

É possível observar que no modelo PK, que cruza a linha do modelo RL e tem seus valores de corrente um pouco abaixo dos 50% no decorrer da curva, quanto ao gráfico de potência, sua potência começa a cair um pouco após passar do valor da metade da corrente de curto, efeito este advindo do conceito de máxima transferência de potência.

5.2.1.1.3 *Gap* de 50 mm

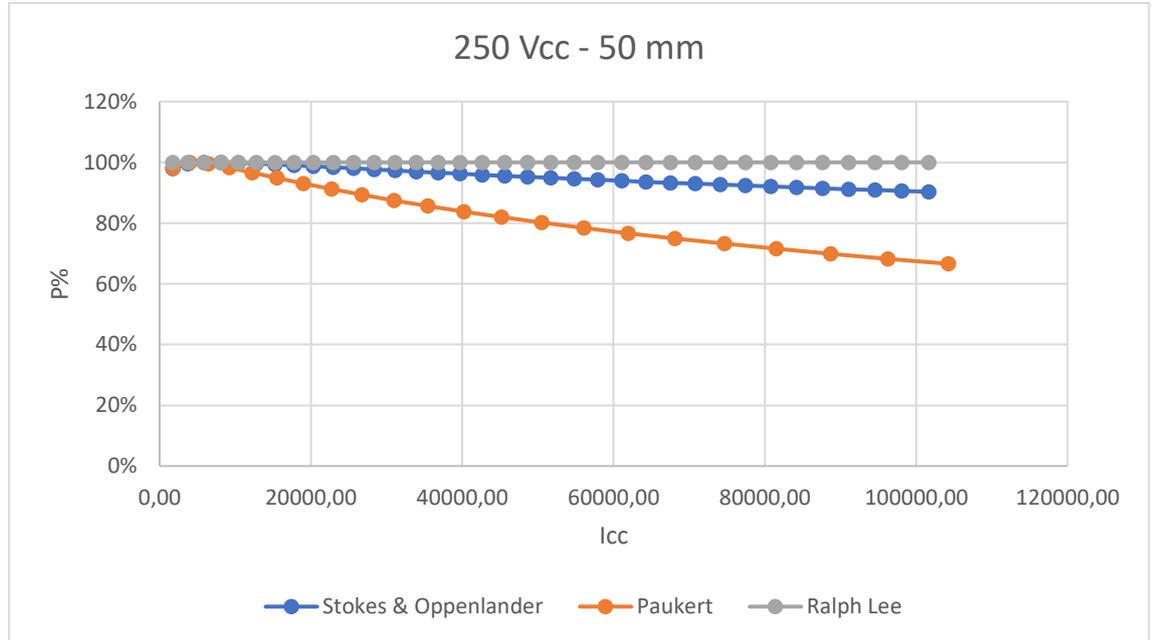
Segue o gráfico comparativo:

Gráfico 6 – Modelos SO, PK e RL em 250 Vcc e 50 mm Iarc% x Icc.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 7 – Modelos SO, PK e RL em 250 Vcc e 50 mm P% x Icc.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já é notável a diferença entre os três modelos, enquanto o modelo RL se mantém constante com o aumento do *gap*, que favorece a extinção do arco e redução na potência de

arco, os outros dois modelos tendem a ter sua corrente e potência de arco reduzida, como esperado, convergindo entre si em comportamento, mas divergindo entre magnitude de valores.

Nas curvas de potência, é possível observar que a porcentagem de potência de arco da máxima potência nos modelos empíricos começa a descer, já que os valores de corrente de arco estão diminuindo em porcentagem de corrente de curto.

É interessante salientar o ponto de transição no começo da curva, onde o modelo RL é cortado pelas outras duas curvas no gráfico de corrente. É possível analisar o “rebatimento” que as curvas deram nos 100% de potência.

5.2.1.1.4 Conclusões

Entre as três situações apresentadas, os modelos SO e PK convergiram em todas as situações, mesmo que o primeiro tenha apresentado valores de corrente de arco maiores, convergindo com o modelo RL quando o *gap* foi de 20 mm e continuando reduzindo a corrente de arco à medida que o *gap* foi aumentando.

Quanto aos gráficos de potência, estes facilitaram as constatações entre os três modelos, mostrando como eles de fato convergem e como se comportam quando os valores de corrente de arco são maiores ou menores que 50% da corrente de curto-circuito, somente alcançando exatamente este valor quando a impedância do sistema se equivale ao valor de resistência de arco encontrado pelos equacionamentos.

Nessa faixa de valores apresentadas, a indicação da utilização desses três ainda é inconclusiva, necessitando de mais dados para a análise de sua aplicabilidade.

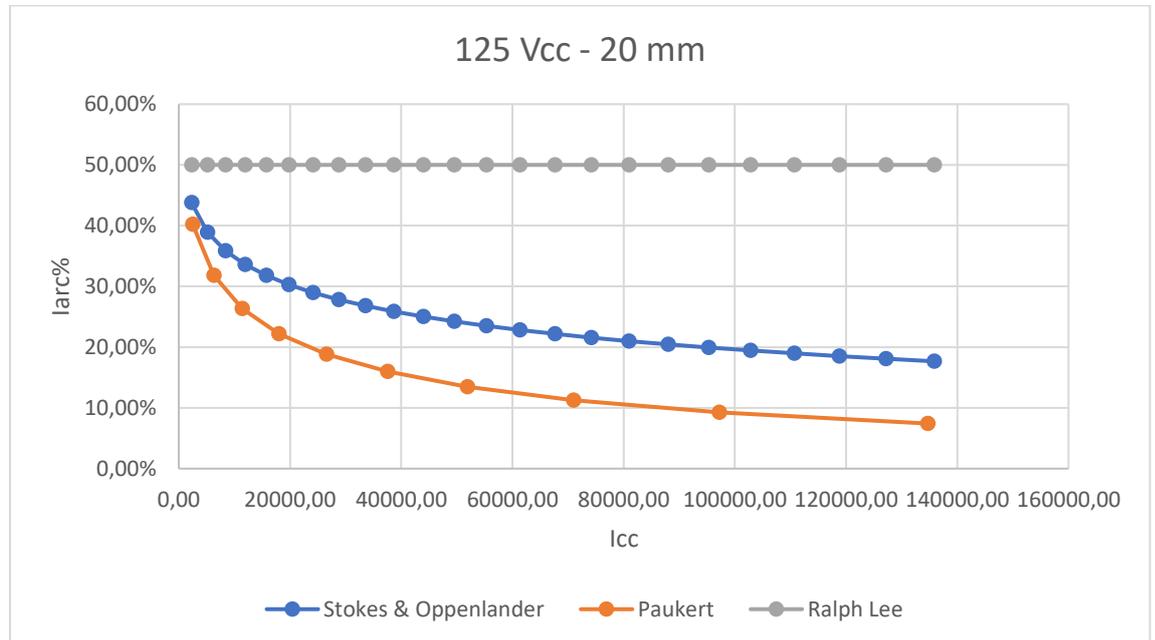
5.2.1.2 Tensão de alimentação variando e *gap* constante

Como nos testes anteriores os modelos convergiram de forma mais notória com um *gap* de 20 mm, este será o valor adotado para variar a tensão de alimentação do circuito, utilizando as tensões de 125, 250, 500 e 1000 Vcc para comparar o comportamento de cada curva.

5.2.1.2.1 Tensão de alimentação de 125 Vcc

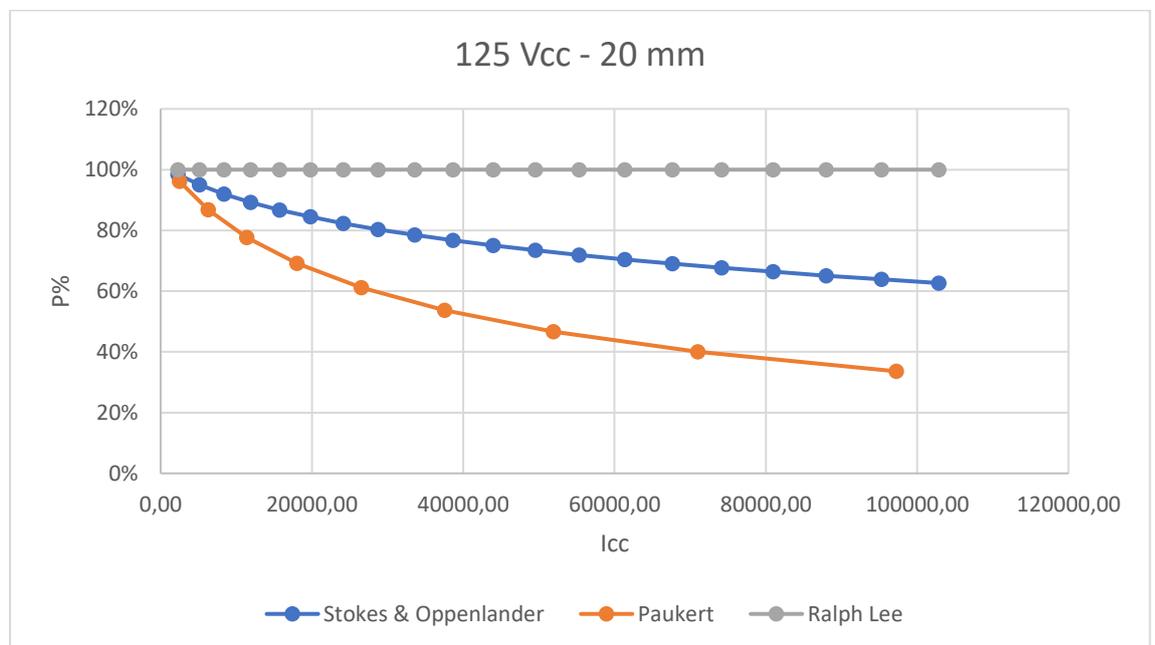
Segue o gráfico comparativo:

Gráfico 8 – Modelos SO, PK e RL em 125 Vcc e 20 mm Iarc% x Icc.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 9 – Modelos SO, PK e RL em 125 Vcc e 20 mm P% x Icc.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível analisar a insistente convergência entre os modelos SO e PK, ao menos no formato de suas curvas, o que era esperado devido à natureza de seu estudo científico, sendo

os dois modelos derivados de formulações empíricas. Mas, já que os testes usados como parâmetros foram diferentes, os valores em si divergem, criando uma dúvida entre qual dos dois modelos é de fato mais consistente. Quanto ao modelo teórico de Ralph Lee, que tem suas limitações, em certas circunstâncias converge com os outros dois modelos, o que não foi o caso nesse item.

As correntes de arco estão bem menores que as de curto-circuito nos modelos empíricos, chegando ao mínimo, no modelo PK, de menos de 10% da corrente de curto. Como comentado nos itens anteriores, o modelo de SO ainda mantém valores de corrente maiores.

As curvas das potências de arco se comportaram de maneira diferente neste caso, pelo fato de a corrente estar se distanciando da faixa de valores que proporcionam a máxima transferência de potência.

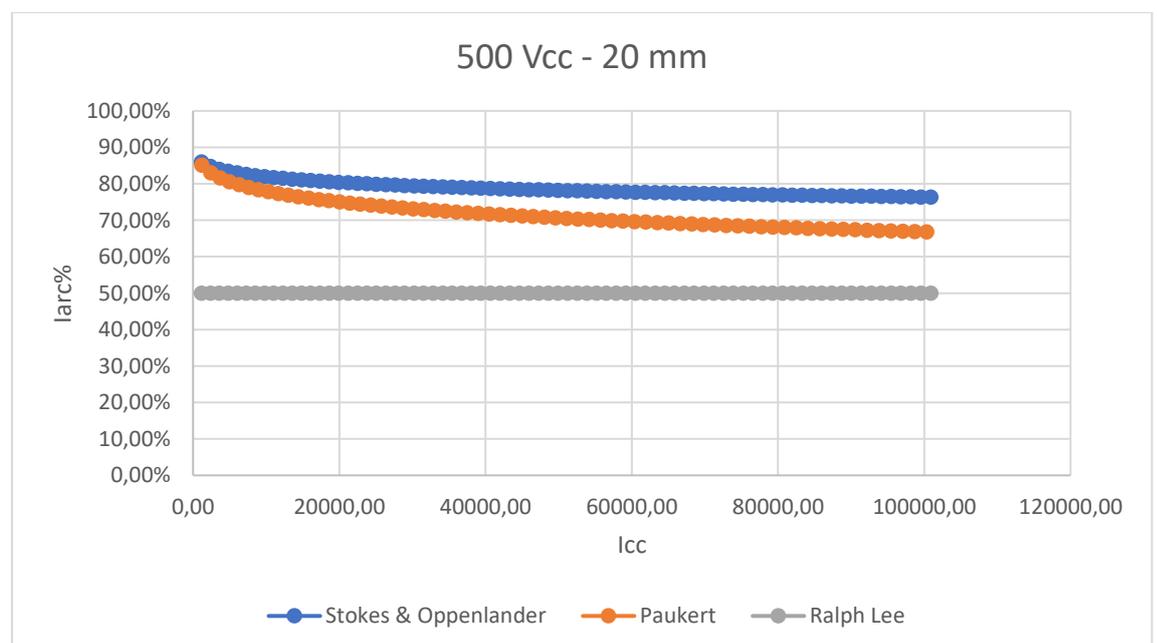
5.2.1.2.2 Tensão de alimentação de 250 Vcc

Esta exata situação foi verificada no item 5.2.1.1.2

5.2.1.2.3 Tensão de alimentação de 500 Vcc

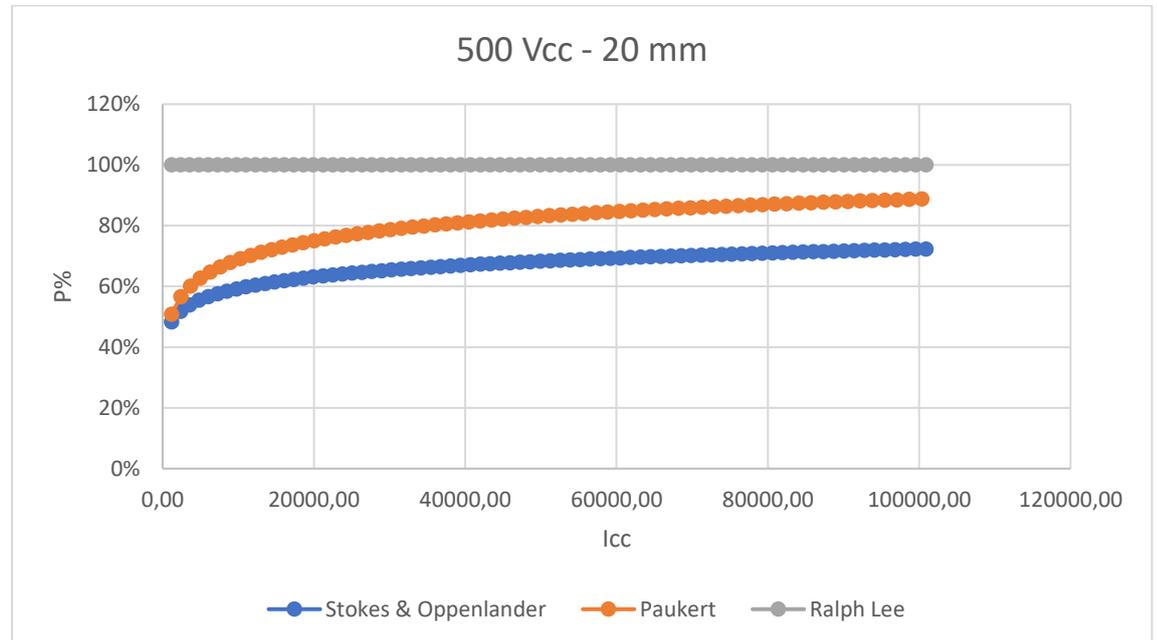
Segue o gráfico comparativo:

Gráfico 10 – Modelos SO, PK e RL em 500 Vcc e 20 mm $I_{arc}\%$ x I_{cc} .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 11 – Modelos SO, PK e RL em 500 Vcc e 20 mm P% x Icc.



Fonte: Elaborado pelo autor.

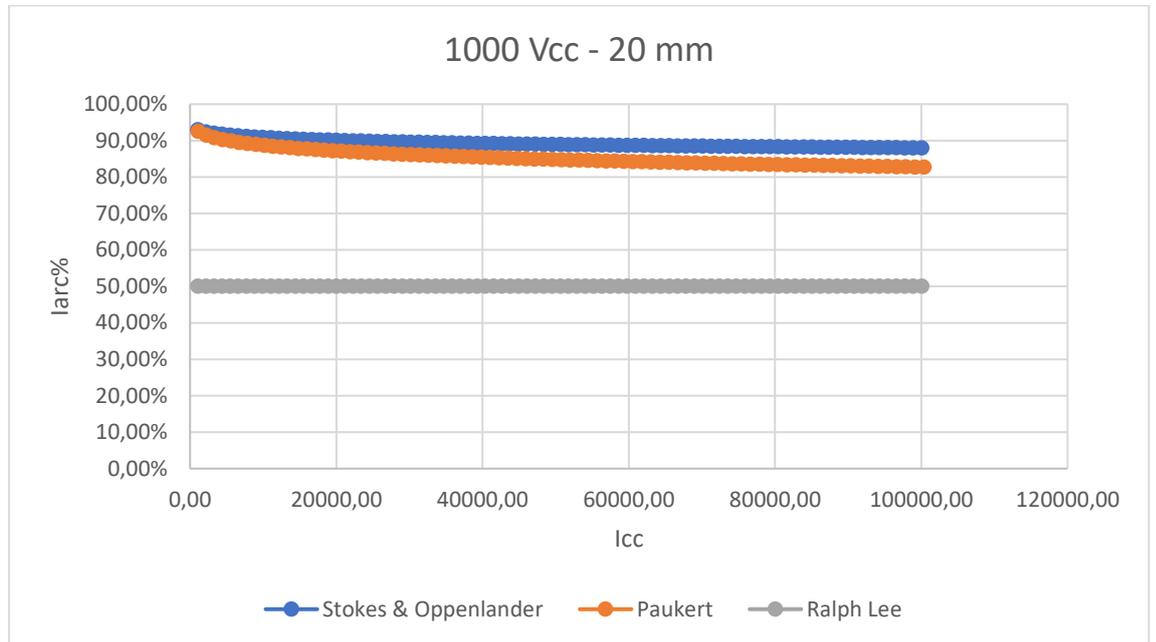
Mais uma vez a convergência entre os modelos empíricos pode ser observada, aumentando a corrente de arco de acordo com o aumento da tensão de alimentação, e, neste caso em específico, as curvas se comportam ainda mais parecidas do que nos casos passados.

É notória o retorno do comportamento da curva de potência ao padrão que seguia antes do item 5.2.1.2.1, já que as curvas de corrente voltaram a convergir com o valor do modelo RL.

5.2.1.2.4 Tensão de alimentação de 1000 Vcc

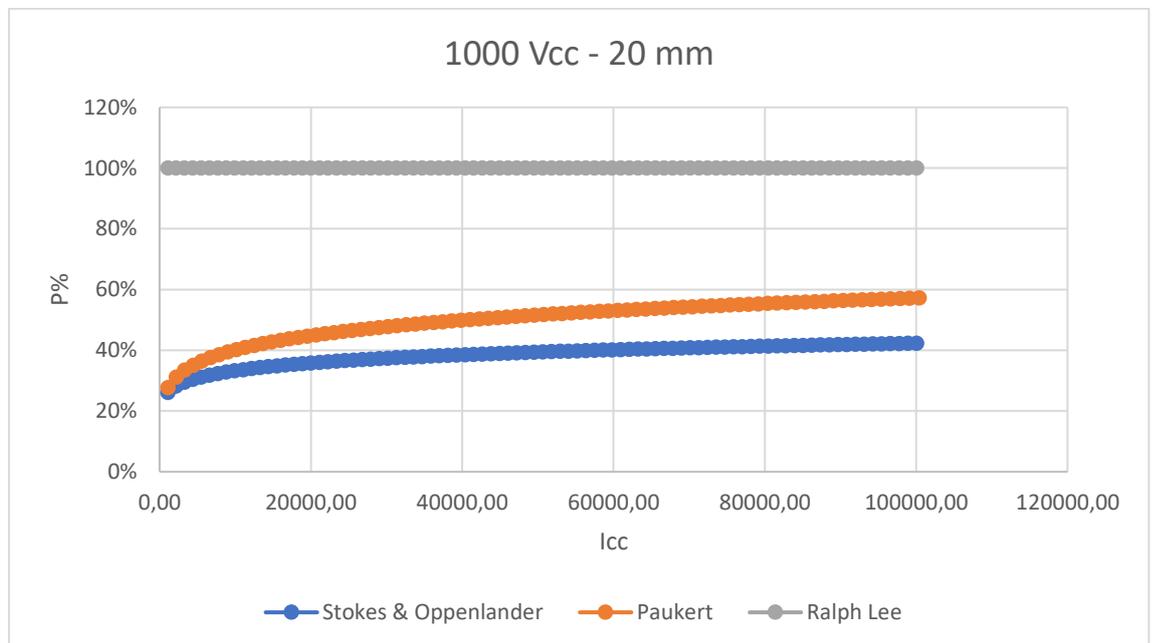
Segue o gráfico comparativo:

Gráfico 12 – Modelos SO, PK e RL em 1000 Vcc e 20 mm Iarc% x Icc.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 13 – Modelos SO, PK e RL em 1000 Vcc e 20 mm P% x Icc.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As curvas dos modelos empíricos estão ainda mais próximas e aproximando ainda mais os valores das correntes de arco aos valores das correntes de curto-circuito, seguindo a lógica de que, com o aumento da tensão, a corrente também irá aumentar.

As curvas de potência estão distantes do ponto em que ocorre a máxima transferência de potência, mas mantém o mesmo comportamento observado nos itens anteriores.

5.2.2 Considerações finais dos gráficos

Com estes gráficos, é possível tecer diversos comentários sobre o comportamento de cada modelo nas respectivas configurações de tensão de alimentação e de *gaps* adotados em cada um dos passos anteriores. Primeiramente vale ressaltar a diferença no tempo da elaboração dos modelos, que diferem por aproximadamente 30 anos entre o modelo de Ralph Lee e os modelos empíricos demonstrados.

A primeira observação notória é que as correntes de arco são sempre maiores no modelo SO. Em todos os gráficos traçados, a curva se excede do valor obtido na curva de Paukert. Quanto ao modelo de máxima potência, variou bastante quanto a comparação com outros modelos, dependendo dos parâmetros adotados, podendo convergir com eles ou destoar em algumas circunstâncias impostas.

Em alguns casos o modelo de Ralph Lee divergiu dos outros modelos, o que pode levar o questionamento: “Este modelo deve ser considerado?”

A resposta é que este modelo deve ser considerado dentro de uma faixa de valores aceitável para o seu comportamento, bem como citado pela NFPA 70E, que são os valores nos quais existe uma convergência entre os três modelos. Essas faixas de valores, portanto, são confiáveis para se ter um dimensionamento de equipamentos de proteção em geral, podendo utilizar quaisquer um dos três métodos.

O que faz os modelos se afastarem bastante entre si são os extremos, onde eles não convergem. Alguns casos podem ter configurações que não fazem sentido na prática, como por exemplo uma situação da tensão de alimentação de 1000 V com um *gap* de 5 mm ou uma situação de 125 V com 200 mm de *gap*. Esses valores dificultam a sustentação do arco elétrico. A partir desses extremos, podemos concluir que o método da máxima potência de Ralph Lee apresenta um comportamento atípico nesses casos específicos, já que os outros dois modelos convergem no formato das curvas, mesmo com as correntes mais altas de Stokes & Oppenlander.

5.3 Comparação dos modelos pela energia incidente

Falando em termos de energia incidente, tem-se uma relação quase direta entre a corrente de arco e a potência em si, trazendo a comparação do tópico anterior de volta. Com base nessa informação, algumas suposições podem ser feitas, como a de que a energia incidente no modelo SO será maior em valor que a energia de PK, sendo os valores das duas superadas pelo valor da máxima potência, o que era de se esperar já que é um modelo bem mais conservador.

Esta análise se torna mais complexa devido ao tempo de extinção de arco, que depende de como a seletividade de proteção foi disposta no sistema em questão. A partir daí várias variáveis entram em questão:

- a) se a corrente de arco for maior e a extinção do arco for mais rápida, pode-se obter menores valores de energia incidente;
- b) se a corrente de arco for menor e a extinção do arco for mais demorada, pode-se obter maiores valores de energia incidente;
- c) se a corrente de arco se mantiver e a extinção do arco se manter.

Nestes três casos citados acima, os valores da energia incidente podem variar de diversas formas ou até mesmo se manter constante nos três casos, tendo em vista que nas fórmulas apresentadas no Capítulo 4, a tensão, corrente e tempo de arco são diretamente proporcionais.

Para adicionar o tempo de extinção de arco pelo circuito como uma variável, tem-se que equacionar a curva de atuação do disjuntor que está selecionado para a abertura de acordo com a seletividade, bem como a atuação de fusíveis, que variam de acordo com cada um utilizado.

Para melhor analisar esta situação, os modelos serão definidos com o mesmo tempo de reação para quaisquer proteções que estejam dispostas no sistema, possibilitando até uma análise mais geral e aplicável em várias situações.

5.3.1 Equações para cálculo da energia incidente

As equações apresentadas nos itens 4.1.1.1, 4.1.2.2, 4.1.2.3 e 4.1.3.2 serão as necessárias para o cálculo da energia incidente, tendo em vista o equacionamento de Ammerman para os modelos empíricos e a formulação de Ralph Lee.

A tabela a seguir mostra as equações para cálculo da energia incidente de cada modelo:

Tabela 5 – Equações para energia incidente.

	SO	PK	RL
Tensão de Arco	$V_{arc} = (20 + 0,534 \cdot Zg) \cdot I_{arc}^{0,12}$	Tabela 3 Item 4.1.3.2	$\frac{V_{sys}}{2}$
Resistencia de Arco	$R_{arc} = \frac{(20 + 0,534 \cdot Zg)}{I_{arc}^{0,88}}$	Tabela 3 Item 4.1.3.2	R_{sys}
Energia Incidente	$IE = \frac{V_{arc} \cdot I_{arc} \cdot T_{arc}}{4 \cdot \pi \cdot D^2}$	$IE = \frac{V_{arc} \cdot I_{arc} \cdot T_{arc}}{4 \cdot \pi \cdot D^2}$	$IE_m = 0,005 \cdot \frac{V_{sys}^2}{R_{arc} \cdot D^2} \cdot T_{arc}$
Energia Incidente para Invólucros	$IE = k \cdot \frac{V_{arc} \cdot I_{arc} \cdot T_{arc}}{a^2 + D^2}$	$IE = k \cdot \frac{V_{arc} \cdot I_{arc} \cdot T_{arc}}{a^2 + D^2}$	$IE_m = 0,015 \cdot \frac{V_{sys}^2}{R_{arc} \cdot D^2} \cdot T_{arc}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Estas foram as equações levantadas até agora que serão utilizadas para fazer os cálculos comparativos da energia incidente.

Não existe diferença entre o cálculo da energia incidente em regiões abertas nos três modelos, já que Ammerman aplicou a fórmula da energia incidente em certa área com os valores obtidos pelos estudos empíricos de Paukert e Stokes & Oppenlander.

5.3.2 Comparação entre os modelos pela distância do epicentro do arco até o ponto desejado

Os parâmetros serão fixados de acordo com resultados anteriormente obtidos e a distância entre o epicentro do arco e o ponto de cálculo será aumentada gradativamente para que seja monitorado o comportamento da energia incidente nos três casos.

5.3.2.1 Metodologia Comparativa

Como as equações para modelos em invólucros necessitam de parâmetros específicos do quadro em questão, o que varia bastante e dificulta a comparação desses modelos, as análises serão feitas para as equações de energia incidente em ambiente aberto, comparando os valores adquiridos pelos três modelos e analisando a aplicabilidade de cada um.

Como o tempo de duração do arco (T_{arc}) também varia bastante de acordo com o sistema de proteção utilizado e como os circuitos de corrente contínua possuem uma carência de proteção contra arco, serão utilizados os parâmetros obtidos pelo relé VAMP, voltado para corrente alternada, apresentado no item 3.2.1, idealizando um sistema de proteção utópico para circuito CC utilizando os tempos de extinção de arco da Tabela 1 deste item, que variam entre 67 a 74 milissegundos. Será fixado o valor de 70 ms para o estudo dos casos.

Os valores comparativos utilizados no capítulo anterior serão novamente utilizados aqui, para valores fixos de *gap* variando a tensão e valores fixos de tensão variando o *gap*.

Os valores de D, que é a distância entre o epicentro do arco até o ponto em que se desejam calcular a energia incidente, serão variados para mensurar as diferenças entre os três modelos.

5.3.2.2 Comparação em 250 Vcc, 20 mm e 60 kA de corrente de curto

O primeiro caso a ser comparado será o caso da convergência dos três modelos, que ocorreu no item 5.2.1.1.2, onde o *gap* foi de 20 milímetros e a tensão de alimentação foi de 250 V. O valor aproximado ao da convergência dos três modelos foi quando a corrente de curto-circuito era de 60 kA. Este ponto será utilizado para calcular a variação da energia incidente de acordo com a distância do ponto em que se deseja calcular.

Para facilitar a análise da energia incidente, segue uma tabela com os valores das energias de arco nos três casos:

Tabela 6 – Valores de potência nos três modelos.

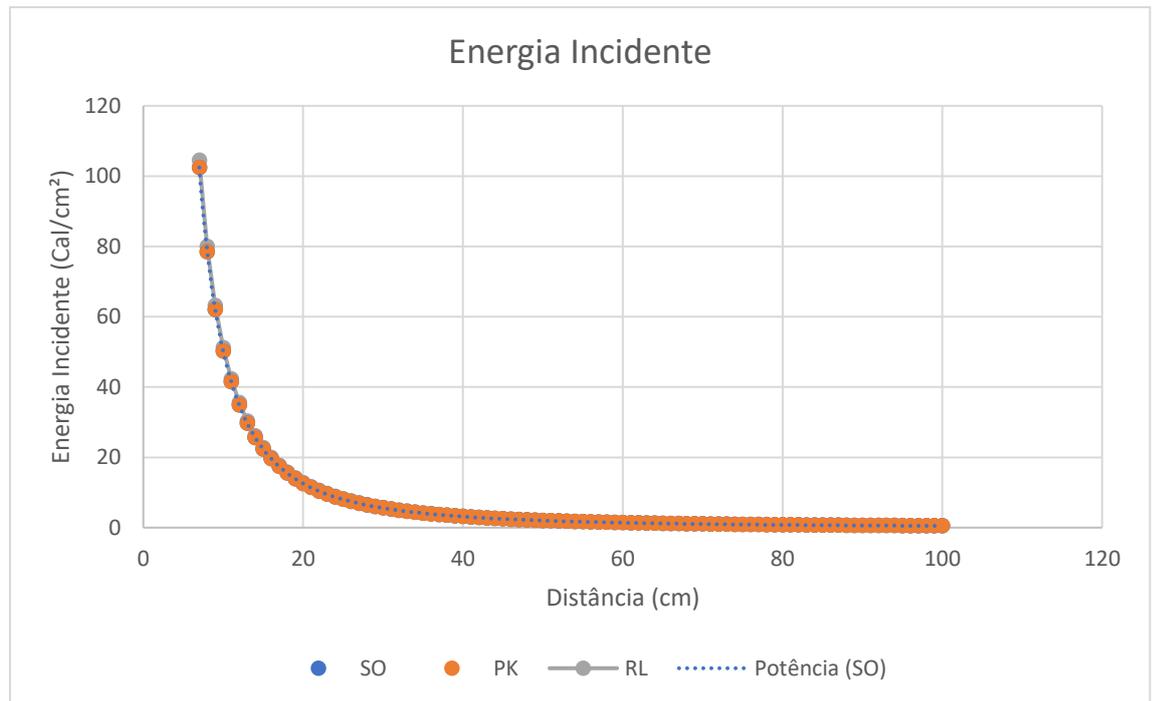
	SO	PK	RL
Energia (Ws)	263.816,00	264.146,00	269.062,00
Energia (cal/J)	63.052,02	63.130,89	64.350,81

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como esperado, os valores de energia convergiram, já que os valores das correntes e potências de arco também convergiram.

Agora, a variação da energia incidente de acordo com a distância, em centímetros, entre o epicentro do arco até o ponto onde deseja saber a energia.

Gráfico 14 – Energia incidente x Distância dos três modelos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a faixa de valores escolhida, a diferença entre as curvas é imperceptível, mostrando que no caso comparado, a energia incidente realmente converge nos três modelos. Vale observar também que, de acordo com o aumento da distância do epicentro do arco até o ponto desejado, a energia incidente se torna quase nula, enquanto que próximo ao arco esse valor tende a crescer cada vez mais, como esperado.

5.3.2.3 Comparação em 125 Vcc, 20 mm e 60 kA de corrente de curto

Este caso será o da divergência dos três modelos, que ocorreu no item 5.2.1.2.1, onde o *gap* foi de 20 milímetros e a tensão de alimentação foi de 125 V. O valor escolhido para abordar a divergência dos três modelos foi de quando a corrente de curto-circuito era de 60 kA. Este ponto será utilizado para calcular a variação da energia incidente de acordo com a distância do ponto em que se deseja calcular, bem como no item anterior.

Segue uma tabela com os valores das energias de arco nos três casos:

Tabela 7 – Valores de potência nos três modelos.

	SO	PK	RL
Energia (Ws)	94.540,60	57.225,00	136.718,75
Energia (cal/J)	22.595,20	13.676,77	32.675,78

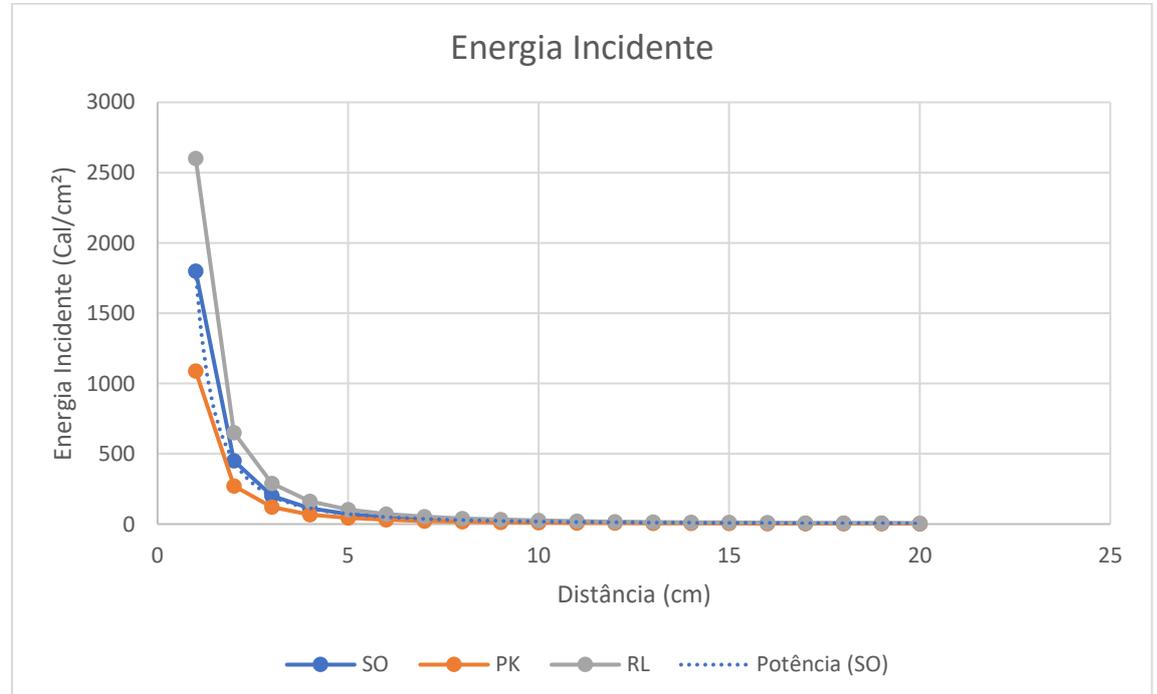
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de energia divergiram bastante, já que os valores das correntes e potências de arco também divergiram, sendo válido ressaltar o valor do modelo RL sempre maior que os demais em qualquer que sejam os parâmetros.

Entre os modelos empíricos, o modelo SO apresentou correntes de arco bem maiores, resultando em uma maior potência e, conseqüentemente, uma maior energia gerada pelo arco elétrico.

Agora, a variação da energia incidente de acordo com a distância, em centímetros, entre o epicentro do arco até o ponto onde deseja saber a energia.

Gráfico 15 – Energia incidente x Distância dos três modelos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A faixa de valores escolhida no eixo horizontal, valores de *gap*, foi menor, visto que para esses parâmetros, a energia incidente tende a zero mais rapidamente com o aumento da distância do epicentro do arco até o ponto desejado.

A diferença entre as curvas é quase nula, levando a conclusão de que no caso comparado, por mais que a energia incidente realmente seja diferente nos três modelos, o distanciamento do epicentro do arco diminui essa energia exponencialmente, diferindo apenas em magnitude.

Vale observar que, mais uma vez, os valores de corrente de arco do modelo SO foram superiores aos de Paukert, e que o modelo RL apresentou uma maior energia incidente na partida, como esperado.

5.3.3 Comparação entre os modelos pela variação do gap

Para tal comparação, alguns fatores iniciais devem ser alinhados de acordo com as equações já demonstradas anteriormente:

- a) modelo RL: Não varia sua energia incidente de acordo com o *gap*, se mantém constante.
- b) modelo PK: Limitado até o valor de 200mm. Por mais que a sustentação de um arco elétrico para *gaps* maiores que o de 200mm seja difícil, o estudo se torna limitado pela faixa de valores testados, onde cada equação é definida por um valor de *gap*.
- c) modelo SO: É o modelo que mais se assemelha com os resultados esperados, já que o valor do *gap* se encontra presente nos cálculos das correntes e tensões de arco, não se limitando a quaisquer valores de *gap*.

5.3.3.1 Metodologia Comparativa

O cálculo de cada modelo será feito de forma separada, já que a obtenção dos valores é feita de forma distinta. As tensões e correntes de arco serão comparadas e, a partir delas, as curvas da energia incidente dos três modelos será elaborada e as comparações com os resultados esperados serão feitas.

Como o modelo PK é limitado pelo *gap* de 200 mm, serão utilizados *gaps* de até 300 mm, para demonstrar o comportamento dos demais modelos partir da faixa de valores determinada.

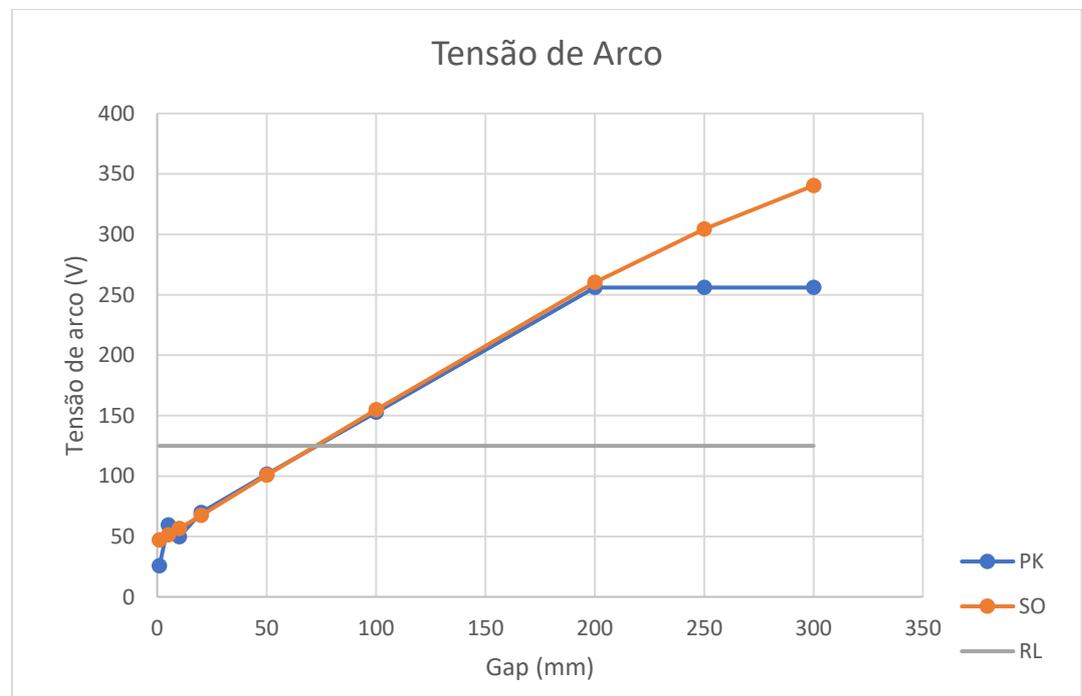
O valor do *gap* para a obtenção de uma corrente de arco base será o de 20 mm.

A tensão máxima de operação utilizada será de 250 V, para que seja observada tanto a convergência quanto a divergência entre os modelos.

5.3.3.2 Gráficos das resistências e tensões de arco

O gráfico a seguir representa a tensão de arco dos três modelos com os parâmetros apresentados anteriormente.

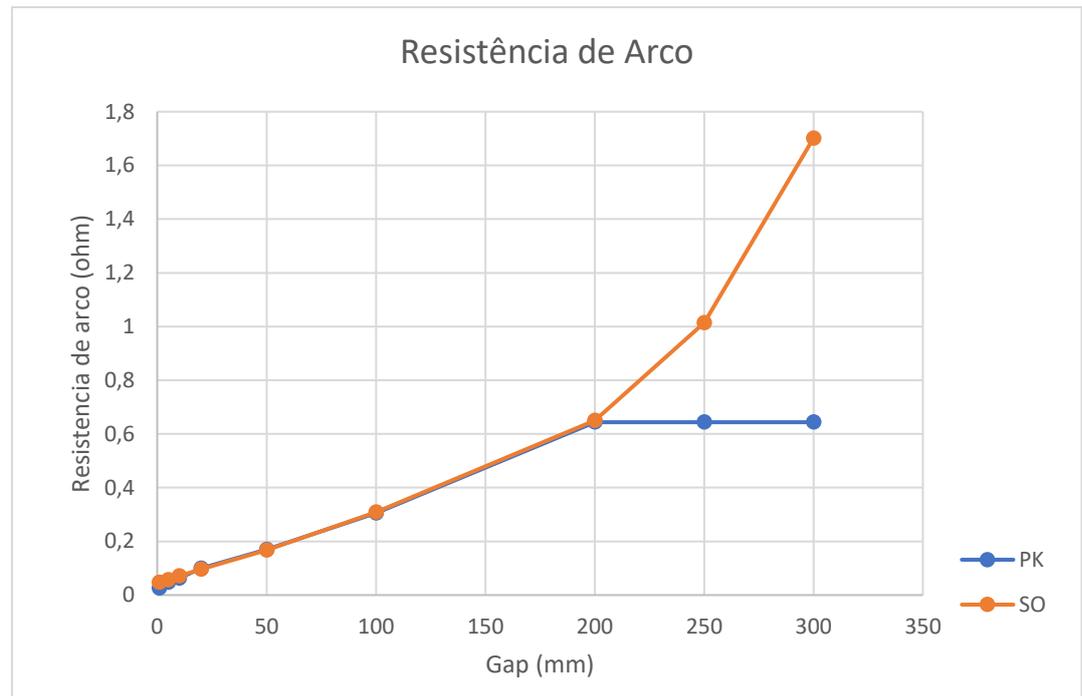
Gráfico 16 – Tensão de arco x *Gap*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Este gráfico mostra que, a partir de 200 mm, o modelo PK não possui formulação que prevê parâmetros para arco elétrico, com valores de tensão levemente menores que o modelo de SO enquanto no limite do *gap* explorado pelo experimento, que prevê um aumento na tensão de arco juntamente com o aumento do *gap*. O modelo RL mantém a tensão constante na metade da tensão de alimentação determinada anteriormente.

O gráfico a seguir representa a resistência de arco dos três modelos.

Gráfico 17 – Resistência de arco x *Gap*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

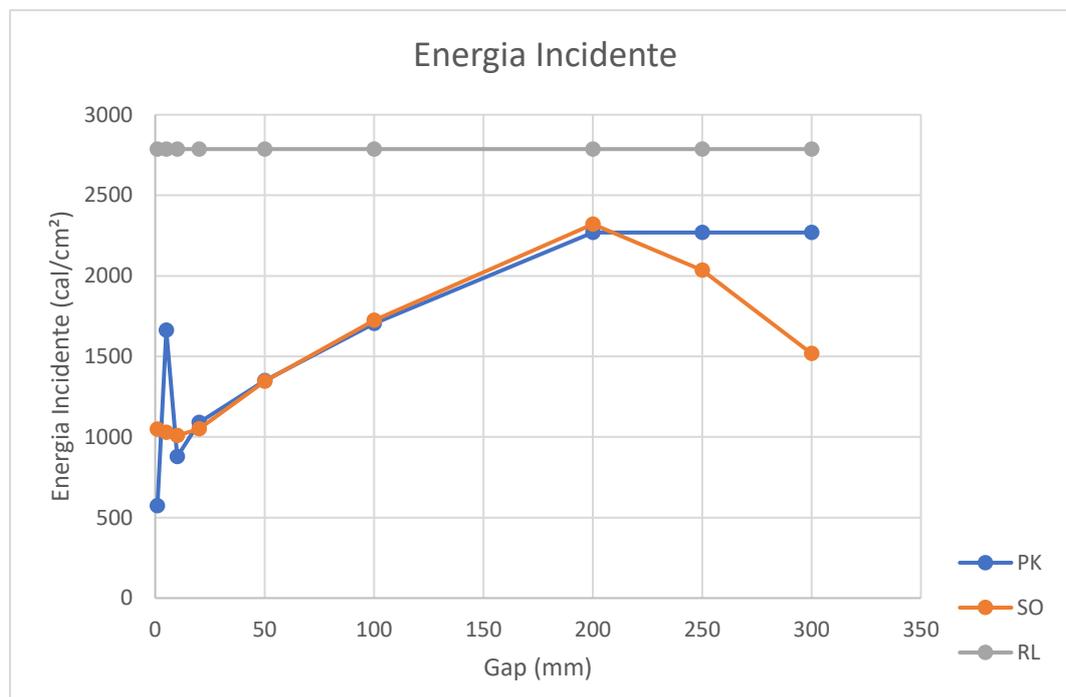
Os valores da resistência de arco sobem de forma quase linear até o ponto convergente com o modelo PK e depois acentua a curva de forma exponencial. Era de se esperar que isso acontecesse, já que o *gap* está crescendo, aumentando o espaço que a corrente tem que romper para chegar até o outro lado, rompendo todo o dielétrico.

A resistência do modelo RL não se altera com o aumento do *gap*.

Com esses dois gráficos é possível esboçar o comportamento das curvas dos três modelos com relação à energia incidente, chegando à meta de comparação desejada desde o início.

5.3.3.3 Gráfico da energia incidente

O gráfico a seguir ilustra o comportamento das curvas da energia incidente dos três modelos, utilizando as fórmulas presentes na Tabela 5 deste capítulo, como já foi feito anteriormente.

Gráfico 18 – Energia incidente x *Gap*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como é possível analisar, o valor da energia incidente no modelo RL é, de forma previsível, o maior dentre os modelos. O comportamento das curvas dos modelos empíricos tem certa irregularidade no início, tendo em vista que o *gap* de 1 mm se encontra em uma situação em que o arco elétrico possa não existir.

A curva do modelo PK se torna constante a partir dos 200 mm não por uma definição do modelo, mas pela falta de formulação para valores de *gap* acima desse, tornando este método convergente com o de RL, que não leva em conta valores de *gap*.

A curva do modelo SO tem um comportamento bem semelhante com o outro modelo empírico, mas mostra um declínio após os 200 mm, que é de certa forma esperado, tendo em vista a dificuldade da sustentação do arco em grandes distâncias. A queda da curva seria menos acentuada se os intervalos de *gap* fossem menores, mas para comparar melhor o comportamento entre os modelos, os valores escolhidos foram os que formulam o modelo PK. De qualquer modo, é perceptível o comportamento da curva pela interpolação.

5.3.4 Considerações finais

Com as comparações feitas anteriormente, se torna fácil ressaltar as diferenças esperadas e constatadas entre os modelos. Porém, não são afirmações definitivas, tendo em vista que os modelos empíricos foram limitados quanto aos testes, limitando a aplicação de Ammerman para energia incidente.

Como já mencionado anteriormente, algumas situações tornam a sustentação de um arco elétrico inviável, como quando o *gap* é grande demais, fazendo com que a corrente não consiga romper o dielétrico do ar ou quando a tensão é muito alta, gerando correntes de curto-circuito baixas e dificultando a geração de um arco, dentre outros fatores.

Nessas situações extremas o modelo proposto por Ralph Lee da máxima transferência de potência se torna impreciso, pois considera a máxima transferência de potência para o arco, elevando o valor da energia incidente nos cálculos em situações onde a falta que gere um arco elétrico pode nem existir. Isso gera valores muito acima dos reais ou até mesmo valores que não deveriam existir.

Ao mesmo tempo, o modelo da máxima transferência de potência transmite uma certa segurança quanto aos seus valores de energia incidente sempre iguais ou maiores aos modelos empíricos, deixando sempre um alerta ao entrar em contato com circuitos que ofereçam risco de arco elétrico.

Apesar dos métodos de Stokes & Oppenlander e Paukert serem baseados em testes, as condições desses testes nem sempre condizem com as de uma situação real, onde uma falta pode não gerar um arco elétrico, então, em algumas situações, extremas também, as considerações dos três pesquisadores podem ser imprecisas, porém bem mais próximas de valores plausíveis caso a falta ocorra.

É possível constatar que a principal diferença entre os modelos empíricos é que a corrente de arco no Modelo SO é sempre maior que as correntes de arco do modelo PK, mas que isso nem sempre resulta em uma maior energia incidente, devido aos parâmetros utilizados nas equações, como a resistência de arco, que muda de acordo com as situações. Essa divergência nos valores se dá pelos parâmetros adotados nos testes que formularam as equações.

Mesmo com essas considerações, os valores de energia incidente dos dois métodos convergem até um certo valor de *gap*, onde o modelo de Paukert atinge mais rapidamente a energia nula, enquanto o Modelo SO ainda possui certa energia.

6 ESTUDO DE CASO DE UMA PLANTA FOTOVOLTAICA

Este capítulo focará na aplicabilidade dos modelos de cálculo de energia incidente diretamente nas entradas dos inversores presentes na planta fotovoltaica a ser apresentada, trazendo abordagens de proteção mais eficientes contra faltas que possam gerar arco elétrico e citando EPIs eficientes que ofereçam o maior grau de segurança possível para operadores expostos aos riscos.

6.1 Descrição da instalação fotovoltaica

A planta dos Geradores Solares Heliotrópicos, placas solares que seguem a posição do sol para maior aproveitamento na geração, desenvolvido pela empresa Autoterm Energias, foi instalada em um terreno que tem como proprietário o Instituto Leão Sampaio de Ensino Universitário, Campus Lagoa Seca, localizada no município de Juazeiro do Norte, Cariri, região sul do Estado do Ceará (DA SILVA, 2019, p. 18).

Figura 13 – Imagem de satélite do Instituto e do local dos módulos.



Fonte: da Silva (2019, p. 19).

A planta é composta por 63 geradores heliotrópicos, distribuídos em nove fileiras compostas por sete geradores. Estas fileiras estão dispostas ao longo de todo o terreno,

instaladas entre divisões de áreas de estacionamento e entre as quadras e piscinas (DA SILVA, 2019, p. 18).

Cada fileira de geradores possui um inversor, com potência instalada de 60,06 kWp. Juntando a potência de todas as fileiras, totalizará uma potência instalada de 540,54 kWp (DA SILVA, 2019, p. 18). Para este estudo de caso, será analisada uma fileira separadamente, focando a entrada do inversor, onde pode ocorrer uma falta que gere arco elétrico de CC.

A instalação completa também possui módulos fixados em estrutura estática instaladas na parte superior dos prédios residentes do terreno, totalizando uma potência instalada de 208,08 kWp. Juntamente com os heliotrópicos, a planta de geração fotovoltaica total do Instituto de Ensino tem potência instalada de 748,62 kWp (DA SILVA, 2019, p. 18).

O foco principal será no estudo dos inversores presentes nas fileiras dos geradores solares heliotrópicos, já que possuem maior potência e oferece um risco maior caso ocorra uma falta que gere um arco elétrico.

Não existe nenhuma proteção específica para arco elétrico na planta fotovoltaica, contando apenas com disjuntores e com as próprias funções de proteção dos inversores de cada fileira.

6.2 Descrição da planta com geradores heliotrópicos

Na planta dos heliotrópicos existe uma estrutura eletromecânica de grande porte responsável por suspender vinte e seis módulos fotovoltaicos a mais de 7 metros de altura, possibilitando a realização de seus movimentos de seguidor solar enquanto economiza espaço para que o local onde estão instalados seja aproveitado de diversas formas. O estacionamento e centro esportivo do campus Lagoa Seca do Instituto Leão Sampaio de Ensino Universitário são exemplos do aproveitamento do espaço (DA SILVA, 2019, p. 24).

Figura 14 – Gerador heliotrópico.



Fonte: da Silva (2019, p. 55).

A seguir, uma fotografia da fileira dos heliotrópicos já instalados no Instituto:

Figura 15 – Fileira de heliotrópicos.



Fonte: da Silva (2019, p. 58).

Os módulos fotovoltaicos e inversores utilizados nestas instalações não possuem nenhuma adaptação ou característica especial para esta aplicação, são equipamentos comerciais convencionais, conjuminados com a engenharia da desenvolvedora da planta (DA SILVA, 2019, p. 24).

6.2.1 Descrição do módulo fotovoltaico

Os módulos utilizados são fabricados pela CANADIAN SOLAR, INC. São constituídos de células de silício policristalino. Seu modelo é o CS6U-330P. (DA SILVA, 2019, p. 24). As certificações internacionais de qualidade destes módulos são:

- a) ISO 9001:2008 / *Quality management system*;
- b) ISO 14001:2004 / *Standards for environmental management system*;
- c) OHSAS 18001:2007 / *International standards for occupational health & safety*.

A seguir uma tabela com todos os dados de placa do módulo:

Tabela 8 - Dados do módulo FV utilizado no gerador solar heliotrópico.

Dados elétricos	
Potência nominal máxima (P _{max})	330 W
Tensão nominal (V _{mp})	37,2 V
Corrente nominal (I _{mp})	8,88 A
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	45,6 V
Corrente de curto-circuito (I _{sc})	9,45 A
Eficiência	16,97 %
Temperatura de operação	-40° C ~ 85° C
Tensão máxima	1500 V (IEC)
Dados mecânicos	
Tipo de célula	Policristalina
Dimensões	1960 x 992 x 40 mm
Peso	22,4 kg
Características de Temperatura	
Coefficiente de temperatura (P _{max})	-0,41 %/ °C
Coefficiente de temperatura (V _{oc})	-0,31 %/ °C
Coefficiente de temperatura (I _{sc})	0,053 %/ °C
Temperatura nominal de operação das células	45±2 °C

Fonte: Canadian Solar, Inc. Adaptada do *datasheet* (CS6U-330P).

6.2.2 Descrição do inversor solar

O inversor solar utilizado na planta é o modelo SG60KTL, da fabricante SUNGROW POWER SUPPLY, CO., que possui como especificação de potência nominal 60 kWp (SUNGROW, p. 17), encaixando na utilização de sete geradores heliotrópicos, que possuem potência nominal total de 56,43 kWp.

O inversor possui conformidade com as normas IEC 62109, IEC 61727, IEC 62116, VDE0126-1-1, G59/3, VDE-AR-N-4105, VDE-AR-N-4120, BDEW (SUNGROW, p. 17).

O SG60KTL monitora a tensão e a frequência da rede elétrica e é acionado quando esses valores estão dentro da faixa normal de operação. Este é um inversor do tipo *grid-tie*, seu funcionamento operacional não permite que ele entre em funcionamento de forma *off-grid* (fora da rede elétrica). Logo, se a alimentação de energia for interrompida, o inversor para de funcionar (DA SILVA, 2019, p. 26).

Na entrada do inversor, lado de corrente contínua, são conectados os circuitos de corrente contínua que são compostos por um conjunto de módulos fotovoltaicos conectados entre si em série, ou em paralelo, ou de forma mista (DA SILVA, 2019, p. 26), os quais serão apresentados neste estudo de caso.

A figura a seguir ilustra o inversor.

Figura 16 - Inversor solar SG60KTL.



Fonte: Sungrow Power Supply Co., *datasheet* do modelo SG60KTL.

Abaixo uma tabela com todos os dados de placa do inversor:

Tabela 9 - Dados do inversor solar SG60KTL.

Dados elétricos (entrada)	
Potência nominal	60 kW
Tensão CC máxima	1000 V
Tensão CC mínima	570 V
Tensão nominal	710 V
Número de entradas CC	14
Corrente CC máxima	120 A
Corrente CC máxima de um circuito	12 A
Corrente de curto-circuito máxima	140 A
Dados Elétricos (saída)	
Potência CA	66000 VA @ 45 °C / 60000 VA @ 50 °C
Corrente CA máxima	96 A
Tensão CA nominal	3 / N / PE ou 3 / PE, 230/400 V
Faixa de tensão CA	310 – 480 V
Frequência nominal	50/60 Hz
Fator de potência na potência nominal	> 0,99
Proteções	
Curto-circuito CA	Sim
Fuga de corrente	Sim
Monitoramento de rede	Sim
Chave de seccionamento CC	Sim
Chave de seccionamento CA	Não
Fusível CC	Sim
Monitoramento de correntes CC	Sim
Proteção de Sobretensão	Tipo II (CC) e Tipo III (CA)
Outros dados	
Eficiência máxima	98,9%
Dimensões	634 x 959 x 267 mm
Peso	60 kg
Grau de proteção	IP65

Fonte: Sungrow Power Supply, Co. Adaptada do *datasheet* (SG60KTL).

6.3 Metodologia do estudo de caso

Com os dados de placa dos módulos fotovoltaicos e do inversor utilizado na planta, é possível aplicar os modelos de cálculo da energia incidente apresentados nos capítulos passados.

Para que esse procedimento seja realizado é necessário que sejam estabelecidos parâmetros, como a variação do *gap* onde ocorrerá o arco e o valor de tensão de alimentação, bem como o tempo de atuação do disjuntor ou fusível utilizado no projeto.

No Capítulo 3, tópico 3.2.1, foi apresentado um relé que possuía recursos de proteção contra arco elétrico, porém focado em sistemas de corrente alternada. Infelizmente, no mercado, as opções de proteção contra arco elétrico gerado em corrente contínua são escassas, o que limita o estudo de caso a utilizar valores de tempo de extinção da falta estimados.

O foco do estudo de caso será comparar as energias incidentes provenientes dos cálculos dos três modelos, na entrada do inversor SG60KTL, a partir da sua corrente de curto-circuito, gerando valores para tensão e corrente de arco – a partir das equações presentes na Tabela 5 – que são necessárias para o cálculo da energia incidente.

Com os resultados adquiridos serão elaborados comentários a partir dos valores esperados e simulados.

6.4 Parâmetros

Serão utilizados os mesmos valores de *gaps* dos capítulos anteriores, que são 5 mm, 20 mm e 50 mm. A tensão utilizada será a apresentada nos dados de placa do inversor, que é de 710 V. A corrente de curto-circuito será simulada através do *software* ETAP, com os devidos valores de comprimento de cabos e todos os outros parâmetros necessários. O tempo de arco a ser utilizado será de 2 segundos, tendo como base a média do tempo de exposição de operadores, visto que não existem relés específicos para essa função na planta.

A distância do operador até o arco será considerada de 200 mm.

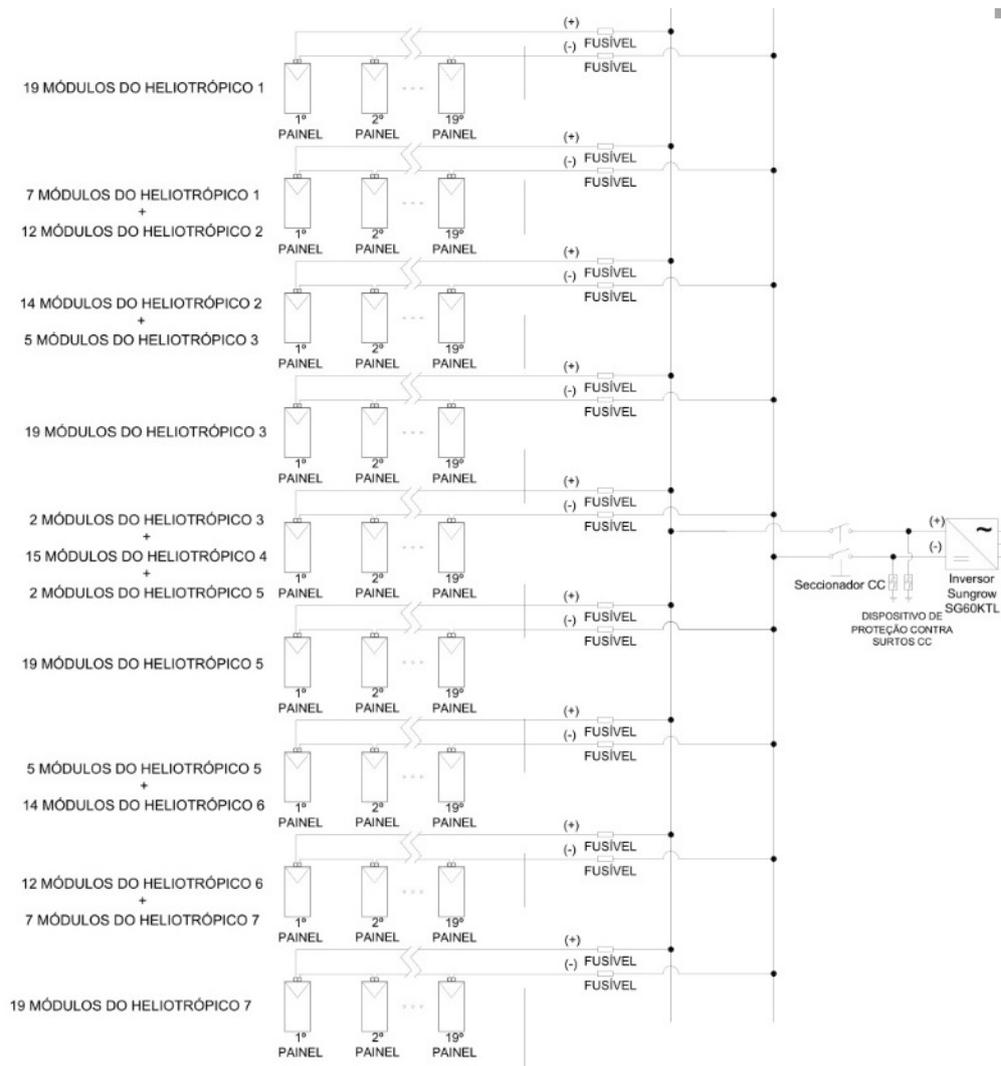
6.4.1 Simulação

O *software* utilizado foi o ETAP 16.0.0, que possui as ferramentas necessárias para configurar painéis solares e inversores com riqueza de detalhes, facilitando uma coleta de dados precisa.

6.4.1.1 Modelagem

A modelagem de uma fileira da planta fotovoltaica consiste em um inversor e nove heliográficos, distribuídos de forma diferente, alterando a distância dos cabos de ligação até o inversor. Só será simulada uma fileira, tendo em vista que as outras são idênticas. Segue o diagrama unifilar utilizado para modelar a simulação.

Figura 17 – Diagrama unifilar da fileira de heliográficos.



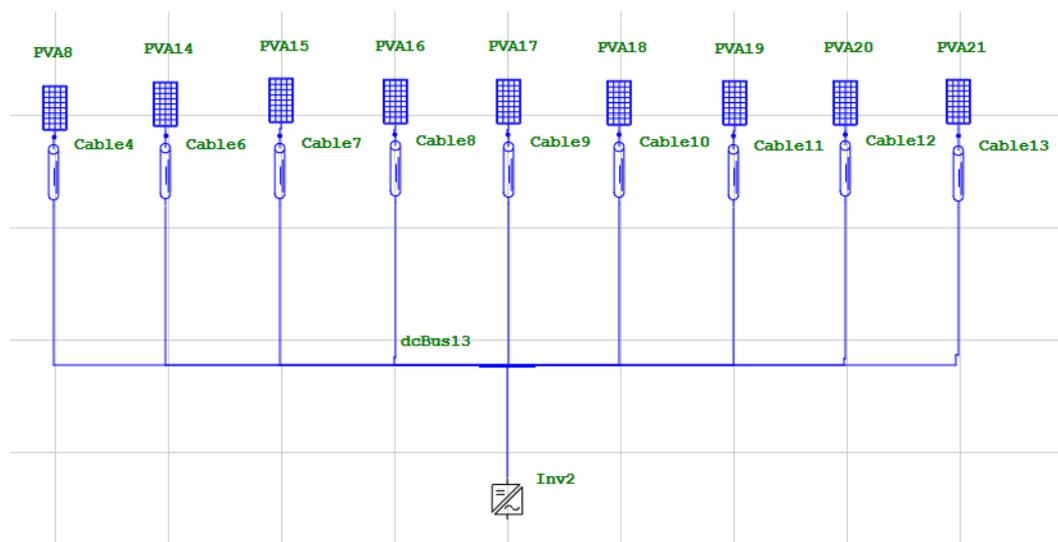
Fonte: Eng. ° Roberto Maciel Campos (2019, prancha 03/07, detalhe).

Para melhor representar a planta, as distâncias de cada cabo foram postas até o barramento que ligará na entrada CC do inversor. Os cabos utilizados são de 6 mm², sendo representados pelo modelo *Polyvinyl Chloride BS6004*, presente no *software*, que são muito semelhantes com os cabos utilizados na planta.

O arco elétrico será simulado no seccionador CC que se encontra presente dentro do inversor, que concatena todos os módulos fotovoltaicos. Este seccionador foi representado pelo barramento onde os heliotrópicos se encontram, tendo a contribuição do curto de cada um deles, sendo o pior caso possível.

Segue a figura que representa a modelagem da fileira até o inversor.

Figura 18 – Fileira com nove painéis e um inversor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As configurações dos módulos fotovoltaicos, cabos, barramento e inversor foram de acordo com os dados de placa de cada equipamento. No caso dos cabos, foi encontrado um modelo semelhante com o utilizado, com apenas algumas divergências (GENERAL CABLE BRASIL, 2017).

O *software* também possui a funcionalidade de configurar vários painéis em um único módulo, mas não haveria uma ilustração que representasse bem a instalação da planta FV como o da figura anterior.

6.4.1.2 Simulação de arco elétrico no barramento/entrada do inversor

Com o intuito de comparar os valores simulados com o comportamento visto anteriormente através das comparações dos modelos de cálculo da energia incidente, serão simulados os três modelos, e seus respectivos valores serão comparados a fim de definir suas principais diferenças.

6.4.1.2.1 Simulação de arco elétrico Modelo RL

A primeira simulação será do Modelo RL, para constatar a teoria demonstrada no Capítulo 4. A figura a seguir mostra a simulação do arco elétrico no barramento.

Figura 19 – Dados de arco elétrico Modelo RL.

DC Arc Current	
Method	Maximum Power
I _{bf}	0,088 kA
I _{arc}	0,044 kA
V _{arc}	355 V dc

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na simulação, a totalidade da corrente de falta foi de 88 A de corrente de curto no barramento CC que antecede o inversor. Como demonstrado anteriormente, a corrente de arco no modelo RL, que é o modelo de máxima transferência de potência, será sempre metade da corrente de curto, bem como a tensão de arco será a metade da tensão de alimentação.

Não se fez necessária a simulação com valores definidos de *gap* pois o modelo não utiliza essa variável como parâmetro em seus cálculos.

É esperado que os valores da energia incidente sejam superiores aos que ainda virão dos outros modelos, tendo em vista as comparações feitas nos Capítulos 5 e 6 e que este modelo não se vale do *gap* como variável.

A partir dos valores obtidos na simulação, a energia incidente é facilmente calculada utilizando os parâmetros pré-definidos no tópico 7.4.

6.4.1.2.2 Simulação de arco elétrico Modelo PK.

Agora será simulado o arco elétrico com a modelagem feita por Paukert, limitada pelos valores fixos de *gap* que definem as equações.

A figura a seguir mostra os dados obtidos pela simulação.

Figura 20 – Dados de arco elétrico Modelo PK

DC Arc Current	
Method	Paukert
lbf	0,088 kA
larc	kA
Varc	V dc

larc < 100 A

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como mostrado no Capítulo 4, o modelo de Paukert possui duas situações que aplicam correntes de arco elétrico maiores e menores que 100 A. Os estudos comparativos dos Capítulos 5 e 6 são focados em correntes maiores que 100 A. O *software* não apresenta a funcionalidade, dentro do Modelo PK, que considera correntes de arco menores que 100 A e que forneça os valores desejados para análise.

6.4.1.2.3 Simulação de arco elétrico Modelo SO

Agora o modelo de Stokes & Oppenlander, o que mais se aproxima de valores em um modelo ideal, tendo em vista sua origem empírica e sua formulação que conta com o *gap* como variável.

A figura a seguir mostra os dados obtidos pela simulação com o *gap* fixo em 5 milímetros.

Figura 21 – Dados de arco elétrico Modelo SO 5 mm.

DC Arc Current	
Method	Stokes & Oppenlander
lbf	0,088 kA
larc	0,083 kA
Varc	38,53 V dc

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura abaixo, tem-se os valores de tensão e corrente de arco com *gap* de 20 mm.

Figura 22 – Dados de arco elétrico Modelo SO 20 mm.

DC Arc Current	
Method	Stokes & Oppenlander
I _{bf}	0,088 kA
I _{arc}	0,081 kA
V _{arc}	52,01 V dc

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para finalizar, na figura a seguir os valores são obtidos com o *gap* de 50 mm.

Figura 23 – Dados de arco elétrico Modelo SO 50 mm.

DC Arc Current	
Method	Stokes & Oppenlander
I _{bf}	0,088 kA
I _{arc}	0,078 kA
V _{arc}	78,78 V dc

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tem-se uma corrente de arco bem mais elevada do que no modelo RL e, em contrapartida, um valor de tensão de arco bem inferior. Esses resultados já eram esperados, tendo em vista as comparações feitas no Capítulo 5.

É também importante salientar que quanto maior o valor do *gap*, maior se torna a tensão de arco, como visto no Capítulo 6, e menor a corrente de arco, reafirmando constatações feitas anteriormente.

6.5 Resultados

Com os valores obtidos no tópico passado, a energia incidente é calculada de forma direta, utilizando correntes e tensões de arco apresentadas nas simulações.

6.5.1 Energia incidente para *gap* de 5 mm

Segue a tabela com os valores de corrente e tensão de arco, corrente de curto-circuito e energia incidente nos três modelos.

Tabela 10 – Dados de arco para *gap* de 5 mm.

	RL	PK	SO
I_{cc} (A)	88	88	88
I_{arc} (A)	44	<100A	83
V_{arc} (V)	355	-	38,53
EI (cal/cm²)	1,48	-	0,30

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como esperado, a energia incidente no modelo de Ralph Lee foi bem superior aos modelos empíricos. Apesar de sua corrente de arco ser menor, a tensão adotada é bem superior aos outros modelos, além de não considerar o *gap* como uma variável em seu cálculo, justificando os altos valores de energia incidente.

6.5.2 Energia incidente para *gap* de 20 mm

Segue a tabela com os valores de corrente e tensão de arco, corrente de curto-circuito e energia incidente nos três modelos.

Tabela 11 – Dados de arco para *gap* de 20 mm.

	RL	PK	SO
I_{cc} (A)	88	88	88
I_{arc} (A)	44	<100A	81
V_{arc} (V)	355	-	52,01
EI (cal/cm²)	1,48	-	0,40

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o *gap* de 20 mm é possível notar que a energia incidente dos modelos empíricos cresceu, o que também era esperado, tendo em vista o comportamento das curvas no Capítulo 5. Aqui é notório a diminuição pequena da corrente de arco enquanto a tensão de arco sobe de forma rápida, explicando o motivo do crescimento da energia incidente.

6.5.3 Energia incidente para *gap* de 50 mm

Segue a tabela com os valores de corrente e tensão de arco, corrente de curto-circuito e energia incidente nos três modelos.

Tabela 12 – Dados de arco para *gap* de 50 mm.

	RL	PK	SO
I_{cc} (A)	88	88	88
I_{arc} (A)	44	<100A	78
V_{arc} (V)	355	-	78,78
EI (cal/cm²)	1,48	-	0,58

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como na tabela anterior, o modelo empírico continua crescendo em ritmo mais lento. O esperado é que o seu valor de energia incidente não alcance os valores do método de Ralph Lee, e a partir de certo ponto, comece a reduzir até zero.

6.6 Equipamentos de Proteção Individual recomendados

Com os valores de energia incidente simulados e com a apresentação de EPIs designados para valores específicos dessa energia no Capítulo 3, serão definidos os equipamentos ideais para a utilização de operários que podem manusear o quadro elétrico com o inversor citado.

No tópico 3.2.2 do Capítulo 3 estão presentes as categorias de proteção existentes com base na energia incidente. A energia máxima encontrada nas simulações mostradas na tabela acima foi de 1,48 cal/cm², que seria a energia calculada para regiões abertas. Este valor multiplicado por 3, como mostrado no Capítulo 4, representará o modelo de Ralph Lee para invólucros, resultando em 4,44 cal/cm², que se enquadra na Categoria 1 dos EPIs.

O Modelo RL é considerado mais conservador que os outros dois por apresentar valores mais altos de energia incidente. Mesmo com esses valores mais altos, a categoria na qual essa situação se enquadra é a primeira, de risco moderado, a segunda mais amena dentre todas, mas que ainda oferece riscos à vida do operador.

Os valores obtidos dos outros modelos não chegaram ao valor de 1,2 cal/cm², se for considerado ambiente aberto. Mesmo com o aumento da energia incidente devido ao invólucro, os valores podem nem atingir o risco leve, que se enquadra Categoria 0. Porém, por precaução, os EPIs recomendados são de Categoria 0, seguindo os métodos empíricos, já que através das

comparações do capítulo 5 foi possível constatar que os valores do Modelo RL são maiores que os demais.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho visou a comparação de três modelos de cálculo de energia incidente em vários valores e em um estudo de caso de parte de uma planta fotovoltaica instalada em Juazeiro do Norte, no Instituto Leão Sampaio de Ensino Universitário, constituída por geradores heliotrópicos, que mudam a angulação dos módulos fotovoltaicos a fim de conseguir maior rendimento.

O Capítulo 4 foi focado na apresentação dos modelos utilizados, enquanto o Capítulo 5 foi voltado à comparação entre os modelos e como eles se comportavam em diferentes situações. Foi possível a constatação de que o modelo de Ralph Lee, da máxima transferência de potência, foi o modelo com maiores valores de energia incidente, seguido pelos modelos de Stokes & Oppenlander e Paukert. Assim, é possível afirmar que o Modelo RL é conservador, já que os modelos empíricos foram elaborados através de testes reais, apresentam valores menores de energia e utilizam o *gap* como variável. Também foi interessante constatar que as correntes de arco do Modelo SO foram sempre superiores aos do Modelo PK, mas que isso nem sempre significou maiores valores de energia incidente, deixando claro que a metodologia do estudo empírico que foi feito é diferente para os dois modelos. O Modelo SO apresentou maior organização de parâmetros no seu equacionamento e não foi limitado pelos valores de *gap* ou corrente de arco, tornando-o o melhor modelo para cálculo da energia incidente.

É importante ressaltar que Ammerman apenas organizou as correntes e tensões dos modelos para desenvolver a fórmula da energia incidente enquanto Doan aplicou o modelo de Lee para energia incidente.

Com os modelos apresentados e comparados, o Capítulo 7 apresentou o estudo de caso dos geradores heliotrópicos, visando a entrada do inversor que recebe corrente contínua, alimentado pelos módulos fotovoltaicos. A energia incidente proveniente de um possível arco elétrico, com a junção da alimentação de todos os módulos, no pior caso possível (Modelo RL), enquadrou-se na Categoria 1 de risco, considerado risco moderado. Como fora concluído que os valores do modelo da máxima potência são muito conservadores principalmente em tensões mais elevadas, o modelo a ser considerado fora o empírico, enquadrando os EPI's na categoria 0, de risco leve.

Como o conteúdo apresentado é rico em detalhes e nem todos foram amplamente explorados neste trabalho, as possibilidades de trabalhos derivados são diversas. A seguir,

algumas sugestões de temas baseados nos desfalques do trabalho, que teve como foco a aplicação e comparação dos três modelos em um estudo de caso:

- a) elaborar uma estratégia de proteção contra arco elétrico em sistemas de corrente contínua, já que é escassa no mercado e a demanda tende a aumentar junto com a geração distribuída;
- b) análises que comparem os modelos apresentados de cálculo de energia incidente com testes reais, para verificar a confiabilidade dos três métodos;
- c) estudos que visem expandir o método de Paukert, que apresentou limitação devido às formulas específicas para certos valores de *gap*, os quais param em 200 mm, limitando a comparação entre os modelos;
- d) estudos que visem adaptar o método de Ralph Lee, o qual apresentou limitação no cálculo da energia incidente, já que não leva em consideração o *gap* entre a conexão do arco elétrico;
- e) aplicação dos modelos empíricos em linhas de transmissão de corrente contínua, visando a obtenção da energia incidente que pode ser liberada na geração de um arco elétrico e as consequências ao ambiente próximo e à própria rede;
- f) aplicação dos modelos de Paukert e Stokes & Oppenlander em sistemas de corrente alternada e comparar com os cálculos de energia incidente utilizados nesse sistema.
- g) estudo de caso para banco de baterias e suas implicações no possível aumento da energia incidente proveniente do arco elétrico.
- h) estudo do subsidio da metodologia construtiva de quadros elétricos visando mitigar a energia incidente proveniente do arco elétrico.

REFERÊNCIAS

ALBANY, Kátia. **Você sabe qual é a diferença do arco elétrico em corrente alternada (CA) e em corrente contínua (CC)? E qual o risco disso para instalação voltaica?**

Curitiba, PR, 26 set. 2019. LinkedIn: @engkatiaalbany. Disponível em:

https://www.linkedin.com/posts/engkatiaalbany_elaztrica-eletricidade-arcoelaztrico-activity-6571785760532422656-46Z0 Acesso em: 10 set. 2020.

AMMERMAN, Ravel F. *et al.* DC-Arc models and incident-energy calculations. **IEEE Transactions on Industry Applications**. New Jersey, vol. 46, n. 5, p. 1810 a 1819, set./out. 2010.

APPROBATO, Beatriz. **Qual é a função do arco elétrico nos processos de soldagem?**

Ribeirão Preto, SP: Apaixonados por Ferramentas, 2019. Disponível em:

<https://apaixonadosporferramentas.com.br/funcao-do-arco-eletrico-na-soldagem/> Acesso em: 08 set. 2020.

ARCO ELÉTRICO OU ARCO VOLTAICO. [S. l.: s. n.], 2016. 1 vídeo (2:48 min).

Publicado pelo canal Gean Vierra. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=U7uzFfwTcog> Acesso em: 25 ago. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSCIENTIZAÇÃO PARA OS PERIGOS DA ELETRICIDADE. **A interrupção do arco elétrico**. São Paulo: ABRACOPEL, 2020.

Disponível em: <https://abracopel.org/blog/a-interruptao-do-arco-eletrico/> Acesso em: 10 set. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 62271-200:2007/Versão Corrigida:2007**: Conjunto de manobra e controle de alta tensão [...]. São Paulo: ABNT, 2007.

CAMPOS, Roberto Maciel. **Conjunto de 63 geradores heliotrópicos: 540,54 KWp**.

Fortaleza, CE: Autoterm Energias, 2019, pranchas 01-03 e 07. (ANEXOS A a D)

CANADIAN SOLAR INC. **Datasheet MAXPOWER CS6U-315 | 320 | 325 | 330P**. San Ramon, EUA, jul. 2016. Disponível em: <https://download.aldo.com.br/pdfprodutos/Produto34226IdArquivo4451.pdf> Acesso em: 30 set. 2020.

DA SILVA, Jonas Pinheiro. **Comparação de desempenho de plantas FV com módulos fixos e com seguimento solar [...]**. 2019. 74 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

DEPARTAMENTO DE SEGURANÇA E SAÚDE NO TRABALHO (DSST). **Manual de orientação para especificação das vestimentas de proteção [...]**. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, [2016?]. Disponível em: http://www.segurancaotrabalho.eng.br/manuais_tecnicos/manual_vestimentas.pdf Acesso em: 15 set. 2020.

DOAN, Daniel R. Arc flash calculations for exposures to DC systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**. New Jersey, vol. 46, n. 6, p. 2299 a 2302, nov./dez. 2010.

ENERGY SAFE VICTORIA (ESV). **Arc flash hazard management**. Victoria, Austrália: WorkSafe Victoria, [2019?]. Disponível em: <https://esv.vic.gov.au/wp-content/uploads/2019/10/Guideline-Arc-flash-hazard-management.pdf> Acesso em: 27 out. 2020.

ESCOLA ELECTRA. **A Norma Regulamentadora nº 10**. Rio de Janeiro: Escola Electra, [2010?]. Disponível em: http://www.escolaelectra.com.br/apostilas/novas/cq%20nr-10_parte1_29_11_2010.pdf Acesso em: 05 set. 2020.

GENERAL CABLE BRASIL. **Datasheet EXZHELLENT SOLAR 1.8 Kv CC**. São Paulo-SP, ago. 2017. Disponível em: <https://www.generalcable.com/assets/documents/LATAM%20Documents/Brazil%20Site/Cabos-para-instalacoes-de-energia-solar-fotovoltaica.pdf?ext=.pdf> Acesso em: 29 set. 2020.

GRUPO LEGRAND BRASIL. **Grau de Proteção IP: Como saber se um produto é seguro?** São Paulo, SP: Legrand, 2017. Disponível em: <http://www.legrand.com.br/blog/noticias/referencias/grau-de-protecao-ip> Acesso em: 8 set. 2020.

HOAGLAND, Hugh. **ATPV vs. EBT: Arc ratings explained.** Toronto, CA: ArcWear, 2016. Disponível em: <https://www.arcwear.com/blog/atpv-vs-ebt-arc-ratings-explained-2/> Acesso em: 12 set. 2020.

HOW DO ARC-FLASH RELAYS WORK? [S. l.: s. n.], 2018. 1 vídeo (1:51 min). Publicado pelo canal Littelfuse, Inc. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=D31SRv7KFpk> Acesso em: 27 out. 2020.

LEE, Ralph H. The other electrical hazard: Electric arc blast burns. **IEEE Transactions on Industry Applications.** New Jersey, vol. IA-18, n. 3, p. 246 a 251, mai./jun. 1982.

MARDEGAN, Cláudio. Capítulo XVII: A seletividade. **O Setor Elétrico**, São Paulo-SP, ed. 64, mai. 2011. Disponível em: http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2011/06/Ed64_fasc_seletividade_cap17.pdf Acesso em: 12 set. 2020.

MARDEGAN, Cláudio S.; PARISE, Giuseppe. Capítulo II: O arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo-SP, ed. 144, fev. 2018. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed-145-Fasc%C3%ADculo-Capitulo-II-Prote%C3%A7%C3%A3o-contra-arco-el%C3%A9trico.pdf> Acesso em: 12 set. 2020.

MUNDO DA ELÉTRICA. **Arco elétrico, o que é? Como é formado?** [S. l.]: Mundo da Elétrica, [2017?]. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/arco-eletrico-o-que-e-como-e-formado/> Acesso em: 10 set. 2020.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 70E: Standard for electrical safety in the workplace.** Massachusetts, EUA: NFPA, 2015.

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. **Portaria nº 598 de 07/12/2004.** Altera a Norma Regulamentadora nº 10, que trata de Instalações e Serviços em Eletricidade, aprovada pela

Portaria nº 3214, de 1978. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2004. Disponível em: <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/portariamte598.htm> Acesso em: 05 set. 2020.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Relés de proteção de arco VAMP**. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-range-presentation/62049-rel%C3%A9s-de-prote%C3%A7%C3%A3o-de-arco-vamp/> Acesso em: 10 set. 2020.

SUNGROW POWER SUPPLY CO., LTD. **Datasheet SG60KTL**: Inversor String para Sistema 1000 Vcc. [S. l.], 2018, p. 16 e 17. Disponível em: <https://www.sungrowpower.com/sites/default/files/01%20Datasheet%20SG60KTL%20PTBR.pdf> Acesso em: 30 set. 2020.

LEITURA COMPLEMENTAR

CAMPOS, Mateus Polito. **Estudo da energia incidente do arco elétrico em quadros/painéis elétricos**. 2016. 85 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

HELDWEIN, Marcelo Lobo. **Introdução à proteção de redes ativas de distribuição em CC [...]**. Florianópolis, SC: UFSC, [2012?]. Disponível em: <http://heldwein.prof.ufsc.br/files/2012/09/Aula-07-Sistemas-de-protecao-em-CC.pdf> Acesso em: 15 set. 2020.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, INC. **IEEE guide for performing arc-flash hazard calculations**. Nova York, EUA: IEEE Standards Association, 2018.

LACKOVIC, Velimir. **Arc flash hazard calculations in DC systems**. Stony Point, EUA: CED Engineering, [entre 2007 e 2020].

MONTE JÚNIOR, Valdery Rodrigues. **Estudo da importância dos cálculos de energia incidente e correntes de arco na proteção de trabalhadores do SEP**. 2019. 97 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

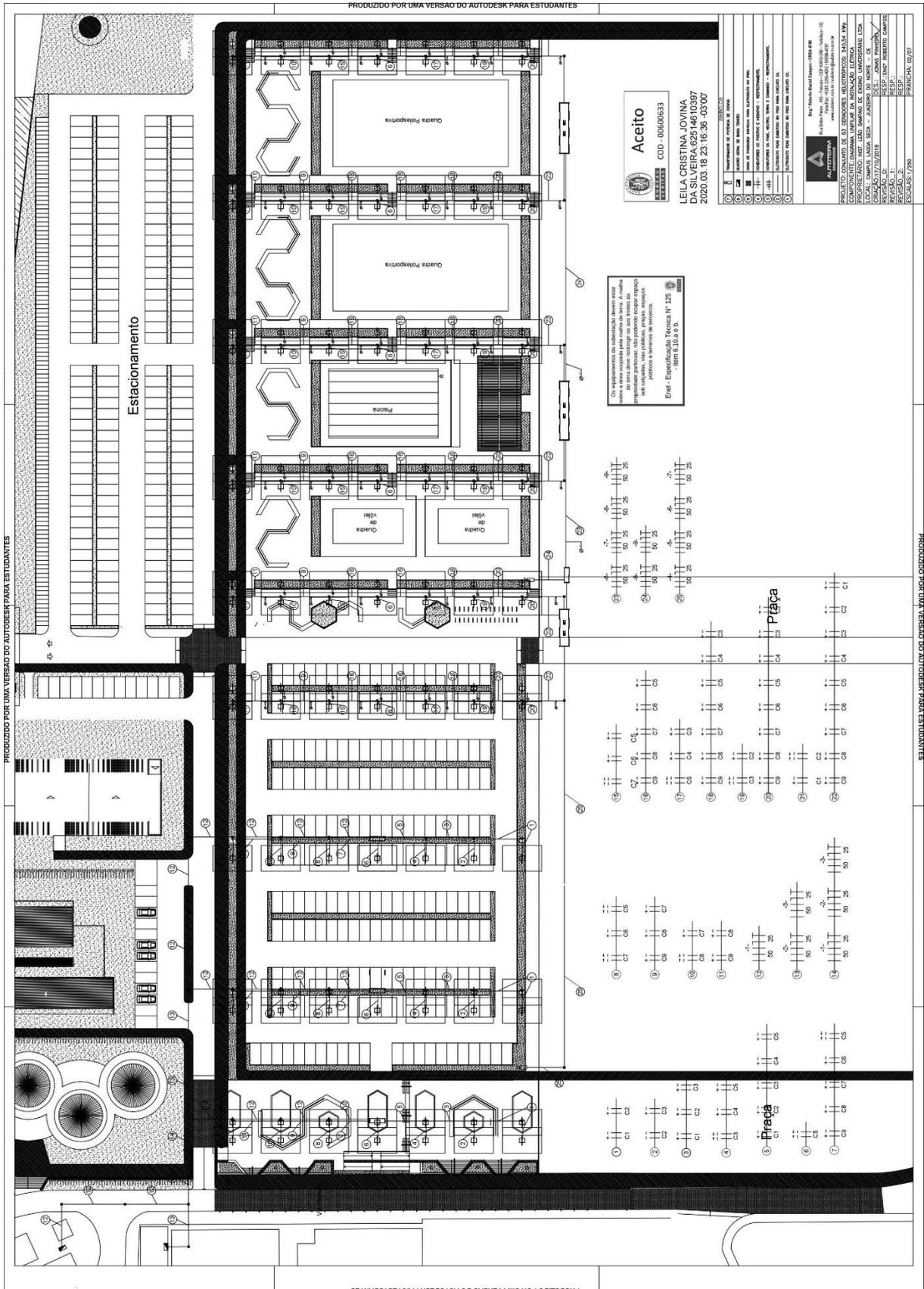
QUEIROZ, Alan Rômulo Silva. **Utilização de relés digitais para mitigação dos riscos envolvendo arcos elétricos**. 2011. Tese (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2011. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-30052012-124531/publico/UTILIZACAO_DE_RELES_DIGITAIS_PARA_MITIGACAO_DOS_RISCOS.pdf Acesso em: 14 ago. 2020.

RÔMULO, Alan; SENGER, Eduardo. Capítulo IX: Dispositivos de proteção contra arco elétrico [...]. **O Setor Elétrico**, São Paulo-SP, ed. 80, set. 2012. Disponível em:

http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2012/10/Ed80_fasc_arco_eletrico_cap9.pdf Acesso em: 30 ago. 2020.

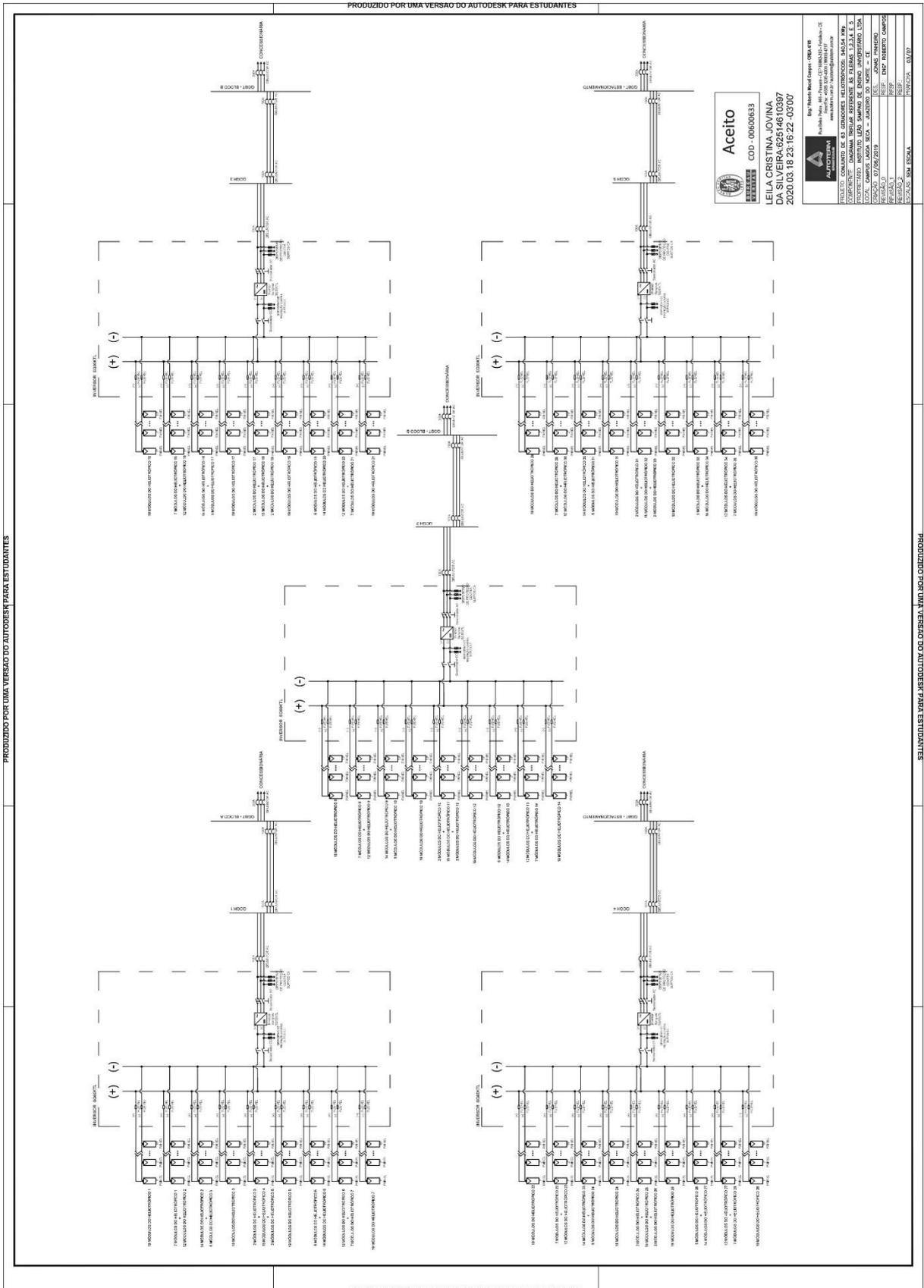
STOKES, A. D.; OPPENLANDER W. T. Electric arcs in open air. **Journal of Physics D: Applied Physics**. Reino Unido, vol. 24, n. 1, p. 26 a 35, 1991.

ANEXO B – DIAGRAMA UNIFILAR DA INSTALAÇÃO ELÉTRICA



Fonte: Eng.º Roberto Maciel Campos (2019, prancha 02/07).

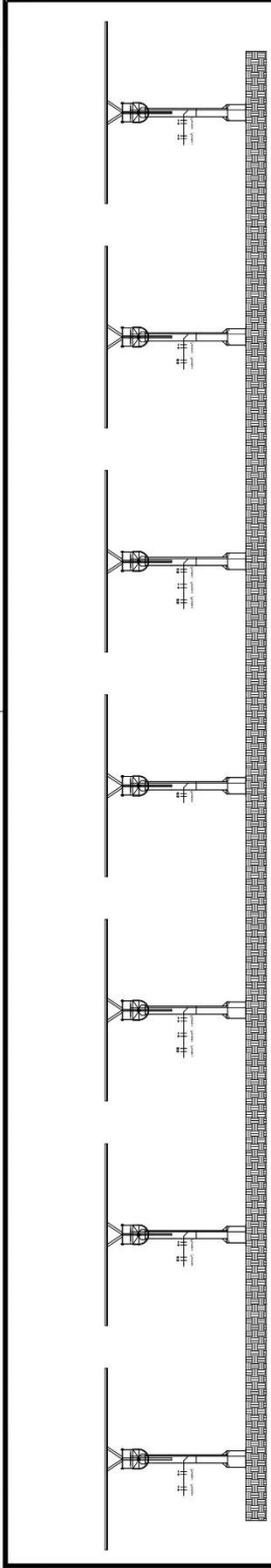
ANEXO C – DIAGRAMA TRIFILAR REFERENTE ÀS FILEIRAS 1, 2, 3, 4 E 5



Fonte: Eng.º Roberto Maciel Campos (2019, prancha 03/07).

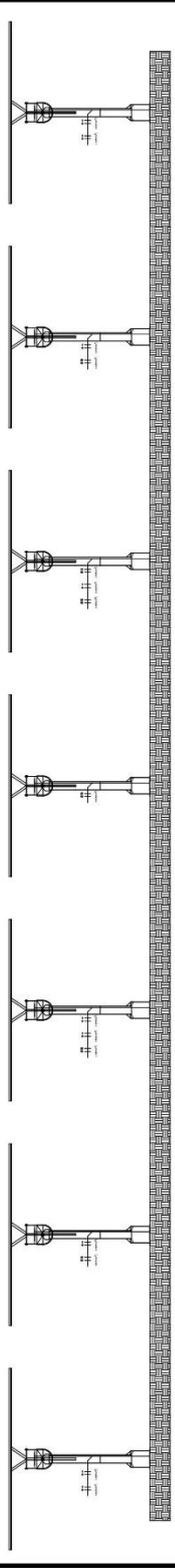
ANEXO D – DETALHES TORRES HELIOTRÓPICAS

PRODUZIDO POR UMA VERSAO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES



02 ESC. 1/100

DETALHE LATERAL DE GERADOR

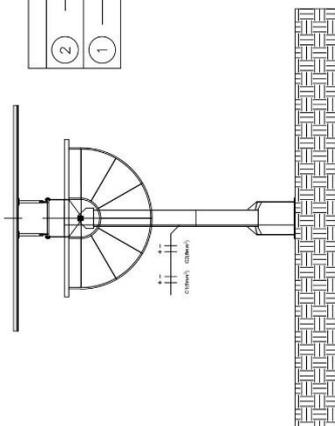


01 ESC. 1/20

DETALHE FRONTAL DE FILEIRA

PRODUZIDO POR UMA VERSAO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES

SÍMBOLOS	
②	CONDUTORES CC POSITIVO E NEGATIVO – RESPECTIVAMENTE.
①	ELETRODUTO PEAD EMBUTIDO NO PISO PARA CIRCUITO CC.



02 ESC. 1/100

DETALHE LATERAL DE GERADOR

Aceito

COD - 00600633

LEILA CRISTINA JOVINA
DA SILVA (RA: 62514610397)
2020.03.18 23:15:02 -03'00"

RESPONSÁVEL TÉCNICO

ENG. ROBERTO CAMPOS

ESCALA: INDICADA

FOLHA: 07/07

REVISOR: -

REVISÃO: 20/10/2019

TÍTULO	CONJUNTO DE 63 GERADORES HELIOTRÓPICOS 540,54 kW
ASSUNTO	DETALHES TORRES HELIOTRÓPICAS
CLIENTE	INSTITUTO LEÃO SAMPAIO DE ENSINO UNIVERSITÁRIO LTDA.

PRODUZIDO POR UMA VERSAO DO AUTODESK PARA ESTUDANTES