



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

**RAÍSSA CARNEIRO NOBRE**

**DESENVOLVIMENTO DE PLANILHA EM EXCEL PARA DIMENSIONAMENTO DE  
INSTALAÇÃO ELÉTRICA DE USINA FOTOVOLTAICA DE MINIGERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA**

**FORTALEZA**

**2024**

RAÍSSA CARNEIRO NOBRE

DESENVOLVIMENTO DE PLANILHA EM EXCEL PARA DIMENSIONAMENTO DE  
INSTALAÇÃO ELÉTRICA DE USINA FOTOVOLTAICA DE MINIGERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do  
Centro de Tecnologia da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ernande Eugenio  
Campelo Moraes.

FORTALEZA

2024

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

---

N673d Nobre, Raíssa Carneiro.

Desenvolvimento de planilha em Excel para dimensionamento de instalação elétrica de usina fotovoltaica de minigeração distribuída / Raíssa Carneiro Nobre. – 2024.  
94 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Ernande Eugenio Campelo Morais.

1. Dimensionamento elétrico. 2. Usinas fotovoltaicas. 3. Minigeração distribuída. 4. Exigências normativas. I. Título.

CDD 621.3

---

RAÍSSA CARNEIRO NOBRE

DESENVOLVIMENTO DE PLANILHA EM EXCEL PARA DIMENSIONAMENTO DE  
INSTALAÇÃO ELÉTRICA DE USINA FOTOVOLTAICA DE MINIGERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do  
Centro de Tecnologia da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: xx/xx/xxxx.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ernande Eugenio Campelo  
Morais (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

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

---

Eng. Eletricista Bruno Gomes Araújo  
PW2 Energia

Dedico este trabalho ao amor que uma mãe é capaz de sentir por uma filha, e a todos os outros amores que tornam realidade os sonhos de nossos corações.

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Kátia, uma força da natureza capaz de abrir todos os caminhos que me separavam da realização dos meus sonhos. Seu amor e sua dedicação incondicionais, ainda mais fortes na adversidade, sustentaram minhas forças e minha vontade de vencer todas as batalhas até aqui.

À minha irmã, Taíssa, pelo companheirismo e pelos sacrifícios que me deram oportunidade de dar o primeiro passo deste longo caminho. À minha irmã de coração, Ívina, que tantas vezes iluminou a escuridão e encheu de esperança os abismos que me ameaçaram.

Aos meus avós, Valdir e Rosalba, que fizeram tudo ao alcance de sua simplicidade para que eu pudesse chegar onde eles não puderam. Aos meus tios, Marcos, Imaculada e Ivaneide, pela fé no meu potencial. Àqueles colegas de faculdade com quem pude unir forças para vencer tantas dificuldades.

À música, meu escudo contra a desesperança. Em especial, a Mara e Marina Toffolo, artistas e amigas amadas, que com tanto amor me receberam no mundo mágico da arte e me presentearam com a grata surpresa do laço que nos une. Aos demais amigos da família Toffolo, tão queridos em meu coração: Marília, Ronaldo, Rodrigo, Rodolfo e Ronaldinho. À Orquestra Ouro Preto, cuja contribuição para minha saúde mental foi inestimável.

Aos meus colegas da PW2 Energia, onde pude iniciar minha vida profissional contando com o companheirismo de pessoas benevolentes e dedicadas a contribuir com o meu crescimento. Em especial, aos meus supervisores Bruno, Peter e Wendell, cuja paciência com o meu caminhar me proporcionou evolução e autoconfiança.

A todas as mulheres que dedicaram suas vidas à defesa de nossos direitos, sem as quais eu não poderia sonhar e menos ainda realizar.

"E, no final da corrida, um dos sapos que torciam contra o sapinho da perna torta perguntou: 'Você não ouviu a gente torcer contra você não?'. O sapinho da perna torta olhou confuso para o pai, que riu e respondeu satisfeito: 'O meu filho é surdo!'. Então, minha filha, você precisa ser o meu sapinho surdo, tá bem?" (Mainha, desde sempre.)

## RESUMO

Durante o dimensionamento dos componentes de instalações elétricas para usinas fotovoltaicas de minigeração distribuída, é necessário gerenciar um grande volume de dados, que vão desde exigências oriundas das Normas Brasileiras (NBRs) até critérios de projeto adotados arbitrariamente e limitações impostas pela disponibilidade comercial dos componentes elétricos previstos em projeto. Além de realizar esse gerenciamento, cabe ao projetista explorar diferentes arranjos para a instalação, em prol de garantir que seja executada a melhor solução possível atendendo a todos os requisitos definidos no escopo do projeto. É preciso, ainda, que esse processo de dimensionamento seja executado no menor tempo possível, a fim de alcançar uma produtividade significativa e atender à elevada demanda atual por esse tipo de projeto.

Recorrendo à literatura de instalações elétricas de baixa e média tensão, bem como à de sistemas fotovoltaicos, é possível conhecer os cálculos e as tomadas de decisão que devem ser realizados ao longo dos dimensionamentos já mencionados. Contudo, é preciso relacionar esses processos e coordená-los com as exigências que devem ser atendidas na especificação dos componentes elétricos da instalação, a fim de obter resultados em conformidade com esses requisitos.

Dessa forma, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma planilha no *software* Excel, que tem como objetivo executar por completo os cálculos e as tomadas de decisão inerentes ao processo de dimensionamento já mencionado. A planilha considera todas as exigências normativas e os critérios de projeto especificados para o contexto adotado, de forma automática e em um intervalo de tempo significativamente menor do que aquele demandado por métodos manuais para realizar a mesma tarefa.

A partir de testes comparativos realizados, este trabalho concluiu que o dimensionamento feito através da planilha desenvolvida fornece resultados confiáveis e em 10% do tempo necessário para realizar o mesmo procedimento de forma manual, indicando que a ferramenta em questão é realmente efetiva para uma maior produtividade na elaboração de projetos de usinas fotovoltaicas de minigeração distribuída.

**Palavras-chave:** Dimensionamento elétrico; Usinas fotovoltaicas; Minigeração distribuída; Exigências normativas.

## ABSTRACT

During the specification of electrical components for photovoltaic power plants of distributed mini-generation, it is necessary to manage a large volume of data, ranging by requirements requested from the Brazilian Standards to project criteria adopted arbitrarily and limitations requested by the commercial availability of the electrical components expected in the project. In addition to performing this management, it is up to the designer to explore different arrangements for the installation to ensure that the best possible solution is implemented, meeting all the requirements defined by the project scope. It is also necessary that this specification process is carried out in the shortest possible time to achieve significant productivity and fit the high current demand for this type of project.

By referring to the literature on low and medium voltage electrical installations as well as photovoltaic systems, it is possible to understand the calculations and decision-making processes that must be carried out during the aforementioned specification. However, it is necessary to relate these processes and coordinate them with the requirements that must be fit in the specification of the electrical components of the installation, to obtain results that comply with these requirements.

Therefore, this work presents the development of a spreadsheet in Excel software, which aims to completely perform the calculations and decision-making inherent to the previously mentioned specification process. The spreadsheet automatically considers all normative requirements and project criteria specified for the adopted context, in a significantly shorter time than that required by manual methods to perform the same task.

Based on comparative tests conducted, this work concluded that the specification performed through the developed spreadsheet provides reliable results in 10% of the time required to perform the same procedure manually, indicating that the tool in question is indeed effective for greater productivity in the design of photovoltaic power plants for distributed mini-generation.

**Keywords:** Electrical specification; Photovoltaic power plants; Distributed mini-generation; Normative requirements.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação da geração fotovoltaica em modalidades de acordo com a potência instalada . . . . .	15
Tabela 2 – Principais NBRs utilizadas em projetos de usinas fotovoltaicas . . . . .	16
Tabela 3 – Principais normas fornecidas pela Enel Distribuição Ceará para projetos de usinas fotovoltaicas . . . . .	17
Tabela 4 – Processos básicos de dimensionamento de uma usina fotovoltaica de minigeração distribuída . . . . .	22
Tabela 5 – Tabelas da planilha de dimensionamentos e suas respectivas funções . . . . .	48
Tabela 6 – Dados de referência para teste de dimensionamento de usina fotovoltaica de minigeração distribuída . . . . .	67
Tabela 7 – Especificações obtidas para os componentes elétricos da usina fotovoltaica proposta para o teste da planilha de dimensionamentos . . . . .	68
Tabela 8 – Tempo demandado para a realização de dimensionamentos nos cenários de teste propostos . . . . .	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CPG	Centro de Proteção Geral
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
MT	Média Tensão
NBI	Nível Básico de Isolamento
NBRs	Normas Brasileiras
PMT	Painel de Média Tensão
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
UFV	Usina Fotovoltaica
VBA	Visual Basic for Applications

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P_p$	Potência pico total do pátio CC
$P_{inv}$	Potência nominal da saída CA do inversor
$I_{proj}$	Corrente de projeto
$I_{cor}$	Corrente corrigida
$I_{SC}$	Corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico
$FC_{agr-circ}$	Fator de correção por agrupamento de circuitos
$FC_{agr-elet}$	Fator de correção por agrupamento de eletrodutos em vala
$FC_t$	Fator de correção por temperatura
$\Delta V\%$	Queda de tensão percentual
$L$	Comprimento do circuito
$S$	Seção do condutor
$V$	Tensão nominal do circuito CC
$V_L$	Tensão de linha
$\rho$	Resistividade do cobre
$t_e$	Tempo de eliminação de defeito
$I_{cs}$	Corrente simétrica de curto-circuito trifásica
$T_f$	Temperatura máxima de curto-circuito suportada pela isolamento do condutor
$T_i$	Temperatura máxima admissível pelo condutor em regime normal de operação
$P_{inv-total}$	Soma das potências nominais dos inversores
$t$	Tempo de duração do curto-circuito
$\theta_f$	Temperatura do condutor no final do curto-circuito, em temperatura do condutor no final do curto-circuito
$\theta_i$	Temperatura do condutor no início do curto-circuito
$\beta$	Inverso do coeficiente de temperatura da resistência a 0 °C
$K$	Constante dependente do metal do condutor
$P_{trafo}$	Potência nominal do transformador

$I_{trafo}$

Corrente no transformador

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Visão geral e contextualização</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Elaboração de projetos de usinas fotovoltaicas de minigeração distribuída</b>	<b>16</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>18</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Usina fotovoltaica: conceito e funcionamento</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>Arranjo físico básico de uma usina fotovoltaica</b>	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Processo básico de dimensionamento de uma usina fotovoltaica</b>	<b>22</b>
<b>2.3.1</b>	<i>Definição de potência instalada na usina fotovoltaica</i>	<b>22</b>
<b>2.3.2</b>	<i>Dimensionamento do transformador</i>	<b>22</b>
<b>2.3.3</b>	<i>Definição do tipo de subestação</i>	<b>23</b>
<b>2.3.4</b>	<i>Definição de módulos fotovoltaicos</i>	<b>24</b>
<b>2.3.5</b>	<i>Definição de inversores</i>	<b>25</b>
<b>2.3.6</b>	<i>Definição de distribuição de carga nos inversores</i>	<b>25</b>
<b>2.3.7</b>	<i>Dimensionamento de condutores BT-CC</i>	<b>26</b>
<b>2.3.7.1</b>	<i>Critério da capacidade de condução de corrente</i>	<b>26</b>
<b>2.3.7.2</b>	<i>Critério da queda de tensão</i>	<b>27</b>
<b>2.3.8</b>	<i>Dimensionamento de condutores BT-CA</i>	<b>28</b>
<b>2.3.8.1</b>	<i>Dimensionamento de condutores de fase</i>	<b>28</b>
<b>2.3.8.1.1</b>	<i>Critério da capacidade de condução de corrente</i>	<b>28</b>
<b>2.3.8.1.2</b>	<i>Critério da queda de tensão</i>	<b>29</b>
<b>2.3.8.1.3</b>	<i>Critério de curto-circuito</i>	<b>30</b>
<b>2.3.8.2</b>	<i>Dimensionamento de condutores neutro e de proteção</i>	<b>30</b>
<b>2.3.9</b>	<i>Dimensionamento de condutores MT-CA</i>	<b>31</b>
<b>2.3.9.1</b>	<i>Critério da capacidade de condução de corrente</i>	<b>32</b>
<b>2.3.9.2</b>	<i>Critério da queda de tensão</i>	<b>33</b>
<b>2.3.9.3</b>	<i>Critério de curto-circuito</i>	<b>33</b>
<b>2.3.9.4</b>	<i>Dimensionamento da blindagem metálica pelo critério de curto-circuito</i>	<b>34</b>
<b>2.3.10</b>	<i>Dimensionamento de eletrodutos</i>	<b>34</b>

2.3.10.1	<i>Critério da taxa de ocupação</i>	34
<b>2.3.11</b>	<b><i>Dimensionamento do QGBT</i></b>	<b>35</b>
2.3.11.1	<i>Dimensionamento da proteção dos circuitos terminais</i>	36
2.3.11.2	<i>Dimensionamento da proteção BT</i>	38
2.3.11.2.1	<i>Proteção BT em subestações do tipo externa em poste 15 kV</i>	38
2.3.11.2.2	<i>Proteção BT em subestações do tipo cubículo blindado 15 kV</i>	40
<b>2.3.12</b>	<b><i>Dimensionamento da proteção MT</i></b>	<b>42</b>
2.3.12.1	<i>Proteção MT em subestações do tipo externa em poste 15 kV</i>	42
2.3.12.2	<i>Proteção MT em subestações do tipo cubículo blindado 15 kV</i>	43
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>47</b>
<b>3.1</b>	<b>Planilha de dimensionamentos: funcionamento básico e objetivos</b>	<b>47</b>
<b>3.2</b>	<b>Lógica de desenvolvimento da planilha de dimensionamentos</b>	<b>47</b>
3.2.1	<i>Definição da estrutura</i>	47
3.2.2	<i>Mapeamento das etapas de dimensionamento</i>	48
3.2.3	<i>Montagem de bancos de dados</i>	49
3.2.4	<i>Implementação de fórmulas para cálculos e tomadas de decisão</i>	52
3.2.4.1	<i>Implementação de fórmulas na tabela DIM_SE</i>	53
3.2.4.2	<i>Implementação de fórmulas na tabela DIM_BTCC_CAR</i>	54
3.2.4.3	<i>Implementação de fórmulas na tabela DIM_BTCC_STR</i>	54
3.2.4.4	<i>Implementação de fórmulas na tabela DIM_BTCC_CABO</i>	55
3.2.4.5	<i>Implementação de fórmulas na tabela DIM_BTCA_CABO</i>	57
3.2.4.6	<i>Implementação de fórmulas na tabela DIM_MTCA_COND</i>	60
3.2.4.7	<i>Implementação de fórmulas na tabela DIM_MTCA_BLIND</i>	60
3.2.4.8	<i>Implementação de fórmulas na tabela DIM_UFV_ELET</i>	61
3.2.4.9	<i>Implementação de fórmulas na tabela DIM_BTCA_PROT</i>	61
3.2.4.10	<i>Implementação de fórmulas na tabela DIM_MTCA_PROT</i>	65
<b>3.3</b>	<b>Sistema de teste da planilha de dimensionamento</b>	<b>66</b>
3.3.1	<i>Motivação e estratégia</i>	66
3.3.2	<i>Avaliação de desempenho</i>	66
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES</b>	<b>68</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>70</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos futuros</b>	<b>71</b>

<b>REFERÊNCIAS</b> .....	72
<b>APÊNDICE A –TABELAS NORMATIVAS REPRODUZIDAS NO BANCO DE DADOS DA PLANILHA DE DIMENSIONAMEN- TOS</b> .....	75
<b>APÊNDICE B –TABELAS DE CÁLCULO E TOMADA DE DECISÃO REPRODUZIDAS DA PLANILHA DE DIMENSIO- NAMENTOS</b> .....	84

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Visão geral e contextualização

Uma Usina Fotovoltaica (UFV) é essencialmente um sistema capaz de converter a energia solar em energia elétrica e injetar essa energia convertida em redes de transmissão ou distribuição (OLIVEIRA, 2022). Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as usinas fotovoltaicas instaladas no Brasil alcançaram uma marca importante em agosto de 2023, quando chegaram a representar 15,9% da matriz energética nacional (ANEEL, 2023a). No que diz respeito à geração de empregos, para a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar), a expectativa era de que o setor gerasse 300 mil empregos até o final do mesmo ano (ABSOLAR, 2023b). Esse mercado divide-se nas modalidades de Geração Centralizada (GC) e Geração Distribuída (GD)<sup>1</sup> de acordo com o nível de potência instalada, conforme exposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação da geração fotovoltaica em modalidades de acordo com a potência instalada

Geração	Modalidade	Potência instalada
Distribuída	Microgeração	até 75 kW
	Minigeração	até 3 MW
Centralizada	-	acima de 3 MW

Fonte: (ANEEL, 2023b).

O presente trabalho situa-se no contexto da minigeração distribuída, abordando pontos pertinentes ao tema de projeto de usinas fotovoltaicas nesse nicho. Essa escolha tem por objetivo aprimorar conhecimentos adquiridos na experiência de estágio supervisionado nesse âmbito, além de gerar uma importante ferramenta para o desenvolvimento de futuros projetos de usinas fotovoltaicas de minigeração, facilitando as atividades cotidianas de dimensionamento e as decisões técnicas, garantindo a qualidade dos resultados.

<sup>1</sup> A geração centralizada consiste em poucas unidades geradoras abastecendo um grande número de pessoas através de linhas de transmissão. A geração distribuída, por sua vez, constitui-se de muitas unidades geradoras pequenas, destinadas a atender unidades consumidoras locais ou remotas através da rede de distribuição (INSOL, 2021).

## 1.2 Elaboração de projetos de usinas fotovoltaicas de minigeração distribuída

Mesmo já apresentando números significativos, o crescimento do setor de energia solar é acelerado e a previsão para 2024 é de que o setor de energia solar cresça 9,3 GW em potência instalada, o que representa um aumento de 23% com relação a 2023 (ABSOLAR, 2023a). Porém, tanto as empresas já bem estabelecidas quanto aquelas recém chegadas ao mercado de energia solar enfrentam o desafio de acomodar essa demanda crescente. É em contextos como esse que as capacidades de análise e planejamento dos profissionais de engenharia são muito importantes para implementar estratégias inteligentes e otimizadas de desenvolvimento, visando reduzir o custo de tempo dos projetos e garantir a qualidade do resultado final.

No que diz respeito às etapas de desenvolvimento de um projeto, a coleta de informações como requisitos e padrões a serem atendidos é fundamental para tomar boas decisões, evitar retrabalho e obter um resultado de alta qualidade técnica (PMI, 2017). A partir desses dados, pode-se prosseguir com as etapas de dimensionamento dos elementos de uma UFV, tais como especificação de condutores de Corrente Contínua (CC) e de Corrente Alternada (CA), além de dispositivos de proteção elétrica do sistema (OLIVEIRA, 2022).

Tabela 2 – Principais NBRs utilizadas em projetos de usinas fotovoltaicas

Norma	Aplicação
NBR 5410 - Instalações elétricas de Baixa Tensão (BT)	Dimensionamento de condutores de corrente alternada (CA) e sistemas de proteção elétrica para instalações em BT
NBR 14039 - Instalações elétricas de Média Tensão (MT) de 1 kV a 36,2 kV	Dimensionamento de condutores de CA e sistemas de proteção elétrica para instalações em MT
NBR 16612:2020 - Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos - Requisitos de desempenho	Dimensionamento de condutores de corrente contínua (CC) com tensão até 1,8 kV
NBR 16690 - Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto	Disposições sobre condutores, dispositivos de proteção elétrica, dispositivos de manobra, aterramento e equipotencialização do arranjo fotovoltaico
NBR NM 280:2011 - Condutores de cabos isolados	Padronização de aspectos elétricos e construtivos de cabos elétricos e cordões flexíveis isolados

Fonte: Adaptado de Oliveira (2022)

No enorme volume de informações a serem coletadas e gerenciadas ao longo da elaboração do projeto de uma usina fotovoltaica, pode-se destacar as exigências feitas pelas NBRs, advindas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (MAMEDE, 2023). Esses textos normativos têm como principal função balizar o desenvolvimento de soluções em Engenharia a partir do fornecimento de valores de referência e limites mínimos e máximos para

as diversas variáveis envolvidas nesse processo (NBR 5410, 2004; NBR 14039, 2021; NBR 16612, 2020; NBR 16690, 2019; NBR NM 280:2011, 2011). Na Tabela 2, estão elencadas as principais normas que norteiam os projetos de usinas fotovoltaicas e suas respectivas aplicações.

Além das NBRs, há ainda os textos normativos fornecidos pelas concessionárias de energia, onde é possível encontrar informações tanto de natureza burocrática, a exemplo das etapas do processo de conexão de usinas, quanto de natureza técnica, como as normas que trazem os modelos aceitos de subestação de energia e os seus requisitos básicos de projeto. Contudo, vale ressaltar que, no Brasil, há diferentes concessionárias em operação e cada uma tem o próprio conjunto de normativas, de modo que o projetista deve identificar quais normas se aplicam à região em que se pretende construir a usina (MAMEDE, 2023). No Ceará, contexto considerado para o desenvolvimento deste trabalho, opera a Enel Distribuição Ceará, cujos principais textos normativos utilizados no projeto de usinas solares e suas respectivas aplicações estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3 – Principais normas fornecidas pela Enel Distribuição Ceará para projetos de usinas fotovoltaicas

Norma	Aplicação
CNC-OMBR-MAT-18-0122-EDBR - Conexão de Micro e Minigeração Distribuída ao Sistema Elétrico	Orientações sobre o processo de conexão de usinas solares
CNC-OMBR-MAT-18-0124-EDCE - Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária de Distribuição	Especificações técnicas para conexão em BT
CNC-OMBR-MAT-20-0942-EDBR - Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de Distribuição até 34,5 kV	Especificações técnicas para conexão em MT
WKI-OMBR-MAT-18-0248-EDBR - Utilização de Materiais em Zonas de Corrosão no Sistema Elétrico da Enel	Especificações técnicas para ferragens do sistema de conexão de acordo com o nível de corrosão local

Fonte: Adaptado de ENEL (2016).

O gerenciamento satisfatório de todos os critérios pertinentes ao projeto é imprescindível para a garantia da pontualidade na conclusão das etapas de desenvolvimento e da elevada qualidade técnica almejada pelos profissionais. A ocorrência de falhas na elaboração de projetos de usinas fotovoltaicas devido a problemas de gerenciamento de informações, tais como dados insuficientes ou desatualizados, comprometem a confiabilidade das definições técnicas e dos cálculos realizados pelos projetistas. Assim, tem-se um cenário de retrabalho significativo e muitos problemas de execução do projeto, gerando complicadores como atrasos de cronograma e prejuízos financeiros para os profissionais envolvidos (PMI, 2017).

### 1.3 Objetivos

Visando atenuar a problemática da geração de complicadores a partir de falhas de comunicação no desenvolvimento de uma usina fotovoltaica, de modo a proporcionar agilidade e segurança nesse processo, este trabalho tem como objetivo demonstrar que, mais do que o mero levantamento de dados sobre o projeto, a coordenação otimizada desses elementos pode reduzir drasticamente o custo de tempo e o risco de falhas técnicas. Para isso, tem-se os seguintes pontos como objetivos específicos:

- Levantar dados e processos necessários ao dimensionamento de uma usina solar de mini-geração distribuída e identificar as relações entre esses elementos, de modo a obter um mapa de processos de dimensionamento;
- Desenvolver uma planilha em Excel, segundo o mapa de processos de dimensionamento, para executar os dimensionamentos;
- Possibilitar, através da planilha desenvolvida, a alteração de dados basilares do projeto com a devida adequação dos elementos a eles relacionados;
- A partir de testes que comparem os cenários de dimensionamento com e sem a ferramenta em questão, verificar a eficácia desta em atenuar a problemática já apresentada.

A referida planilha compõe-se basicamente por tabelas de entradas, onde devem ser informados os padrões adotados, tabelas com bancos de dados, onde serão armazenados os dados das normas técnicas pertinentes, e tabelas de saídas, onde serão informadas as especificações técnicas dos equipamentos a serem utilizados na usina em desenvolvimento.

### 1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho divide-se em cinco capítulos, sendo o primeiro a introdução, na qual foram apresentados dados sobre o setor de energia solar no Brasil e uma breve descrição das etapas de dimensionamento de uma usina fotovoltaica, citando as principais normas que balizam esse processo. O segundo capítulo é o referencial teórico, no qual são apresentados os conceitos básicos necessários para o pleno entendimento do desenvolvimento da planilha de dimensionamentos, objeto deste trabalho. O terceiro capítulo, por sua vez, dedica-se à metodologia, na qual são detalhadas as etapas de construção da ferramenta já mencionada, expondo os cálculos envolvidos, as funções criadas e as relações entre os elementos que constituem a planilha. O quarto capítulo apresenta os resultados e as análises referentes à ferramenta desenvolvida e à

eficácia de seu uso na resolução da problemática abordada anteriormente. Por fim, o quinto capítulo, a conclusão, retoma resumidamente a ideia central do trabalho, bem como os resultados e as análises apresentados no capítulo anterior, além de sugerir trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir deste.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Usina fotovoltaica: conceito e funcionamento

Uma usina fotovoltaica é um sistema que transforma energia solar em energia elétrica. O funcionamento básico desse sistema consiste em obter eletricidade CC a partir da energia solar, convertê-la em eletricidade CA e injetar esta última na rede da concessionária (PORTAL SOLAR, 2024b).

Os principais equipamentos de uma usina fotovoltaica incluem os módulos ou painéis fotovoltaicos, responsáveis por transformar a energia solar em energia elétrica CC, os inversores, que convertem essa energia em eletricidade CA, e os dispositivos de proteção elétrica, que protegem o sistema contra sobrecargas, surtos de corrente ou tensão e outras possíveis falhas (OLIVEIRA, 2022).

Figura 1 – Exemplo de módulo fotovoltaico (à esquerda) e inversor (à direita).



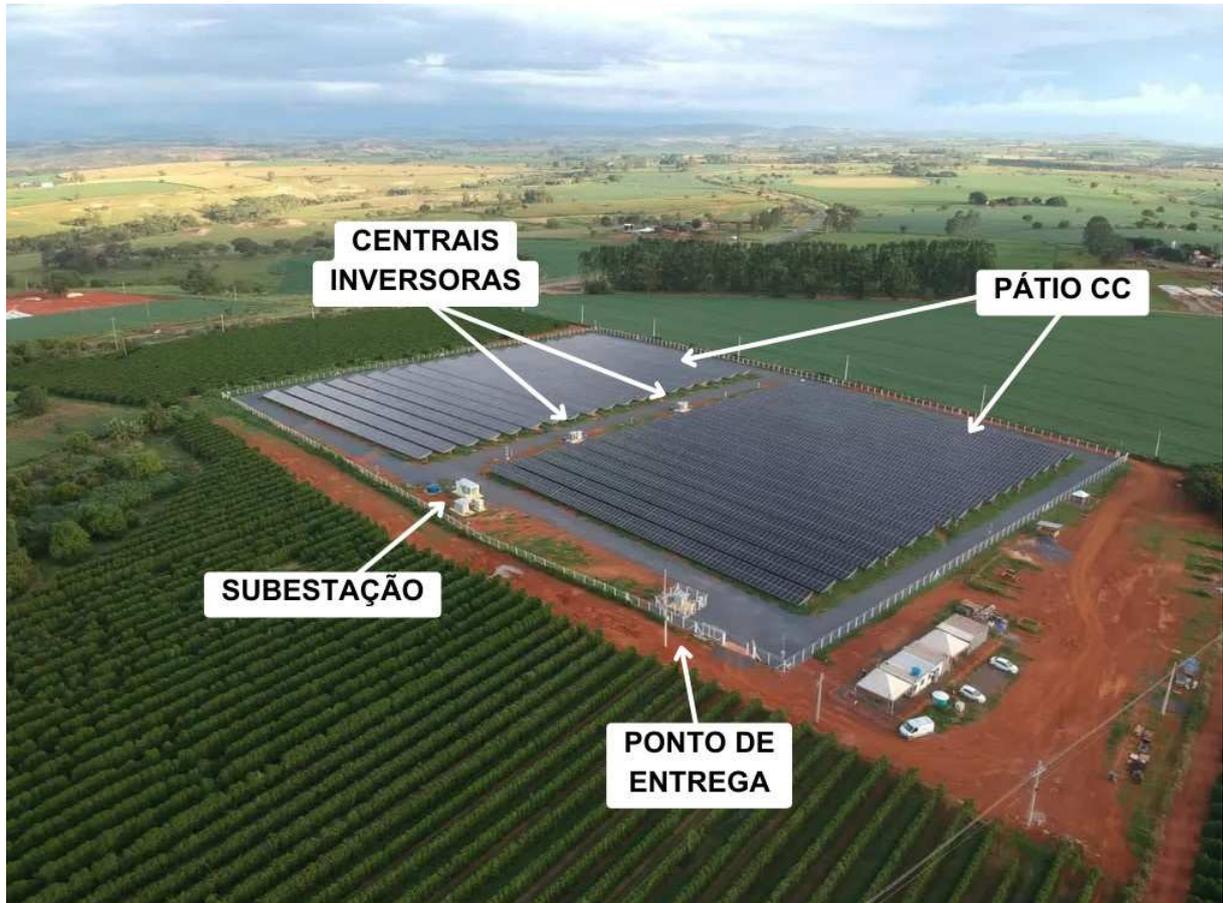
Fonte: PORTAL SOLAR (2024a), CANAL SOLAR (2022).

A depender da potência de geração, uma usina fotovoltaica pode conectar-se à rede da concessionária de forma direta (conexão em BT) ou através de uma subestação de energia (conexão em MT). Para usinas de minigeração distribuída, classe de usinas já caracterizada na Tabela 1 e escolhida como objeto do presente trabalho, a conexão à rede de distribuição da concessionária dá-se através de uma subestação de energia com tensão de 13,8 kV (EDCE 0122, 2018). Ressalta-se que a escolha por esse tipo de usina fotovoltaica tenciona aplicar e aperfeiçoar conhecimentos adquiridos na experiência com projetos dessa natureza durante o estágio supervisionado, além de desenvolver uma ferramenta para otimizar o processo de dimensionamento dessas usinas garantindo a qualidade técnica dos resultados.

## 2.2 Arranjo físico básico de uma usina fotovoltaica

Uma UFV tem seu arranjo físico básico composto pelo pátio CC, pelas centrais inversoras, pelas subestações de energia e pelos pontos de entrega, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Exemplo de arranjo físico de usina fotovoltaica de minigeração distribuída



Fonte: VALOR ECONÔMICO (2024).

O pátio CC é onde se acomodam os módulos fotovoltaicos, o que, em usinas de minigeração distribuída, é feito geralmente com o uso de estruturas metálicas, ou mesas, projetadas de acordo com as dimensões das placas e a inclinação calculada para otimização da incidência solar. Cada mesa constitui um grupo de módulos conectados em série, podendo formar um ou dois circuitos ou *strings*. As centrais inversoras, por sua vez, são onde abrigam-se os inversores da usina e podem assumir diferentes modelos, como abrigos em alvenaria e estruturas metálicas feitas para modelos e quantidades específicas de inversores, também conhecidas como *skid* (SILVA, 2016). O Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) é um painel responsável por acomodar os equipamentos de proteção, manobra e seccionamento pertinentes a circuitos BT (MONTER, 2024). Por fim, as subestações de energia constituem-se de equipamentos necessários à transfor-

mação da BT na saída dos inversores à MT da rede de distribuição onde será injetada a energia elétrica gerada pela usina. Por fim, os pontos de entrega são as conexões da UFV com a rede da concessionária (SILVA, 2016).

### 2.3 Processo básico de dimensionamento de uma usina fotovoltaica

A Tabela 4 apresenta as etapas do dimensionamento de uma UFV, a serem detalhadas a seguir (OLIVEIRA, 2022; SILVA, 2016).

Tabela 4 – Processos básicos de dimensionamento de uma usina fotovoltaica de minigeração distribuída

Etapas
Definição de potência instalada na usina fotovoltaica
Dimensionamento do transformador
Definição do tipo de subestação
Definição de módulos fotovoltaicos
Definição de inversores
Definição de distribuição de carga nos inversores
Dimensionamento de condutores CC
Dimensionamento de condutores BT-CA
Dimensionamento de condutores MT-CA
Dimensionamento de eletrodutos
Dimensionamento do QGBT
Dimensionamento da proteção de MT

Fonte: Oliveira (2022) e Silva (2016).

#### 2.3.1 Definição de potência instalada na usina fotovoltaica

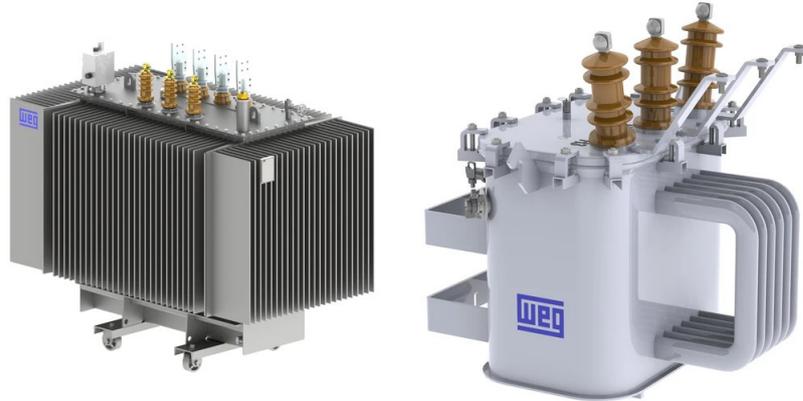
No presente trabalho, a potência total instalada na usina fotovoltaica, ou potência pico total, medida em kWp, será considerada um requisito de projeto, sendo especificada no tópico destinado a reunir esses requisitos.

#### 2.3.2 Dimensionamento do transformador

O transformador, ou trafo, é uma máquina responsável por elevar ou reduzir o nível de tensão em um dado ponto de um sistema, e, em uma usina fotovoltaica de minigeração distribuída, destina-se a elevar a tensão oriunda dos inversores ao nível de tensão da rede de distribuição da concessionária, onde pretende-se injetar a energia elétrica gerada na usina.

Segundo Silva (2016), a potência nominal do trafo da usina fotovoltaica, medida em kVA, deve ser definida de modo a garantir que, em situação de máxima potência das centrais

Figura 3 – Exemplo de transformadores utilizados em usinas fotovoltaicas de minigeração distribuída



Fonte: WEG (2024b).

inversoras, esse equipamento não seja completamente carregado, ou seja, deve existir uma folga entre a potência que será conectada ao transformador e a sua potência nominal.

Neste trabalho, serão considerados os valores comerciais de potência desses equipamentos, para que seja indicada a menor potência nominal imediatamente superior à potência a ser alocada no transformador dimensionado, que será considerada como a soma das potências nominais dos inversores a ele conectados. Contudo, vale ressaltar que, como requisito de projeto, os condutores conectados a esse dispositivo serão dimensionados de acordo com essa potência alocada no trafo, e não com a potência nominal do equipamento.

Por fim, a configuração de tensões do transformador é definida de acordo com o nível de tensão dos inversores (lado BT) e com o nível de tensão da rede de distribuição à qual a usina será conectada (lado MT) (SILVA, 2016). No contexto que se segue, o nível de tensão no lado MT é de 13,8 kV (EDBR 0942, 2021), mas o nível de tensão no lado BT será definido em função do inversor adotado como requisito de projeto.

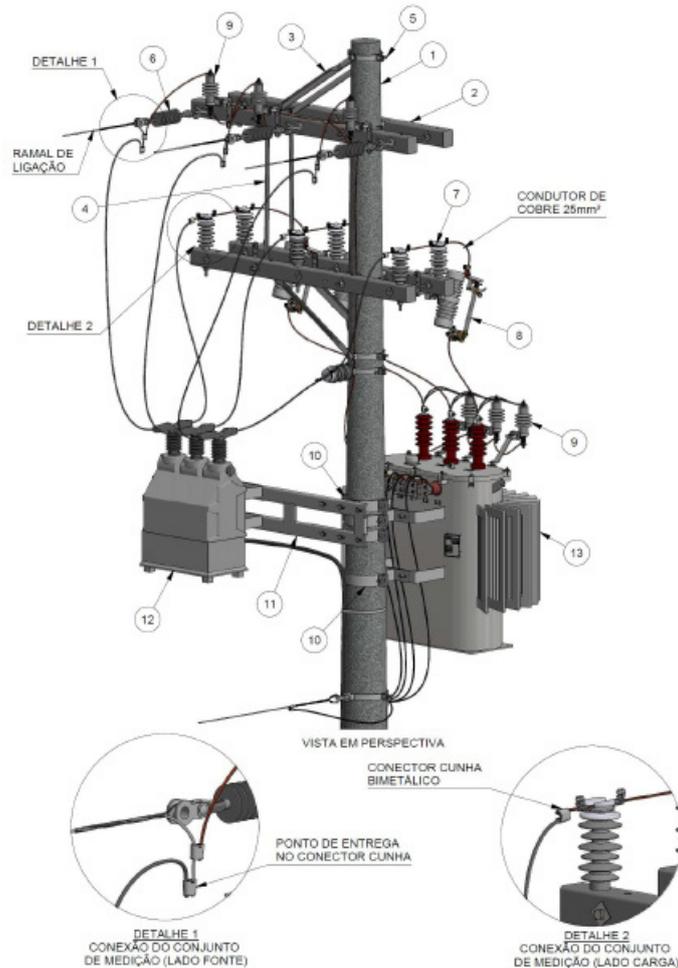
### **2.3.3 Definição do tipo de subestação**

A EDBR 0942 (2021) apresenta os tipos de subestação aceitos pela Enel Distribuição Ceará, concessionária considerada neste trabalho. Cada tipo de subestação tem um limite de potência específico para o transformador, de modo que, uma vez definido esse equipamento da UFV, pode-se definir qual modelo de subestação será utilizado no projeto. Além disso, a distribuidora fornece os dados de tensão nominal de fornecimento, tensão máxima de operação e nível de isolamento, todos em kV, o que baliza a definição dos equipamentos de proteção da subestação. Para o escopo deste trabalho, os valores definidos para os parâmetros citados são

13,8 kV, 15 kV e 95 kV, respectivamente (EDBR 0942, 2021).

No presente trabalho, o tipo de subestação a ser projetado será definido dentre dois modelos fornecidos pela EDBR 0942 (2021): subestação externa em poste (Figura 4), para transformadores até 300 kVA, e subestação em cubículo blindado (Figura 5), para transformadores acima de 300 kVA, ambas com classe de isolamento elétrica de 15 kV para tensão nominal de fornecimento 13,8 kV (EDBR 0942, 2021).

Figura 4 – Exemplo de subestação externa em poste 15 kV



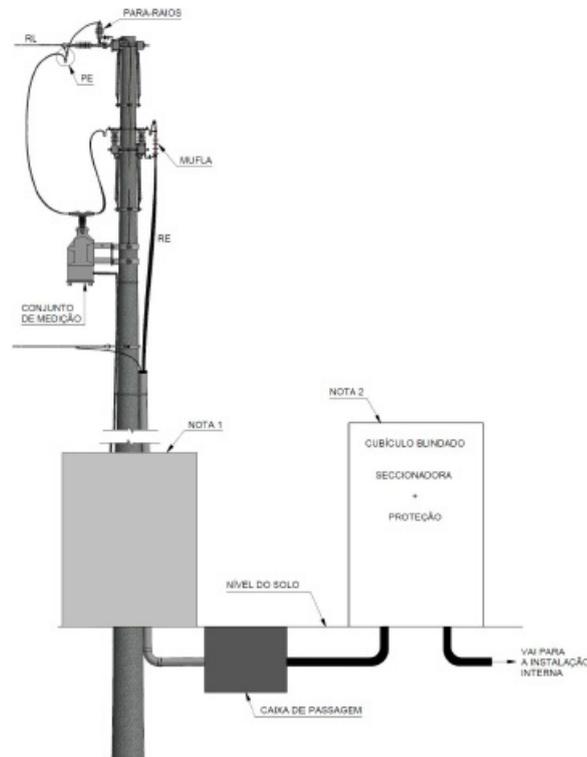
Fonte: EDBR 0942 (2021).

### 2.3.4 Definição de módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são responsáveis por transformar a energia da irradiação solar em energia elétrica CC (SILVA, 2016).

No presente trabalho, o módulo fotovoltaico será especificado como um requisito de projeto, e informações como modelo, fabricante e dados técnicos serão apresentadas no tópico

Figura 5 – Exemplo de subestação em cubículo blindado 15 kV



Fonte: EDBR 0942 (2021).

referente a esses requisitos.

### 2.3.5 Definição de inversores

O inversor é responsável por converter a eletricidade CC gerada pelos módulos fotovoltaicos em eletricidade CA, o que é necessário para que a energia elétrica gerada possa ser injetada na rede (SILVA, 2016).

Assim como os módulos, esse equipamento também será especificado como um requisito de projeto e suas informações serão apresentadas em tópico pertinente.

### 2.3.6 Definição de distribuição de carga nos inversores

O critério utilizado para distribuir a potência total do pátio CC nos inversores da usina será o de sobredimensionamento desses equipamentos, ou seja, a potência total do grupo de módulos fotovoltaicos conectados a um inversor deve ser superior à potência nominal desse dispositivo. Com isso, é possível obter uma melhor eficiência de transformação (SCARABELOT *et al.*, 2020). Essa sobrecarga é calculada pela Equação 2.1 (SCARABELOT *et al.*, 2020).

$$\frac{P_p}{P_{inv}} \times 100\% \quad (2.1)$$

Onde

$P_p$  – Potência pico total do pátio CC, em kWp;

$P_{inv}$  – Potência nominal da saída CA do inversor, em kW.

No presente trabalho, será adotado o limite de 40% de sobrecarga nos inversores indicados como requisito de projeto.

### 2.3.7 Dimensionamento de condutores BT-CC

Os condutores BT-CC se estendem pelo trecho entre os terminais de cada *string* e a entrada CC do inversor onde esse circuito será conectado. Os critérios de especificação de bitola, ou seção, para condutores BT-CC são a máxima capacidade de condução de corrente e a queda de tensão no circuito. A bitola adequada para os trechos BT-CC do sistema deve atender a esses dois critérios (NBR 16690, 2019).

Figura 6 – Exemplo de cabo CC para usina fotovoltaica de minigeração distribuída



Fonte: COBRECABO (2024b).

#### 2.3.7.1 Critério da capacidade de condução de corrente

No método da capacidade de condução de corrente, é necessário calcular a corrente de projeto  $I_{proj}$  do circuito CC usando a equação Equação 2.2 (NBR 16690, 2019).

$$I_{proj} = 1,25 \times I_{SC} \quad (2.2)$$

Onde  $I_{SC}$  é a corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico usado no projeto.

Uma vez calculada a  $I_{proj}$  do circuito, é necessário usar os fatores de correção dados pela NBR 16612 (2020) para obter a corrente corrigida  $I_{cor}$ , que será usada para determinar a bitola mínima para os condutores do circuito CC. A  $I_{cor}$  é dada pela Equação 2.3 (NBR 16612, 2020).

$$I_{cor} = \frac{I_{proj}}{FC_{agr-circ} \times FC_{agr-elet} \times FC_t} \quad (2.3)$$

Onde  $FC_{agr-circ}$ ,  $FC_{agr-elet}$  e  $FC_t$  são os fatores de correção para agrupamento de circuitos, agrupamento de eletrodutos em vala e temperatura, respectivamente, sendo todos extraídos da NBR 5410 (2004) (MORENO, 2019). Em seu anexo C, a NBR 16612 (2020), disponibiliza tabelas que relacionam bitolas padronizadas com seus respectivos limites de condução de corrente de acordo com o método de instalação adotado dentre os métodos apresentados no mesmo anexo.

### 2.3.7.2 Critério da queda de tensão

O método da queda de tensão no circuito CC consiste em calcular essa grandeza, denotada por  $\Delta V_{\%}$ , em função da bitola especificada pelo método da capacidade de condução de corrente, o que deve resultar em uma queda não superior a 3% (NBR 16690, 2019). A queda de tensão é dada pela Equação 2.4 (MORENO, 2019).

$$\Delta V_{\%} = \frac{L \times I_{proj}}{\sigma \times S \times V} \times 100\% \quad (2.4)$$

Onde:

$L$  – Comprimento do circuito, em m. Para um circuito CC, consiste na soma dos comprimentos dos cabos positivo e negativo.

$\sigma$  – Condutividade do cobre ( $44 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$  a  $90^\circ \text{C}$ , que é a hipótese mais desfavorável a considerar para regime permanente);

$S$  – Seção, ou bitola, do condutor em  $\text{mm}^2$ ;

$V$  – Tensão nominal de operação do circuito CC, em V.

Caso  $\Delta V_{\%}$  exceda o limite de 3% estipulado por norma, deve-se repetir o cálculo considerando uma bitola imediatamente superior (MORENO, 2019).

### 2.3.8 Dimensionamento de condutores BT-CA

Os condutores BT-CA percorrem o trecho compreendido entre a saída CA de um inversor e o ponto de conexão desse circuito no QGBT, parte integrante da subestação, bem como o trecho entre o QGBT e o lado BT do transformador. Esses circuitos são compostos por condutores de fase, neutro e proteção, sendo estes últimos dimensionados com base nos primeiros, conforme as tabelas 48 e 58 da NBR 5410 (2004).

#### 2.3.8.1 Dimensionamento de condutores de fase

Para dimensionar a bitola dos condutores de fase dos circuitos BT-CA anteriormente mencionados, serão adotados os critérios de capacidade de condução de corrente, queda de tensão e curto-circuito. A bitola adequada para os trechos BT-CA do sistema deve atender simultaneamente a todos esses critérios (NBR 5410, 2004).

Figura 7 – Exemplo de cabo BT-CA de usina fotovoltaica de minigeração distribuída



Fonte: INTELLI (2024).

##### 2.3.8.1.1 Critério da capacidade de condução de corrente

Para aplicar o critério da capacidade de condução de corrente, é necessário calcular a corrente de projeto  $I_{proj}$  do circuito BT-CA e, com os fatores de correção da NBR 5410 (2004) já mencionados no tópico anterior, obter a corrente corrigida  $I_{cor}$  (MAMEDE, 2023). Contudo, é importante ressaltar que  $I_{proj}$  é calculada de maneiras diferentes nos trechos mencionados anteriormente. Para o trecho entre o lado CA do inversor e o QGBT a  $I_{proj}$  é dada pela Equação 2.5 e, para o trecho entre o QGBT e o transformador, a corrente de projeto é dada pela Equação 2.6 (SILVA, 2016).

$$I_{proj} = \frac{P_{inv}}{\sqrt{3} \times V_L} \quad (2.5)$$

Onde:

$P_{inv}$  – Potência nominal da saída CA do inversor, em kW;

$V_L$  – Tensão de linha do inversor, em kV.

$$I_{proj} = \frac{\sum P_{inv}}{\sqrt{3} \times V_L} \quad (2.6)$$

Onde:

$\sum P_{inv}$  – Soma das potências nominais de saída CA do inversor, em kW;

$V_L$  – Tensão de linha do lado BT do transformador, em kV.

A corrente corrigida  $I_{cor}$ , entretanto, é calculada da mesma forma em ambos os trechos e é dada pela Equação 2.3. Todos os procedimentos a seguir também se repetem nos dois trechos BT-CA mencionados (MAMEDE, 2023).

A partir de  $I_{cor}$ , determina-se a bitola mínima necessária ao examinar as Tabelas 36 a 39 da NBR 5410 (2004), que fornecem as capacidades de condução dos valores padrão de bitolas de acordo com o método de instalação, sendo este definido na Tabela 33 da mesma norma (MAMEDE, 2023).

#### 2.3.8.1.2 Critério da queda de tensão

Para o presente método, é necessário calcular a queda de tensão percentual  $\Delta V_{\%}$  presente no circuito CA considerando a bitola dimensionada no critério da capacidade de condução de corrente, denotada por  $S$ , através da Equação 2.7 (MAMEDE, 2023).

$$\Delta V_{\%} = \frac{\sqrt{3} \times \rho \times L \times I_{proj}}{S \times V_L} \times 100\% \quad (2.7)$$

Onde:

$L$  – Comprimento total circuito, em m;

$S$  – Seção, ou bitola, do condutor, em mm<sup>2</sup>;

$\rho$  – Resistividade do cobre ( $\frac{1}{36} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ );

$V_L$  – Tensão de linha trifásica do inversor, em V.

O resultado deve estar dentro dos limites estipulados pela NBR 5410 (2004). Caso o valor calculado ultrapasse esses limites, deve-se repetir o procedimento com uma bitola imediatamente superior até chegar a uma seção cujo  $\Delta V_{\%}$  esteja dentro dos limites normativos (MAMEDE, 2023).

#### 2.3.8.1.3 Critério de curto-circuito

Segundo a NBR 5410 (2004), um condutor BT-CA deve suportar o nível de curto-circuito presumido no ponto da instalação em que ele se localiza até que a proteção atue para interromper a falta e sem comprometer a integridade desse condutor. A relação matemática entre a seção  $S$  do condutor BT-CA e o nível de curto-circuito é dada pela Equação 2.8 (MAMEDE, 2023).

$$S = \frac{\sqrt{t_e} \times I_{cs}}{0,34 \times \sqrt{\log \frac{234+T_f}{234+T_i}}} \quad (2.8)$$

Onde:

$t_e$  – Tempo de eliminação de defeito, em s;

$I_{cs}$  – Corrente simétrica de curto-circuito trifásica, em kA;

$T_f$  – Temperatura máxima de curto-circuito suportada pela isolação do condutor, em °C;

$T_i$  – Temperatura máxima admissível pelo condutor em regime normal de operação, em °C.

Os valores de  $T_f$  e  $T_i$  são estabelecidos pela NBR 5410 (2004) em sua Tabela 35.

A lógica de aplicação da Equação 2.8 consiste em obter a seção de condutor mínima capaz de suportar um nível de curto-circuito já conhecido. Portanto, ao obter essa bitola mínima, deve-se compará-la àquela obtida após a aplicação dos dois critérios anteriores e optar pela maior, pois esta atenderá aos três critérios já apresentados.

#### 2.3.8.2 Dimensionamento de condutores neutro e de proteção

O condutor neutro de um circuito BT-CA é por onde circula a corrente de retorno dos sistemas elétricos, sendo dimensionado com base na seção do condutor de fase deste circuito, conforme ilustrado na tabela 48 da NBR 5410 (2004). O condutor de proteção, por sua vez, tem

como função direcionar à terra as correntes indesejadas, como as de curto-circuito e aquelas resultantes de descargas elétricas atmosféricas. Esse condutor é dimensionado pela tabela 58 da mesma norma (MAMEDE, 2023).

### 2.3.9 Dimensionamento de condutores MT-CA

O trecho MT-CA da subestação de uma UFV compreende-se entre o lado MT do transformador e o ponto de entrega da concessionária e é percorrido por um circuito trifásico (MAMEDE, 2023).

Para subestações do tipo externa em poste, como ilustrado pela Figura 4, esse trecho constitui-se, em cada fase, de um condutor de cobre nu com seção de 25 mm<sup>2</sup>, que sai da bucha MT do trafo e passa por uma chave fusível, segue para o conjunto de medição e finalmente conecta-se à rede da concessionária no ponto de entrega, destacado na Figura 4 (EDBR 0942, 2021).

Figura 8 – Exemplo de condutor de cobre nu com seção 25 mm<sup>2</sup> de média tensão para subestação externa em poste



Fonte: COBRECOM (2024a).

Nas subestações em conjunto blindado, entretanto, esse trecho divide-se em dois menores: um subtrecho que parte do lado MT do transformador e se estende até a cabine primária, ou Painel de Média Tensão (PMT), e um subtrecho que sai do PMT e vai até o poste, próximo ao ponto de entrega, como é ilustrado pela Figura 5 (EDBR 0942, 2021).

Figura 9 – Exemplo de cabo de média tensão para subestação em conjunto blindado



Fonte: COBREMACK (2024).

Para este último tipo de subestação, é necessário dimensionar condutores como o da Figura 9 para o circuito trifásico MT, o que é feito conforme a NBR 14039 (2021) (MAMEDE, 2023). Assim como para os condutores dos trechos BT-CA, os condutores MT-CA devem atender aos três critérios já mencionados: capacidade de condução de corrente, queda de tensão e curto-circuito (NBR 14039, 2021). Além disso, os condutores de média tensão possuem uma blindagem metálica, responsável por garantir o confinamento do campo elétrico no interior do cabo, reduzir o risco de choque elétrico e conduzir as correntes de sequência zero em caso de curto-circuito (PRYSMIAN, 2022). Essa blindagem, indicada na Figura 9, também deve ser dimensionada, o que é feito considerando apenas o critério de curto-circuito (NBR 14039, 2021). Portanto, para especificar o cabo a ser utilizado em circuitos MT é necessário dimensionar a seção do condutor e a seção da blindagem metálica adequadas (PRYSMIAN, 2022).

### 2.3.9.1 Critério da capacidade de condução de corrente

Neste critério, será calculada a corrente de projeto  $I_{proj}$  do circuito MT-CA através da Equação 2.9 e, com a aplicação de fatores de correção fornecidos pela NBR 14039 (2021), será obtida a corrente corrigida  $I_{cor}$  com a Equação 2.3 (MAMEDE, 2023).

$$I_{proj} = \frac{\sum P_{inv}}{\sqrt{3} \times V_L} \quad (2.9)$$

Onde:

$\sum P_{inv}$  – Soma das potências nominais dos inversores, em kW;

$V_L$  – Tensão de linha do lado MT do transformador, em kV.

Vale ressaltar que a adoção da potência total dos inversores como potência do circuito MT-CA é um requisito de projeto, que deverá constar no tópico destinado a reunir esses requisitos.

Uma vez obtida a  $I_{cor}$ , é possível determinar a bitola mínima para o condutor MT-CA através das Tabelas 28 e 29 da NBR 14039 (2021), sendo a Tabela 28 direcionada para cabos com isolamento em XLPE, EPR ou HEPR, enquanto a Tabela 29 destina-se a cabos com isolamento em EPR 105 (MAMEDE, 2023).

### 2.3.9.2 Critério da queda de tensão

O critério da queda de tensão tem como objetivo garantir que o circuito MT-CA dimensionado não ultrapassará o limite de queda de tensão permitido por norma, que é de 5% (NBR 14039, 2021). Para isso, calcula-se a queda de tensão associada à bitola e à corrente de projeto especificadas no método anterior, o que pode ser feito utilizando novamente a Equação 2.7, mudando apenas o valor de  $V_L$  para o nível da média tensão, ou seja, 13800 V (MAMEDE, 2023).

### 2.3.9.3 Critério de curto-circuito

A NBR 14039 (2021) determina, através da expressão dada pela Equação 2.10, o curto-circuito associado à seção  $S$  obtida após a aplicação dos dois critérios de dimensionamento anteriores. A lógica aqui é, portanto, comparar a corrente de curto-circuito máxima, denotada por  $I_{curto}$ , suportada pelo condutor de seção  $S$  com a corrente de curto-circuito presumida no circuito. Caso o limite do condutor seja superior a essa corrente de curto-circuito presumida, significa que a bitola analisada atende ao critério de curto-circuito. Caso contrário, é necessário aplicar novamente a Equação 2.10 utilizando uma seção imediatamente superior àquela reprovada para verificar se o seu limite de curto-circuito suportado é suficiente para o nível presumido para essa falha no circuito (NBR 14039, 2021).

$$I_{curto} = K \times S \times \sqrt{\frac{1}{t} \times \ln\left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}\right)} \quad (2.10)$$

Onde:

$t$  – Tempo de duração do curto-circuito, em s;

$\theta_f$  – Temperatura do condutor no final do curto-circuito, em temperatura do condutor no final do curto-circuito, em °C;

$\theta_i$  – Temperatura do condutor no início do curto-circuito, em °C;

$\beta$  – Inverso do coeficiente de temperatura da resistência a 0 °C, em °C;

$K$  – Constante dependente do material do condutor, em  $A.s^{\frac{1}{2}}.mm^2$ ;

Os valores de  $\theta_f$ ,  $\theta_i$ ,  $\beta$  e  $K$  são estabelecidos pela NBR 14039 (2021).

Uma vez verificado que a bitola dimensionada pelos dois critérios anteriores atende ao critério de curto-circuito ou, alternativamente, tendo sido definida uma bitola maior para

suportar o nível de curto-circuito presumido no circuito em análise, tem-se a seção definitiva para os condutores MT-CA da UFV.

#### 2.3.9.4 Dimensionamento da blindagem metálica pelo critério de curto-circuito

Como já mencionado, o critério de curto-circuito apresentado anteriormente é utilizado para definir a seção mínima da blindagem metálica necessária aos circuitos MT de uma UFV (NBR 14039, 2021). Assim, pode-se manipular a Equação 2.10 para obter a expressão da seção da blindagem em função dos demais parâmetros.

$$I_{curto} = K \times S \times \sqrt{\frac{1}{t} \times \ln\left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}\right)} \quad (2.11)$$

Onde:

$t$  – Tempo de duração do curto-circuito, em s;

$\theta_f$  – Temperatura da blindagem no final do curto-circuito, em °C;

$\theta_i$  – Temperatura da blindagem no início do curto-circuito, em °C;

$\beta$  – Inverso do coeficiente de temperatura da resistência a 0 °C, em °C;

$K$  – Constante dependente do material da blindagem, em  $A.s^{\frac{1}{2}}.mm^2$ ;

Os valores de  $\theta_f$ ,  $\theta_i$ ,  $\beta$  e  $K$  são estabelecidos pela NBR 14039 (2021).

#### 2.3.10 Dimensionamento de eletrodutos

Os condutores elétricos anteriormente apresentados devem ser acondicionados em eletrodutos, eletrocalhas, canaletas etc. (MAMEDE, 2023). Como requisito de projeto, será considerado o uso de eletrodutos de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) em todos os encaminhamentos de circuitos na usina. Esse tipo de estrutura, ilustrado na Figura 10, é dimensionado pelo critério da taxa de ocupação (NBR 5410, 2004; NBR 14039, 2021).

##### 2.3.10.1 Critério da taxa de ocupação

A taxa de ocupação de um eletroduto, denotada por  $O\%$  e sintetizada pela Equação 2.12, é a relação entre a soma das seções  $S_e$  dos condutores previstos, considerando o diâmetro externo desses cabos, e a área interna  $S_i$  desse eletroduto, ou seja, sua seção transversal considerando o diâmetro interno (NBR 5410, 2004; NBR 14039, 2021).

Figura 10 – Exemplo de eletroduto de Polietileno de Alta Densidade (PEAD)



Fonte: TECHDUTO (2024).

$$O_{\%} = \frac{\sum S_e}{S_i} \quad (2.12)$$

Para os trechos BT, a NBR 5410 (2004) limita essa taxa de ocupação em 40 % para o acondicionamento de 3 ou mais condutores, caso aplicável a uma UFV. Para os trechos MT, a NBR 14039 (2021) limita a ocupação em 40 % para o caso de 1 condutor no eletroduto e em 30% para o caso de 2 ou mais condutores, sendo ambos os casos aplicáveis a uma UFV de minigeração distribuída, como demonstrado na descrição desses trechos.

### 2.3.11 Dimensionamento do QGBT

Como já mencionado, o QGBT é um equipamento que reúne os dispositivos de proteção, seccionamento e manobra dos circuitos BT (MONTER, 2024), e alguns exemplos desse painel são ilustrados na Figura 11. Considerando o escopo deste trabalho, temos que esses circuitos BT dizem respeito tanto àqueles que partem da saída CA dos inversores e chegam ao QGBT quanto àquele que parte deste e vai às buchas BT do transformador. Além disso, para usinas fotovoltaicas com subestação em cubículo blindado, é necessário dispor de um transformador auxiliar instalado no QGBT para alimentar cargas BT auxiliares da usina, como câmeras e refletores para monitoramento da área (SILVA, 2016).

No presente trabalho, será considerado que o QGBT é desenvolvido e montado por fabricantes especializados nesse tipo de equipamento, sendo necessário dimensionar apenas os dispositivos de proteção dos circuitos BT conectados a esse painel. Quanto ao transformador auxiliar, sua potência nominal será dada como um requisito de projeto no tópico pertinente.

Para fins de esclarecimento e de acordo com as definições de MAMEDE (2023), os circuitos BT-CA oriundos dos inversores serão definidos como circuitos terminais e o circuito que

Figura 11 – Exemplo de QGBT utilizado em usinas fotovoltaicas de minigeração distribuída



Fonte: MONTER (2024).

parte do QGBT em direção às buchas de BT do trafo será definido como circuito de distribuição.

#### 2.3.11.1 Dimensionamento da proteção dos circuitos terminais

A proteção dos circuitos terminais de um QGBT pode ser feita por chaves fusíveis ou disjuntores termomagnéticos de baixa tensão, tendo cada um o próprio conjunto de parâmetros que precisam ser definidos de modo a garantir a proteção de toda a instalação elétrica BT na usina (MAMEDE, 2023). Contudo, como requisito de projeto, será estabelecido que a proteção dos circuitos terminais para UFVs com subestações do tipo externa em poste será feita por disjuntores tripolares de baixa tensão (Figura 12) e, para UFVs com subestações do tipo cubículo blindado, por chaves fusíveis do tipo NH (Figura 13).

Os disjuntores termomagnéticos têm como princípio de funcionamento a abertura e o fechamento de um contato metálico para desligar um circuito na ocorrência de sobrecorrentes, de modo a evitar que a falha comprometa os condutores desse circuito. Portanto, um disjuntor termomagnético é caracterizado por tensão nominal, corrente nominal, número de polos, capacidade de interrupção e frequência nominal (MAMEDE, 2023).

A tensão nominal do disjuntor termomagnético diz respeito à máxima tensão de operação que o equipamento suporta, sendo escolhida de acordo com a tensão de operação do circuito CA a ser protegido. A corrente nominal refere-se à máxima corrente de operação que o disjuntor conduz sem que o seu contato atue na abertura do circuito, e é dimensionada como sendo o valor comercial imediatamente superior ao valor da corrente de projeto  $I_{proj}$  do circuito, dada pela Equação 2.5. O número de polos do dispositivo é definido pelo número

Figura 12 – Exemplo de disjuntor termomagnético tripolar de baixa tensão utilizado em usinas fotovoltaicas de minigeração distribuída



Fonte: WEG (2024a).

Figura 13 – Exemplo de fusível utilizado em usinas fotovoltaicas de minigeração distribuída



Fonte: ABB (2024b).

de condutores existentes no circuito que será protegido, de modo que, no caso de inversores trifásicos, serão considerados três polos, o que define um disjuntor tripolar. A capacidade de interrupção, por sua vez, é o maior valor de curto-circuito que o disjuntor consegue interromper sem ser comprometido, sendo definida como o valor comercial imediatamente superior ao curto-circuito presumido nesse trecho da instalação. Por fim, a frequência nominal é a frequência de operação do sistema, que é de 60 Hz no contexto deste trabalho (MAMEDE, 2023).

As chaves fusíveis, por sua vez, são dispositivos de proteção cujo princípio de funcionamento baseia-se na fusão de um elemento metálico existente no interior desses equipamentos. Quando o fusível é percorrido por uma corrente superior àquela para a qual ele foi dimensionado,

esse elemento metálico sofre fusão e interrompe o funcionamento do circuito, protegendo os equipamentos a ele conectados (MAMEDE, 2023).

A especificação completa de um fusível do tipo NH é composta pela corrente nominal, pela tensão nominal e pela capacidade de ruptura. A corrente nominal, dada em A, define-se como o valor de corrente que o fusível suporta conduzir sem excessivo aquecimento. A tensão nominal, por sua vez, é a tensão máxima na qual o fusível opera normalmente, em V. Por fim, a capacidade de interrupção, dada em kA, é o valor máximo de corrente simétrica de curto-circuito que o dispositivo consegue interromper (MAMEDE, 2023).

Para definir a corrente nominal do fusível NH, deve-se obter a corrente de projeto do circuito terminal, calculada pela Equação 2.5. A corrente nominal adequada é o valor comercial imediatamente superior ao valor obtido para  $I_{proj}$ . Já a tensão nominal do fusível depende da tensão nominal da saída CA do inversor, de modo a ser igual ou superior à tensão CA desse equipamento. Por fim, a capacidade de interrupção do fusível deve ser especificada como o valor comercial imediatamente superior ao valor obtido para a corrente simétrica de curto-circuito nesse trecho da instalação (MAMEDE, 2023).

### 2.3.11.2 Dimensionamento da proteção BT

#### 2.3.11.2.1 Proteção BT em subestações do tipo externa em poste 15 kV

Para esse tipo de subestação, a proteção do circuito de distribuição que parte do QGBT e vai às buchas BT do transformador, ou proteção geral BT, fica instalada em um quadro à parte dos dispositivos de proteção dos circuitos terminais. Esse quadro, denominado Centro de Proteção Geral (CPG), abriga unicamente o disjuntor geral BT. Esse dispositivo é da mesma natureza do disjuntor termomagnético especificado anteriormente para a proteção dos circuitos terminais em subestações externas em poste, de modo que o seu dimensionamento segue o mesmo processo já descrito (MAMEDE, 2023).

Além do disjuntor, é utilizado um Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) (Figura 14) para proteger o sistema contra surtos elétricos gerados por descargas atmosféricas que porventura atinjam a instalação. Cada fase do sistema é protegida por um DPS, totalizando três unidades desse equipamento, que ficam instaladas no quadro que reúne os disjuntores responsáveis pela proteção terminal BT (NBR 5410, 2004).

O DPS atua protegendo a instalação elétrica por se comportar como uma chave que

Figura 14 – Exemplo de DPS utilizado em usinas fotovoltaicas de minigeração distribuída



Fonte: CLAMPER (2024).

só é fechada quando um determinado nível de tensão é detectado em seus terminais, tensão esta oriunda de um surto. Uma vez fechado, o DPS desvia a energia desse surto para a terra, pois é conectado entre uma fase e o barramento de terra do quadro (NBR 5410, 2004).

Um DPS é especificado pelos aspectos: classe, máxima tensão de operação contínua, nível de proteção, corrente máxima de descarga e corrente nominal. Quanto às classes, um DPS pode ser de classe I, II ou III, a depender de sua posição física com relação à entrada da instalação. Na classe I, estão os dispositivos capazes de atuar contra uma descarga direta na alimentação da instalação e que, portanto, são instalados na entrada desta. A classe II reúne os equipamentos capazes de proteger o sistema diante de um surto já atenuado, ficando restrito a quadros secundários ou de distribuição da instalação. Por fim, a classe III é composta pelos dispositivos que atuam protegendo apenas equipamentos específicos e mais sensíveis, como computadores, sendo capazes de conter somente pequenos surtos locais (FAM ENGENHARIA, 2018). Para o contexto de usina fotovoltaica, serão utilizados dispositivos de classe II como requisito de projeto.

A máxima tensão de operação contínua, medida em V, é o maior valor de tensão que o DPS suporta em seus terminais sem atuar. O nível de proteção, por sua vez, indica a máxima tensão, em kV, que o DPS é capaz de desviar à terra, submetendo a ela o equipamento protegido por ele, de modo a fazer-se necessário garantir que esse valor seja inferior à máxima tensão suportada pelo aparelho a ser protegido. Já a corrente máxima de descarga, dada em kA, diz respeito ao nível de corrente de surto que o dispositivo conduz por até duas vezes sem sofrer

danos. Por fim, a corrente nominal, medida em kA, indica o valor de corrente que o DPS pode conduzir por até 20 vezes sem danificar-se (FAM ENGENHARIA, 2018).

Para determinar a máxima tensão de operação contínua do DPS, utiliza-se a tabela 49 da NBR 5410 (2004) e seleciona-se o valor comercial imediatamente superior ao calculado por essa tabela. Já o nível de proteção do equipamento em questão é determinado através da tabela 31 da NBR 5410 (2004), que fornece esse dado em função das tensões de fase e linha do sistema e da localização física do aparelho a ser protegido pelo DPS. Vale destacar que, no contexto considerado, o DPS será instalado em um quadro de distribuição, de modo a encaixar-se na categoria III da tabela 31. Contudo, a referida tabela abrange sistemas com até 400 V/690 V de tensão de fase e linha, respectivamente. Para valores maiores, é necessário consultar a tabela F.1 da IEC60664-1 (2020). A corrente máxima de descarga e a corrente nominal são definidas com base no valor da corrente de curto-circuito prevista para atravessar o DPS em um surto, devendo-se adotar os valores comerciais imediatamente superiores a essa corrente de falta (FAM ENGENHARIA, 2018).

#### 2.3.11.2.2 Proteção BT em subestações do tipo cubículo blindado 15 kV

Para as subestações do tipo cubículo blindado, a proteção geral BT é feita por disjuntores de baixa tensão em caixa aberta, como aquele mostrado na figura Figura 15. Equipamentos como esse suportam elevadas correntes em condições normais de operação e conseguem interromper altos níveis de curto-circuito, circunstâncias encontradas no ponto do sistema no qual são instalados.

Figura 15 – Exemplo de disjuntor de baixa tensão utilizado em usinas fotovoltaicas de minigeração distribuída



Fonte: CHINT (2024).

Diferente dos fusíveis, que precisam ser substituídos quando atuam na proteção de um circuito porque têm seu elemento metálico derretido, os disjuntores de baixa tensão em caixa aberta podem ser reutilizados após sua atuação, sendo necessário apenas reativá-lo ou, no pior caso, substituir algumas peças antes da reativação (MAMEDE, 2023).

A especificação desse equipamento é composta por número de polos, corrente nominal, capacidade de interrupção, tensão nominal, frequência nominal, faixa de ajuste dos disparadores, tipo de operação e tipo de acionamento (MAMEDE, 2023).

O número de polos depende do número de fases do circuito e, para o caso de circuitos de distribuição trifásicos, define-se um disjuntor tripolar. A corrente nominal, dada em A, consiste na máxima corrente que o disjuntor conduz sem atuar para interromper o funcionamento do circuito. Esse parâmetro é dimensionado como sendo o valor comercial imediatamente superior à  $I_{proj}$  fornecida pela Equação 2.6. A capacidade de interrupção, em kA, refere-se ao nível de curto-circuito que o dispositivo consegue interromper sem sofrer danos e é dimensionada como sendo o valor comercial imediatamente superior à  $I_{cs}$ . A tensão nominal, em V, é o valor máximo de tensão ao qual o disjuntor pode ser conectado, sendo dimensionada para suportar a tensão de linha do lado BT do transformador. A frequência nominal, dada em Hz, é a frequência em que o equipamento deve operar e é dada pela frequência da rede (MAMEDE, 2023).

A faixa de ajuste dos disparadores, por sua vez, é um intervalo de valores de corrente para atuação do disjuntor, ou seja, mesmo que ela tenha uma corrente nominal, é possível ajustá-lo para que ele atue a partir de valores inferiores de corrente. O tipo de atuação refere-se ao tipo de mecanismo usado para interromper o funcionamento do circuito, sendo o mais comum o tipo termomagnético. Por fim, o tipo de acionamento, que pode ser manual ou motorizado, refere-se à forma como o disjuntor é ativado ou desativado. No acionamento manual, esse processo se dá por meio de uma alavanca que o operador manuseia, enquanto no acionamento motorizado um motor elétrico é o responsável por abrir e fechar o circuito que passa pelo disjuntor. Esses últimos parâmetros são definidos de acordo com a disponibilidade comercial de equipamentos e a conveniência para a instalação (MAMEDE, 2023). Como requisito de projeto, define-se que o disjuntor de baixa tensão em caixa aberta utilizado será de atuação termomagnética e acionamento manual. Além do disjuntor de caixa aberta, assim como nas subestações do tipo externa em poste, são utilizados dispositivos de proteção contra surtos na proteção geral BT nas subestações do tipo em questão. O funcionamento e o processo de dimensionamento já foram explicados no tópico anterior (NBR 5410, 2004).

### 2.3.12 Dimensionamento da proteção MT

A proteção do circuito MT que conecta uma instalação elétrica à rede de distribuição localiza-se entre as buchas MT do transformador e o equipamento de medição da concessionária. Os dispositivos utilizados para proteger esse circuito variam de acordo com o tipo de subestação, que, como já mencionado, pode ser externa em poste 15 kV (Figura 4) ou em cubículo blindado 15 kV (Figura 5) (EDBR 0942, 2021).

#### 2.3.12.1 Proteção MT em subestações do tipo externa em poste 15 kV

Para essas subestações, a proteção MT é feita através de chaves fusíveis unipolares, uma em cada fase, como mostrado na Figura 4. A chave fusível, ilustrada na Figura 16, tem função de seccionamento, permitindo o desligamento manual do circuito para manutenções seguras, e de proteção contra sobrecorrente, abrindo o circuito em caso de anomalias dessa natureza. Além disso, essas subestações são protegidas contra surtos de tensão através de para-raios, como o que é mostrado também pela Figura 16 (EDBR 0942, 2021).

Figura 16 – Exemplo de chave fusível unipolar (à esquerda) e para-raio (à direita) utilizados em subestações do tipo externa em poste 15 kV



Fonte: KV LUX (2024).

Para especificar a chave fusível, é necessário dimensionar a corrente nominal de seu elo, elemento metálico que atua sofrendo fusão para abrir o circuito MT, que é definida como sendo o valor comercial imediatamente superior à corrente no lado MT do transformador, denotada por  $I_{trafo}$  e dada pela Equação 2.13 (EDBR 0942, 2021). Além disso, será tomado como requisito de projeto o uso de elo fusível do tipo K.

$$I_{trafo} = \frac{P_{trafo}}{\sqrt{3} \times V_L} \quad (2.13)$$

Onde:

$P_{trafo}$  – Potência nominal do transformador, em kVA;

$V_L$  – Tensão de linha do lado MT do transformador, em kV.

Os para-raios da subestação, por sua vez, são dimensionados pela EDBR 0942 (2021) pela sua capacidade de suporte a descargas elétricas, definida em 10 kA. Além disso, todas as chaves fusíveis e os para-raios devem ter tensão máxima de operação 15 kV e Nível Básico de Isolamento (NBI) 95 kV (EDBR 0942, 2021).

### 2.3.12.2 Proteção MT em subestações do tipo cubículo blindado 15 kV

Nas subestações do tipo cubículo blindado, ilustrado pela Figura 5, a proteção do circuito MT é feita por esse equipamento, constituído basicamente por um módulo de entrada, ou seccionamento, e um módulo de proteção (EDBR 0942, 2021). A Figura 17 mostra um exemplo de cubículo blindado.

O módulo de entrada do cubículo blindado é onde são acomodados uma chave seccionadora tripolar, responsável pela função de seccionamento manual exigida pela EDBR 0942 (2021) para possibilitar a realização de manutenções seguras no equipamento, e três para-raios destinados à proteção contra surtos de tensão, sendo um para cada fase. Essa mesma normativa determina as especificações adequadas para esses dispositivos: a chave seccionadora tripolar deve ter classe de tensão de 15 kV, enquanto os para-raios devem ter capacidade de condução de 10 kA para uma corrente de surto (EDBR 0942, 2021). Exemplos desses equipamentos são mostrados na Figura 18.

O módulo de proteção, por sua vez, acomoda outros três para-raios idênticos àqueles previstos para o módulo de seccionamento, além de um disjuntor tripolar a vácuo de média tensão (Figura 19), responsável pela proteção geral do circuito. Esse disjuntor MT é controlado por um relé, que é responsável por detectar falhas no circuito e enviar comandos de abertura e fechamento para o disjuntor. O relé de proteção (Figura 19), nomenclatura usual desse acionador do disjuntor, deve ter funções mínimas exigidas pela EDBR 0942 (2021), e são elas: sobrecorrente (50/51/50N/51N), mínima tensão (27), sequência de fase (47) e máxima tensão (59/59N) (EDBR 0942, 2021). Vale ressaltar que esse relé, por se tratar de um dispositivo eletrônico, opera com

Figura 17 – Exemplo de cubículo blindado utilizado em subestações desse tipo em 15 kV



Fonte: GAZQUEZ PAINÉIS ELÉTRICOS (2024).

Figura 18 – Exemplo de chave seccionadora tripolar (à esquerda) e para-raio (à direita) utilizados em subestações do tipo conjunto blindado em 15 kV



Fonte: A CABINE (2024a).

valores de tensão e corrente muito inferiores àqueles existentes nesse ponto da instalação, de modo a necessitar de um Transformador de Potencial (TP) e um Transformador de Corrente (TC) (Figura 20) para adequarem essas grandezas elétricas aos níveis de operação do relé utilizado (MAMEDE, 2023).

Além disso, dada a exigência normativa de prever chaves seccionadoras em todos os pontos onde há necessidade de seccionamento visível para realização de manutenções seguras, é necessário prever a instalação desse dispositivo, com as mesmas especificações exigidas para o módulo de entrada, a jusante do disjuntor MT (EDBR 0942, 2021). A Figura 21 ilustra a

Figura 19 – Exemplos de disjuntor tripolar a vácuo de média tensão (à esquerda) e relé de proteção (à direita) utilizados em subestações do tipo conjunto blindado em 15 kV



Fonte: ABB (2024a), PEXTRON (2024).

Figura 20 – Exemplos de transformador de TP (à esquerda) e TC (à direita) utilizados em subestações do tipo conjunto blindado em 15 kV



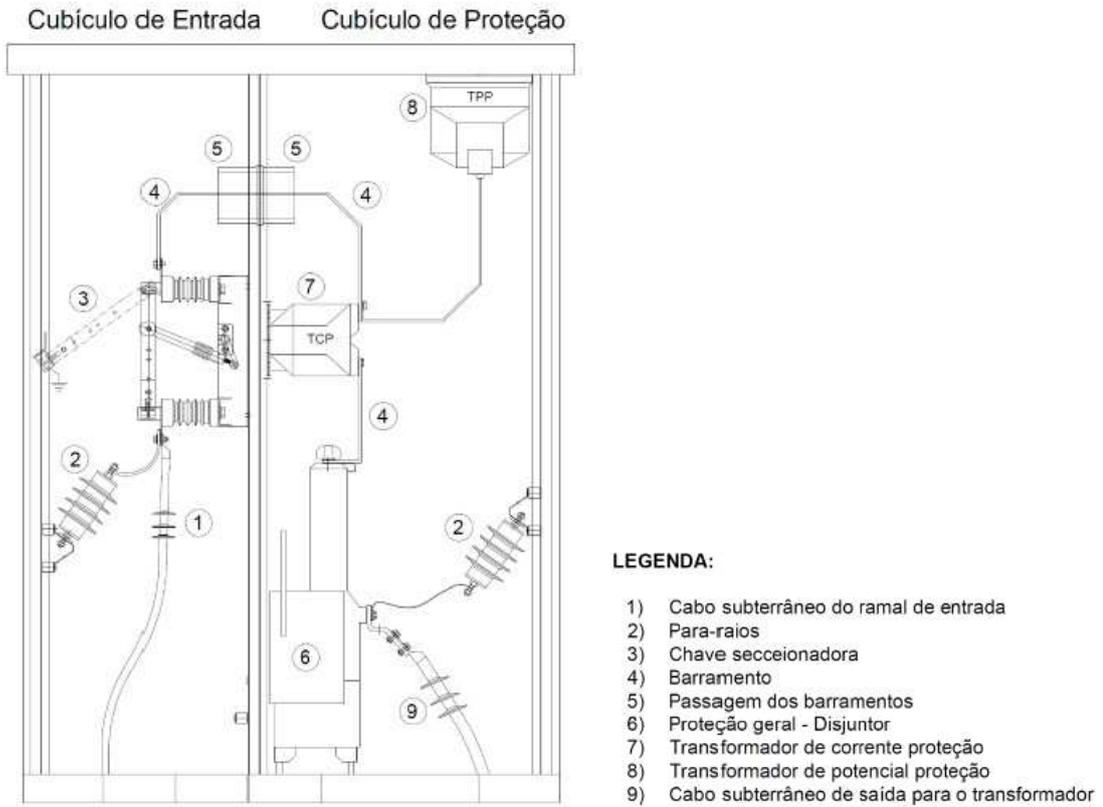
Fonte: A CABINE (2024b).

disposição física desses equipamentos no interior de um cubículo blindado, apesar de omitir a presença da chave seccionadora tripolar no módulo de proteção.

No que diz respeito ao dimensionamento do disjuntor MT, a EDBR 0942 (2021) determina apenas a capacidade de interrupção simétrica mínima do disjuntor MT, o que é feito de acordo com a tensão nominal do sistema, sendo essa capacidade mínima de 250 MVA para tensão nominal até 13,8 kV e de 630 MVA para o nível de 34,5 kV. Dado o contexto de média tensão em 13,8 kV, será adotada a capacidade mínima de 250 MVA para a interrupção simétrica do equipamento. Além disso, conforme já definido anteriormente para outros equipamentos, a classe de isolamento do disjuntor MT deve ser de 15 kV, em concordância com a tensão de 13,8 kV fornecida pela rede de distribuição (EDBR 0942, 2021).

Por fim, assim como definido para o QGBT, será considerado como requisito de projeto a elaboração do cubículo blindado por parte de fabricantes especializados nesse equipa-

Figura 21 – Arranjo físico básico dos equipamentos de proteção MT no interior do cubículo blindado de 15 kV



Fonte: EDBR 0942 (2021).

mento.

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Planilha de dimensionamentos: funcionamento básico e objetivos**

Como já mencionado na introdução deste trabalho, a elaboração de um projeto envolve um grande volume de informações, que devem ser gerenciadas de maneira eficiente e coordenada para garantir a obtenção de resultados confiáveis no menor tempo possível (PMI, 2017). Especificamente no contexto de instalações elétricas, é necessário atender simultaneamente a padrões estabelecidos por normas técnicas, a limitações de disponibilidade comercial de equipamentos, a padrões específicos de cada projeto e a outros requisitos (MAMEDE, 2023).

Buscando atender a tal demanda, este trabalho trata do desenvolvimento de uma planilha em Excel capaz de realizar cálculos e tomadas de decisão básicas para a elaboração de um projeto elétrico de usinas fotovoltaicas de minigeração distribuída, de modo a fornecer as especificações de materiais elétricos como cabos, eletrodutos e equipamentos de proteção. Dotada de um banco de dados composto por tabelas extraídas das NBRs e por especificações comerciais dos equipamentos a serem dimensionados, além de lógicas de cálculo que levam em consideração requisitos de projeto específicos que serão apresentados posteriormente, essa ferramenta visa fornecer resultados confiáveis com um custo de tempo significativamente menor do que outros métodos de dimensionamento, uma vez que sua estrutura baseia-se na coordenação entre os processos envolvidos. Assim, o papel do usuário resume-se apenas a inserir as informações imprescindíveis aos dimensionamentos a serem realizados e a analisar o resultados obtidos.

#### **3.2 Lógica de desenvolvimento da planilha de dimensionamentos**

##### ***3.2.1 Definição da estrutura***

A planilha desenvolvida é formada por tabelas divididas de acordo com a etapa que realizam no processo de dimensionamento e dispostas na ordem em que essas etapas devem ocorrer, visando tornar o uso mais intuitivo ao seguir uma sequência lógica de cálculos e tomadas de decisão coordenados entre si. Assim, pretende-se antecipar a aplicação de requisitos de projeto para garantir que os resultados obtidos atendam a essas demandas.

Totalizando 15 tabelas, tem-se 11 destinadas à execução direta das etapas de dimensionamento, como cálculo de bitolas de cabos, e 4 destinadas ao armazenamento de dados necessários à realização dessas etapas, como valores de referência normatizados para a capaci-

dade de condução de um tipo de cabo em função de sua seção e de outros aspectos.

A seguir, a Tabela 5 relaciona as tabelas do sistema com suas respectivas funções. Vale ressaltar que as tabelas cujo nome começa com "DIM" são responsáveis por realizar cálculos e tomadas de decisão, enquanto aquelas cujo nome inicia-se com "DAT" atuam armazenando os dados de referência necessários ao processo de dimensionamento.

Tabela 5 – Tabelas da planilha de dimensionamentos e suas respectivas funções

Tabela	Função
DAT_UFV_BASE	Armazenamento de dados técnicos da rede à qual a usina se conecta e dos equipamentos de geração (módulos e inversores), que devem ser informados pelo usuário
DIM_SE	Dimensionamento das subestações da usina
DIM_BTCC_CAR	Distribuição de carga CC nos inversores da usina
DIM_BTCC_STR	Distribuição de carga CC de cada inversor em strings
DIM_BTCC_CABO	Dimensionamento dos cabos dos circuitos CC
DIM_BTCA_CABO	Dimensionamento dos cabos dos circuitos CA de baixa tensão
DIM_MTCA_COND	Dimensionamento da seção do condutor presente nos cabos dos circuitos CA de média tensão
DIM_MTCA_BLIND	Dimensionamento da seção da blindagem presente nos cabos dos circuitos CA de média tensão
DIM_UFV_ELET	Dimensionamento dos eletrodutos onde serão acondicionados os cabos dos circuitos CC e CA
DIM_BTCA_PROT	Dimensionamento da proteção dos circuitos CA de baixa tensão
DIM_MTCA_PROT	Dimensionamento da proteção dos circuitos CA de média tensão
DAT_NBR_16612	Dados de referência da NBR 16612
DAT_NBR_5410	Dados de referência da NBR 5410
DAT_NBR_14039	Dados de referência da NBR 14039
DAT_FAB_MAT	Especificações técnicas de modelos comerciais de equipamentos elétricos

Fonte: Elaboração própria.

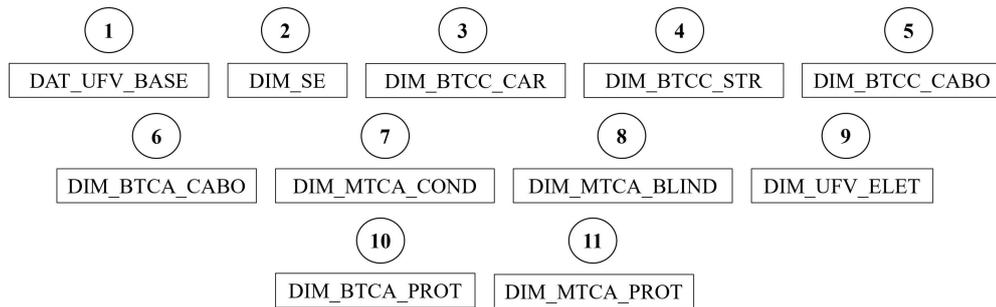
### 3.2.2 Mapeamento das etapas de dimensionamento

Além de conhecer os processos inerentes ao dimensionamento de uma usina fotovoltaica, já explicados no referencial teórico deste trabalho e reunidos na Tabela 4, é necessário compreender as relações entre eles para conectá-los de maneira a obter o máximo de resultados possível com uma entrada mínima de dados, obtendo um ganho significativo de velocidade na execução desses processos sem comprometer a qualidade dos resultados gerados pelo sistema.

Como exemplo da aplicação dessa lógica pode-se apontar os dados técnicos de tensão na rede considerada, ou seja, os níveis de baixa e média tensão. Esses valores são informados pelo usuário na tabela DAT\_UFV\_BASE, de onde são referenciados por outras tabelas para a realização de cálculos de corrente de projeto, queda de tensão percentual e outros processos. Essa ligação garante que todos os processos dependentes dos níveis de tensão do sistema usem sempre o valor correto, que será automaticamente atualizado nas tabelas correlatas em caso de alteração na tabela de origem (DAT\_UFV\_BASE).

Tendo em vista a importância de conhecer as relações entre as etapas de dimensionamento, foi realizado um mapeamento dessas relações, indicando a sequência de etapas e as relações entre elas, além das entradas e as saídas de dados inerentes a cada uma para estabelecer a melhor coordenação possível. A Figura 22 mostra a sequência adotada para a execução das etapas de dimensionamento e a Figura 23 apresenta as relações entre elas.

Figura 22 – Sequência adotada para execução de etapas de dimensionamento na planilha



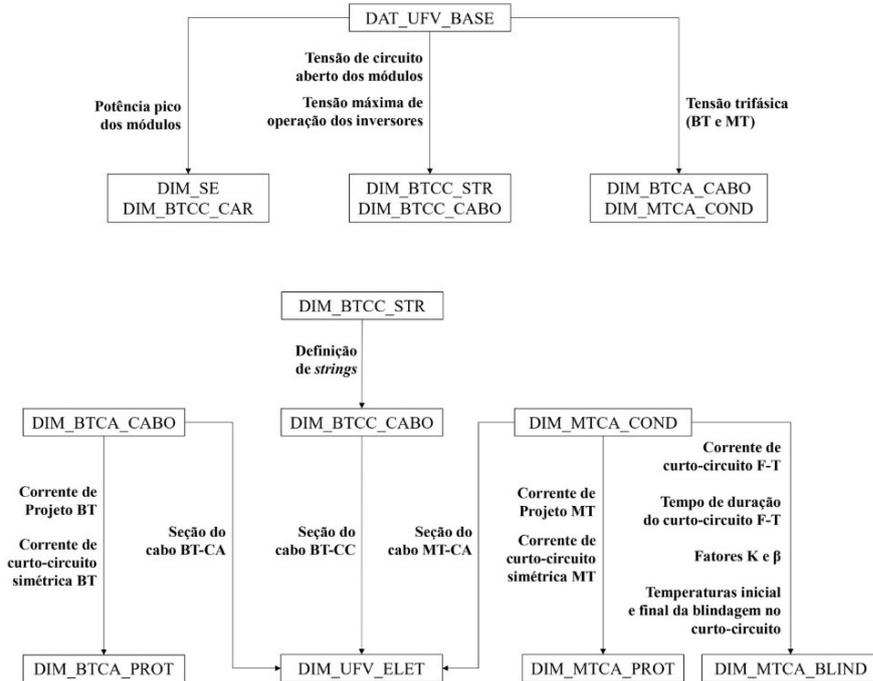
Fonte: Elaboração própria.

Vale ressaltar que a disposição das tabelas na planilha de dimensionamentos segue a sequência de etapas demonstrada no fluxograma acima. Dessa forma, o usuário alimenta o sistema e obtém resultados em um fluxo intuitivo que permite a visualização clara das relações entre as grandezas gerenciadas ao longo dos processos de dimensionamento.

### 3.2.3 Montagem de bancos de dados

Para que as tabelas da planilha executem suas respectivas funções, é necessário fornecê-las dados oriundos de normas, como fatores de correção e capacidades de condução de corrente nos condutores, informações necessárias ao dimensionamento de cabos elétricos. Assim, foi montado um banco de dados composto pelas tabelas DAT\_NBR\_16612, DAT\_NBR\_5410, DAT\_NBR\_14039 e DAT\_FAB\_MAT, conforme Tabela 5.

Figura 23 – Mapeamento das relações entre as etapas de dimensionamento na planilha



Fonte: Elaboração própria.

A tabela DAT\_NBR\_16612 reproduz a tabela C.9 da NBR 16612 (2020), que apresenta as capacidades de condução de corrente para bitolas de 1,5 mm<sup>2</sup> a 400 mm<sup>2</sup> com o condutor a 90 °C em temperaturas ambiente de 30 °C, 40 °C e 50 °C no método de instalação C.3, referente a cabos em eletrodutos diretamente enterrados. Contudo, a DAT\_NBR\_16612 considera apenas as bitolas de 4, 6 e 10 mm<sup>2</sup> como requisito de projeto.

A tabela DAT\_NBR\_5410, por sua vez, reúne mais de uma tabela da NBR 5410 (2004) e são elas: as tabelas 40, 42 e 45, que trazem os fatores de correção de temperatura ambiente do solo, de agrupamento de circuitos no método de instalação D e de agrupamento de eletrodutos no método de instalação D, respectivamente; as tabelas 37 e 39, que trazem as capacidades de condução de corrente para os métodos D e E, respectivamente; a tabela 58, que traz a seção mínima do condutor de proteção; e, por fim, a tabela 35, que traz as temperaturas máxima de serviço contínuo e máxima em curto-circuito de cabos com isolamento em XLPE.

Vale ressaltar que alguns critérios de projeto já foram aplicados na reprodução dessas tabelas, como já mencionado com relação à tabela C.9 da NBR 16612 (2020) e à tabela 35 da NBR 5410 (2004). Para a tabela 40 da NBR 5410 (2004), por sua vez, foram considerados os fatores de correção referente a temperaturas de 25 °C a 60 °C para a isolamento XLPE, que foi padronizada como requisito para os cabos BT-CA. Já na reprodução da tabela 42 da mesma norma, foi considerado apenas o conjunto de valores referente aos métodos de instalação D e E,

adotados como padrão nas subestações de cubículo blindado e externa em poste, respectivamente. No caso da tabela 45 da NBR 5410 (2004), foram reproduzidos os fatores de agrupamento referentes ao caso de cabos multipolares em eletrodutos, com 1 cabo por eletroduto, a fim de equivaler à condição adotada como padrão de 3 cabos unipolares por eletroduto. Com relação às capacidades de condução dos cabos, considerando novamente os métodos de instalação D e E como padrão, foram reproduzidos os valores das tabelas 37 e 39 da NBR 5410 (2004) para o caso de 3 condutores carregados, pois os circuitos BT-CA em questão são todos trifásicos. Além disso, como requisito de projeto, foram consideradas apenas as seções de 50 a 400 mm<sup>2</sup>. Quanto à tabela 58 da mesma norma, foram extraídas as seções correspondentes àquelas consideradas para os condutores de fase, ou seja, de 50 a 400 mm<sup>2</sup>.

A tabela DAT\_NBR\_14039 reúne informações similares àquelas mencionadas anteriormente no contexto de baixa tensão, mas com valores extraídos da NBR 14039 (2021) e referentes ao contexto de média tensão. Foram reproduzidas as tabelas 28, 31, 38, 42, 43 e 44, além do item 6.2.6.2.4 da referida norma. É necessário destacar que, conforme exposto na descrição dos modelos de subestação considerados, cabos isolados de média tensão são utilizados apenas no contexto de cubículo blindado, visto que, em subestações externas em poste, o trecho MT-CA é implementado por um condutor de cobre nu com seção 25 mm<sup>2</sup>. Dito isto, a tabela 28 da NBR 14039 (2021), que traz as capacidades de condução de corrente para cabos com isolamento XLPE, TR XLPE, EPR ou HEPR e condutores de cobre ou alumínio para todos os métodos de instalação previstos pela referida norma, teve reproduzidos apenas os valores referentes ao método de instalação G1 para as seções de 25 a 185 mm<sup>2</sup>, novamente devido a requisitos de projeto. A tabela 31, por sua vez, reúne os fatores de correção de temperatura e foi reproduzida considerando a faixa de 25 °C a 60 °C para a isolamento XLPE por padrão de projeto. Já a tabela 38 da NBR 14039 (2021) apresenta os fatores de correção para agrupamento de eletrodutos e, para sua reprodução no banco de dados, foram considerados os valores correspondentes ao caso de 3 eletrodutos contendo 1 cabo MT-CA de 185 mm<sup>2</sup> em cada (maior seção admitida pelo sistema), para todos os espaçamentos admitidos pela tabela. A tabela 42 da norma em questão foi reproduzida em sua totalidade, visto que apresenta os valores para as constantes  $K$  e  $\beta$  do cobre e do alumínio, necessárias no dimensionamento de cabos MT-CA e já mencionadas no capítulo anterior. A tabela 43, por sua vez, traz os valores de temperatura inicial e final no condutor em curto-circuito e teve reproduzidos apenas os valores referentes à isolamento XLPE por questão de requisito de projeto. Por fim, a tabela 44 e o item 6.2.6.2.4 da NBR 14039 (2021) são

complementares entre si e trazem os valores de temperatura inicial e final na blindagem do cabo MT-CA na ocorrência de um curto-circuito, o que também foi reproduzido considerando apenas a isolamento XLPE.

Por fim, a tabela DAT\_FAB\_MAT reúne valores comerciais de materiais elétricos a serem dimensionamentos pela ferramenta em questão. Sua função é retornar, nos dimensionamentos pertinentes, as especificações adequadas para esses equipamentos considerando tanto os cálculos orientados por norma quanto a disponibilidade comercial desses materiais. A tabela DAT\_FAB\_MAT apresenta informações sobre cabos elétricos, eletrodutos do tipo PEAD, disjuntores, chaves fusíveis, fusíveis tipo K e DPS. Vale ressaltar que esses dados foram extraídos de catálogos oficiais dos fabricantes mais conhecidos desses equipamentos, a fim de garantir a segurança no uso dessa informações para o funcionamento da planilha em questão.

O Apêndice A reúne as tabelas normativas mencionadas anteriormente.

#### **3.2.4 Implementação de fórmulas para cálculos e tomadas de decisão**

Assim como feito na montagem do banco de dados anteriormente apresentado, foram aplicados requisitos de projeto na implementação dos cálculos explanados no referencial teórico deste trabalho, além de terem sido reproduzidas as relações entre as etapas de dimensionamento expostas na Figura 23. Essa prática tem como objetivo garantir que a planilha cumpra com a sua função principal de gerar resultados precisos em um intervalo de tempo reduzido em comparação com outros métodos de dimensionamento.

Vale ressaltar que as funções nativas do Excel, ferramenta utilizada para o desenvolvimento da planilha de dimensionamentos, nem sempre foram suficientes para implementar as lógicas desejadas. Portanto, utilizou-se do recurso de funções personalizadas disponível no programa, que permite a criação de funções através da elaboração de códigos em *Visual Basic for Applications (VBA)*.

Destaca-se, ainda, o padrão visual adotado nas tabelas para facilitar o uso: as células que devem ser preenchidas pelo usuário são apresentadas na cor cinza, enquanto as células que retornam resultados são apresentadas na cor branca. Por fim, é possível visualizar as tabelas desenvolvidas no Apêndice B.

### 3.2.4.1 Implementação de fórmulas na tabela DIM\_SE

Conforme apontado na Tabela 4, a tabela DIM\_SE executa o dimensionamento das subestações existentes na usina, definindo sua potência pico total, sua potência total de inversores, sua potência de transformação ou do transformador e o tipo de subestação (cubículo blindado ou externa em poste).

Tendo espaço inicial para 10 subestações, em cada uma delas é necessário informar o número de módulos alocados. Além disso, para os inversores, admite-se o uso de equipamentos de até 2 níveis diferentes de potência, sendo necessário informar a quantidade e a potência nominal de cada tipo de inversor. A partir desses dados, é possível calcular a potência pico total e a potência total de inversores na subestação implementando diretamente a Equação 3.1 e a Equação 3.2, respectivamente.

$$P_{Ptotal} = N_{módulos} \times P_{Pnominal} \quad (3.1)$$

Onde:

$P_{Ptotal}$  – Potência pico total da subestação, em kWp;

$N_{módulos}$  – Número de módulos alocados na subestação;

$P_{Pnominal}$  – Potência pico nominal dos módulos, em kWp, fornecida pela tabela DAT\_UFV\_BASE.

$$P_{total} = (N_{inv1} \times P_{inv1}) + (N_{inv2} \times P_{inv2}) \quad (3.2)$$

Onde:

$P_{total}$  – Potência total de inversores, em kW;

$N_{inv1}$  – Número de inversores do tipo 1;

$P_{inv1}$  – Potência nominal dos inversores do tipo 1, em kW;

$N_{inv2}$  – Número de inversores do tipo 2;

$P_{inv2}$  – Potência nominal dos inversores do tipo 2, em kW.

No que diz respeito ao dimensionamento do transformador da subestação, adotou-se como requisito de projeto a definição de uma potência superior à potência total dos inversores, a fim de garantir que o transformador não opere em sua potência máxima. Essa diferença, denominada folga, é calculada pela Equação 3.3, que foi diretamente implementada na tabela

DIM\_SE. Assim, para cada valor de potência de transformação indicado pelo usuário, é calculada a folga correspondente, o que permite decidir se ela está adequada à sua aplicação.

$$Folga = 1 - \left( \frac{P_{total}}{P_{trafo}} \right) \times 100\% \quad (3.3)$$

Onde:

$P_{total}$  – Potência total de inversores, em kW;

$P_{trafo}$  – Potência do transformador, em kVA.

Por fim, ao definir a potência do transformador, a tabela DIM\_SE indicará o tipo de subestação a ser adotado, conforme estabelecido pela EDBR 0942 (2021) e exposto no referencial teórico deste trabalho.

#### 3.2.4.2 Implementação de fórmulas na tabela DIM\_BTCC\_CAR

A tabela DIM\_BTCC\_CAR tem como função realizar a distribuição da potência pico total da usina nos inversores previstos, calculando a sobrecarga percentual resultante em cada equipamento. Assim como na tabela DIM\_SE, as células em cinza indicam os dados que devem ser fornecidos pelo usuário, que são, neste caso, a potência nominal do inversor e o número de módulos a ele conectados. Como resultado, obtém-se a potência pico alocada no inversor, dada pela Equação 3.1, e a sobrecarga percentual do equipamento, dada pela Equação 2.1.

Dessa forma, é permitido ao usuário distribuir a potência pico da usina controlando o nível de sobrecarga imposto a cada inversor, garantindo um arranjo eletricamente seguro.

#### 3.2.4.3 Implementação de fórmulas na tabela DIM\_BTCC\_STR

Uma vez distribuída a potência pico da usina através da tabela DIM\_BTCC\_CAR, é necessário definir as *strings*, ou seja, determinar quantos módulos formarão cada circuito BT-CC para obter os dados necessários ao dimensionamento dos cabos a serem utilizados nesses circuitos. A tabela DIM\_BTCC\_STR solicita que o usuário identifique o inversor, nomeie a *string* e informe o número de módulos que a compõem, o que permite à tabela retornar a potência pico, a tensão de circuito aberto e a tensão de operação da *string*. Além disso, a partir da identificação do inversor, a tabela localiza o valor de sua tensão máxima admitida na entrada. Finalmente, tendo essas informações reunidas, o usuário pode verificar facilmente se a *string*

que está sendo definida está dentro do limite de tensão admitido pelo inversor, bem como obter a tensão de operação do circuito para realizar o dimensionamento dos condutores BT-CC.

É importante destacar que os módulos de uma *string* são conectados em série, de forma que sua tensão de circuito aberto é dada pela soma desse dado em todos os módulos, e o mesmo é válido para a tensão de operação do circuito. Essas relações são mostradas pela Equação 3.4 e pela Equação 3.5, respectivamente.

$$V_{ocstring} = \sum V_{ocmódulos} \quad (3.4)$$

Onde:

$V_{octotal}$  – Tensão de circuito aberto da *string*, em V;

$V_{ocmódulos}$  – Tensão de circuito aberto do módulo, em V.

$$V_{opstring} = \sum V_{opmódulos} \quad (3.5)$$

Onde:

$V_{optotal}$  – Tensão de operação da *string*, em V;

$V_{opmódulos}$  – Tensão de operação do módulo, em V.

#### 3.2.4.4 Implementação de fórmulas na tabela DIM\_BTCC\_CABO

A partir da formação das *strings* na tabela DIM\_BTCC\_STR, é possível dimensionar os condutores BT-CC que devem ser utilizados nesses circuitos. Seguindo os procedimentos explanados no referencial teórico deste trabalho, a tabela DIM\_BTCC\_CABO recebe dados de identificação da *string* e de condições de instalação dos circuitos BT-CC para retornar a seção mínima necessária para os seus condutores e a queda de tensão percentual correspondente.

Assim como feito nas tabelas apresentadas anteriormente, as células que recebem dados do usuário estão na cor cinza, enquanto as células que emitem resultados estão na cor branca. Portanto, os dados que devem ser fornecidos pelo usuário são a identificação do circuito (inversor, *string* e número de módulos) e as suas condições de instalação previstas, que são: número de circuitos agrupados, número de eletrodutos agrupados, espaçamento entre os eletrodutos (em metros), temperatura de referência, temperatura ambiente e comprimento do circuito (em metros).

Com os cinco primeiros dados, a tabela é capaz de buscar os fatores de correção pertinentes a essas condições no banco de dados já apresentado e calcular a corrente corrigida dos circuitos, possibilitando a definição da seção mínima necessária ao condutor pelo método da capacidade de condução de corrente (Equação 2.3). O sexto dado fornecido pelo usuário, que seria o comprimento do circuito, é utilizado no cálculo da queda de tensão percentual correspondente à bitola mínima exigida, o que é feito através da aplicação da Equação 2.4. Por fim, o usuário pode ainda escolher uma bitola maior do que aquela calculada e obter imediatamente sua queda de tensão percentual, de modo a compará-la com a seção mínima e definir a que melhor atende ao projeto.

Os dados exibidos nas células de cor branca, por sua vez, são a corrente de projeto do circuito, os fatores de correção a serem nela aplicados pela Equação 2.3, a seção mínima calculada para o condutor do circuito e as quedas de tensão percentuais para essa bitola e para a bitola eventualmente escolhida pelo usuário. Ao identificar o circuito, a corrente de projeto é automaticamente localizada na tabela DATA\_UFV\_BASE. Além disso, os fatores de correção correspondentes às condições de instalação informadas são localizados no banco de dados da planilha através da função personalizada "FC", criada com a ferramenta VBA do Excel e cujo código é mostrado na Figura 24.

Figura 24 – Código VBA da função "FC"

```
Function FC(valor As Double, intervalo As Range)

    nlinhas = intervalo.Rows.Count
    For i = 1 To nlinhas
        If valor = intervalo(i, 1) Then
            FC = intervalo(i, 2)
            Exit For
        End If
    Next

End Function
```

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, a tabela DIM\_BTCC\_CABO retorna ao usuário a seção mínima exigida para o cabo nos circuitos BT-CC, o que é feito através da função personalizada denominada "BITOLA", cujo código em VBA é exibido na Figura 25. Para realizar essa tarefa, a função "BITOLA" recebe o valor da corrente corrigida do circuito e o intervalo onde deve ser localizada a bitola do cabo, o que se faz necessário devido ao fato de que as capacidades de condução de corrente na tabela DAT\_NBR\_16612 são dependentes da temperatura. Portanto, utilizou-se

uma estrutura condicional para aplicar essa função personalizada no intervalo correspondente à temperatura de referência informada pelo usuário (Figura 26).

Figura 25 – Código VBA da função "BITOLA"

```
Function bitola(corrente As Double, intervalo As Range)

    nlinhas = intervalo.Rows.Count
    For i = 1 To nlinhas
        If corrente < intervalo(i, 2) Then
            bitola = intervalo(i, 1)
            Exit For
        End If
    Next

End Function
```

Fonte: Elaboração própria.

Figura 26 – Fórmula para aplicação da função "BITOLA" no dimensionamento de condutores BT-CC

```
=SE(OU([@T_ref("C")]<="",[@Icor(A)]>=");SE([@T_ref("C")]=20;bitola([@Icor(A)];DAT_NBR_16612!$A$4:$B$6);SE([@T_ref("C")]=30;bitola([@Icor(A)];DAT_NBR_16612!$C$4:$D$6);SE([@T_ref("C")]=40;bitola([@Icor(A)];DAT_NBR_16612!$E$4:$F$6))))
```

Fonte: Elaboração própria.

### 3.2.4.5 Implementação de fórmulas na tabela DIM\_BTCA\_CABO

Na tabela de dimensionamento dos condutores BT-CA, foi utilizada a mesma lógica de construção da tabela DIM\_BTCC\_CABO, apresentada anteriormente. Contudo, em virtude da natureza desses circuitos, algumas outras informações são necessárias para efetuar esse dimensionamento. Inicialmente, assim como já mostrado no dimensionamento de condutores BT-CC, o usuário precisa identificar o circuito, o que permite à tabela localizar sua potência nominal e, assim, calcular a corrente de projeto correspondente, conforme a Equação 2.5 e a Equação 2.6.

A seguir, é necessário inserir na tabela os dados referentes às condições de instalação dos circuitos BT-CA em processo de dimensionamento, que consistem em, além dos parâmetros já mencionados para os condutores BT-CC, no fator de potência adotado para a instalação, o número de condutores por fase, os dados de curto-circuito presumido (tempo de duração da falha em segundos e nível de corrente de falta em quilo-ampères) e o material do condutor considerado (cobre ou alumínio). A partir do fornecimento dessas informações, a tabela DIM\_BTCA\_CABO é capaz de aplicar os critérios de dimensionamento expostos no referencial teórico deste trabalho, retornando a seção mínima exigida para os condutores dos circuitos BT-CA, bem como de

fornecer a queda de tensão percentual referente a ela. Por fim, é possibilitado ao usuário escolher uma seção superior e obter automaticamente sua queda de tensão percentual, a fim de comparar cenários e adotar o valor de seção mais adequado ao seu projeto.

No que diz respeito à construção desses cálculos na tabela em questão, é necessário apontar que foram utilizadas novamente as funções "FC" e "BITOLA" já apresentadas para localizar os fatores de correção pertinentes e a seção mínima necessária em cada cenário de instalação, respectivamente. Novamente, foram montadas estruturas condicionais para aplicar a função "BITOLA" em cada contexto previsto, a depender do tipo de condutor e do método de instalação considerados. Este último é definido a partir do tipo de subestação previsto para a usina, que é localizado na tabela DIM\_SE com a identificação do circuito BT-CA. A Figura 27 apresenta a estrutura condicional citada.

Figura 27 – Fórmula para aplicação da função "BITOLA" no dimensionamento de condutores BT-CA

```
=SEBRO(SI([@INSTALAÇÃO]="1"|[@CONDUTOR]="1")*SE([@CONDUTOR]="ALUMÍNIO";SE([@INSTALAÇÃO]="ÁREA";BITOLA([@COR(A)];DAT_NBR_5410$A56$S4$54);SE([@INSTALAÇÃO]="CUBÍCULO BUNDADO";BITOLA([@COR(A)];DAT_NBR_5410$A56$S4$54);SE([@CONDUTOR]="CBBE";SE([@INSTALAÇÃO]="ÁREA";BITOLA([@COR(A)];DAT_NBR_5410$A56$S4$54);SE([@INSTALAÇÃO]="CUBÍCULO BUNDADO";BITOLA([@COR(A)];DAT_NBR_5410$A56$S4$54))))
```

Fonte: Elaboração própria.

Para implementar o critério de curto-circuito, contudo, foi necessário criar a função personalizada "SCC" para retornar a seção normativa mínima necessária para suportar o nível previsto dessa falha no circuito. Essa função demanda do usuário dois dados: a seção para curto-circuito calculada pela Equação 2.8 e o intervalo no qual a seção normativa correspondente deve ser procurada. O código da função "SCC" é exibido na Figura 28.

Figura 28 – Código VBA da função "SCC"

```
Function SCC(bitola As Double, intervalo As Range)

    nlinhas = intervalo.Rows.Count
    For i = 1 To nlinhas
        If bitola < intervalo(i, 1) Then
            SCC = intervalo(i, 1)
            Exit For
        End If
    Next

End Function
```

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, calculadas as seções mínimas exigidas por cada critério de dimensionamento, a tabela escolhe a maior entre elas através da função "MAIOR", nativa do Excel, e calcula sua queda de tensão percentual correspondente. Nesse ponto, o usuário obtém o valor mínimo de

seção do condutor de fase para que sejam atendidos todos os critérios de dimensionamento exigidos pela NBR 5410 (2004). Contudo, é permitido ao usuário escolher um valor superior de bitola para esse condutor, obtendo automaticamente sua queda de tensão percentual.

Além disso, a tabela DIM\_BTCA\_CABO calcula a seção do condutor de proteção para os circuitos BT-CA que eventualmente o utilizem, aplicando as exigências da NBR 5410 (2004). Para tal, elaborou-se a função personalizada "PE", cujo código é mostrado na Figura 29, que localiza a seção do condutor de proteção a partir do condutor de fase dimensionado para o circuito. Essa função é utilizada dentro de uma estrutura condicional, como mostrado na Figura 30, uma vez que o usuário pode escolher uma bitola diferente daquela calculada como valor mínimo para o condutor de fase, de modo que a garantir que a função "PE" vai receber o valor certo de seção do condutor de fase do circuito. A lógica implementada por essa estrutura verifica se o usuário adotou o valor mínimo de bitola para o condutor de fase, deixando o campo "F mm<sup>2</sup> ESCOLHIDA" vazio, ou se foi definido um valor nesse campo. No primeiro cenário, a função "PE" considera o valor mínimo de seção de fase, e, no segundo cenário, ela considera o valor escolhido pelo usuário.

Figura 29 – Código VBA da função "PE"

```
Function PE(valor As Double, intervalo As Range)

    nlinhas = intervalo.Rows.Count
    For i = 1 To nlinhas
        If valor = intervalo(i, 1) Then
            PE = intervalo(i, 2)
            Exit For
        End If
    Next

End Function
```

Fonte: Elaboração própria.

Figura 30 – Fórmula para aplicação da função "PE" no dimensionamento de condutores de proteção BT-CA

```
=SEERRO(SE([ F mm2 ESCOLHIDA])<>"";PE([ F mm2 | MINIMA]);DAT_NBR_5410[SAR$4:SAS$12];PE([ F mm2 ESCOLHIDA]);DAT_NBR_5410[SAR$4:SAS$12]);""
```

Fonte: Elaboração própria.

Também para esse condutor, é permitido ao usuário escolher uma seção diferente daquela dimensionada automaticamente, visto que os valores resultantes desse processo são os mínimos necessários para atender aos padrões normativos estabelecidos.

### 3.2.4.6 Implementação de fórmulas na tabela DIM\_MTCA\_COND

A tabela DIM\_MTCA\_COND foi construída com a mesma estrutura e os mesmos processos da tabela DIM\_BTCA\_CABO, apresentada no tópico anterior. Contudo, por se tratar do contexto de média tensão, foi necessário realizar duas adaptações para o dimensionamento dos condutores MT-CA: buscar dados no banco referente à norma de média tensão NBR 14039 (2021) e definir o tipo de condutor a partir do modelo de subestação previsto para a usina em desenvolvimento.

A primeira adaptação diz respeito a informações como fatores de correção e capacidades de condução de corrente para os condutores, que foram extraídos do banco de dados da NBR 14039 (2021), norma referente ao contexto de média tensão. A segunda adaptação, por sua vez, consiste em verificar, a partir da identificação da subestação, se ela será do tipo externa em poste ou do tipo cubículo blindado. Para o primeiro caso, o condutor de média tensão é definido pela EDBR 0942 (2021) como sendo um vergalhão de cobre nu com seção de 25 mm<sup>2</sup>, conforme indicado no referencial teórico deste trabalho. No segundo caso, é necessário dimensionar um cabo isolado para o trecho de média tensão, como definido pela mesma norma e também apresentado no capítulo anterior. A estrutura condicional elaborada para implementar essa lógica é apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Estrutura condicional para definição do condutor MT-CA a partir do tipo de subestação previsto

```
=SE(OU([@CIRCUITO]="";[@ID SE]="";[@TIPO DE SE]="");SE([@TIPO DE SE]="CUBÍCULO BLINDADO";SE([@TIPO DE SE]="ÁREA";"3#25 mm² (COBRE NU)";))
```

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, assim como na tabela DIM\_BTCA\_CABO, a tabela DIM\_BTCA\_COND indica o valor da seção mínima exigida pelos critérios de dimensionamento já apresentados para os condutores do trecho de média tensão da instalação, permitindo, ainda, que o usuário escolha uma bitola diferente para o cabo. Para ambos os valores de seção, é calculada a queda de tensão percentual correspondente.

### 3.2.4.7 Implementação de fórmulas na tabela DIM\_MTCA\_BLIND

Conforme explanado no referencial teórico deste trabalho, a especificação de um cabo de média tensão envolve o dimensionamento tanto do condutor quanto da blindagem desse cabo (NBR 14039, 2021). Dessa forma, a tabela DIM\_MTCA\_BLIND foi elaborada para

calcular a seção mínima da blindagem necessária a um condutor de média tensão, aplicando diretamente a Equação 2.11.

Vale ressaltar que foi estabelecido como critério de projeto a seção mínima da blindagem em 6 mm<sup>2</sup>. Dessa forma, a tabela em questão calcula a bitola mínima exata para a blindagem e, através de uma estrutura condicional, verifica qual o valor normativo é imediatamente superior ao calculado pela Equação 2.11. Essa estrutura é mostrada na Figura 32.

Figura 32 – Estrutura condicional para definição da seção mínima da blindagem do condutor MT-CA



Fonte: Elaboração própria.

#### 3.2.4.8 Implementação de fórmulas na tabela DIM\_UFV\_ELET

Na planilha de dimensionamentos em questão, a especificação dos eletrodutos a serem utilizados em cada trecho da instalação é feita pela tabela DIM\_UFV\_ELET através da aplicação direta da Equação 2.12. Para realizar esse dimensionamento seguindo os critérios expostos no referencial teórico deste trabalho, o usuário deve informar o tipo de trecho, as seções dos cabos a serem acomodados e suas respectivas quantidades, além do diâmetro nominal do eletroduto que se pretende utilizar.

A identificação do tipo de trecho visa organizar os resultados, relacionando cada trecho ao eletroduto que nele deve ser instalado. Os demais dados mencionados são aplicados diretamente na Equação 2.12, implementada no campo "OCUPAÇÃO (%)". Com essa estrutura, a tabela DIM\_UFV\_ELET permite ao usuário obter, para cada diâmetro nominal de eletroduto informado, a taxa de ocupação correspondente de forma automática, e verificar se ela atende aos limites normativos.

#### 3.2.4.9 Implementação de fórmulas na tabela DIM\_BTCA\_PROT

A tabela DIM\_BTCA\_PROT tem como função especificar os equipamentos de proteção dos circuitos de baixa tensão da instalação, ou seja, os circuitos compreendidos entre inversor e QGBT e entre QGBT e lado BT do transformador.

Essa tabela tem como dados de entrada apenas a identificação do circuito cuja proteção deseja-se dimensionar, pois, a partir dessas entradas, as demais células são capazes de localizar as características elétricas necessárias ao dimensionamento da proteção do circuito:

tensão de operação, corrente de projeto e corrente de curto-circuito. Uma vez obtidas essas informações, a tabela DIM\_BTCA\_PROT é capaz de definir o equipamento de proteção adequado para um determinado circuito, bem como de indicar suas especificações.

Quanto à obtenção da tensão de operação do circuito, vale ressaltar que, conforme mencionado no referencial teórico deste trabalho, os circuitos BT da instalação devem ter o mesmo nível de tensão. Dessa forma, o valor de tensão de operação considerado para esses circuitos é aquele informado na tabela DAT\_UFV\_BASE como nível de baixa tensão trifásica, localizado em sua tabela de origem através de referência direta.

A obtenção das demais características elétricas dos circuitos BT-CA, que seriam a corrente de projeto e a corrente de curto-circuito, demandou o uso das funções personalizadas "IPROJ" e "ICSBT", respectivamente. A função "IPROJ", cujo código em VBA é mostrado na Figura 33, recebe como parâmetros os dados de identificação do circuito, o número de condutores em paralelo por fase, a corrente de projeto do circuito e o intervalo em que essas informações são encontradas (tabela DIM\_BTCA\_CABO). A partir dessas informações, a referida função localiza o circuito e calcula sua corrente de projeto através da Equação 3.6, retornando esse resultado ao usuário. Esse cálculo é necessário em virtude da possibilidade do usuário prever mais de um condutor por fase, o que resulta em uma corrente de projeto dividida pelos condutores em paralelo para o dimensionamento de cabos. Por outro lado, para os equipamentos de proteção, deve ser considerada a corrente de projeto total do circuito.

Figura 33 – Código VBA da função "IPROJ"

```
Function IPROJ(circuito As String, ID As String, ncond As Double, corrente As Double) As Double
    nlinhas = intervalo.Rows.Count
    For i = 1 To nlinhas
        If circuito = intervalo(i, 1) And ID = intervalo(i, 2) Then
            IPROJ = ncond * corrente
            Exit For
        End If
    Next
End Function
```

Fonte: Elaboração própria.

$$I_{projTOTAL} = N_{condutores/fase} \times I_{projCONDUTOR} \quad (3.6)$$

Onde:

$I_{proj_{PROT}}$  – Corrente de projeto total do circuito, em A;

$I_{proj_{CABO}}$  – Corrente de projeto por condutor em paralelo por fase, em A.

A função "ICSBT", por sua vez, é responsável por identificar o circuito e localizar sua corrente de curto-circuito. Seus parâmetros de entrada são os identificadores do trecho e o intervalo onde essas informações se encontram, isto é, o intervalo que compreende a tabela DIM\_BTCA\_CABO, origem desses dados. O código VBA dessa função pode ser visto na Figura 34.

Figura 34 – Código VBA da função "ICSBT"

```
Function ICSBT(circuito As String, ID As String, intervalo As Range)

    nlinhas = intervalo.Rows.Count
    For i = 1 To nlinhas
        If circuito = intervalo(i, 1) And ID = intervalo(i, 2) Then
            ICSBT = intervalo(i, 17)
            Exit For
        End If
    Next

End Function
```

Fonte: Elaboração própria.

Uma vez obtidas as características elétricas do circuito, a tabela DIM\_BTCA\_PROT define que tipo de equipamento de proteção deve ser utilizado, indicando automaticamente suas especificações adequadas (corrente e tensão nominais e capacidade de interrupção). Para tomar essa decisão, a tabela avalia, no campo "EQUIPAMENTO", o tipo de circuito em questão e o nível da sua tensão de operação. No caso dos circuitos compreendidos entre os inversores e o QGBT, a tabela determina que, para tensão de operação inferior a 800 V, deve-se utilizar disjuntor de caixa moldada e, para tensões iguais ou maiores que 800 V, deve-se prever o uso de chave fusível na proteção do circuito. No caso de circuitos situados entre o QGBT e o lado BT do transformador, a tabela prevê o uso de disjuntor de caixa aberta. Essa lógica fundamenta-se nos conceitos expostos no referencial teórico deste trabalho e sua implementação pode-se ser vista na Figura 35. Vale ressaltar que o limite de 800 V definido para a tomada de decisão explanada anteriormente justifica-se como um requisito de projeto.

Figura 35 – Estrutura condicional para definição da proteção de circuitos BT-CA

```
=SE(OU([@CIRCUITO]="";[@ID_CIRCUITO]]="";[@Vop (V)]="";SE(E([@CIRCUITO]="INVERSOR-QGBT";[@Vop (V)]<800;"DISJUNTOR CAIXA MOLDADA";SE(E([@CIRCUITO]="INVERSOR-QGBT";[@Vop (V)]>=800;"CHAVE FUSIVEL";SE([@CIRCUITO]="QGBT-TRAFO";"DISJUNTOR CAIXA ABERTA";""))
```

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, caso o circuito seja compreendido entre o QGBT e o lado BT do trafo,

a tabela DIM\_BTCA\_PROT indicará as especificações do DPS a ser utilizado nesse circuito. Para tal, foram desenvolvidas as funções "PARAM" e "UP". A função "PARAM", utilizada na obtenção dos dados de máxima tensão de operação contínua, corrente nominal, corrente máxima de descarga e nível de proteção, é capaz de retornar os valores comerciais imediatamente superiores àqueles calculados conforme o exposto no referencial teórico deste trabalho, uma vez que ela recebe como dados de entrada o valor calculado e o intervalo onde o valor comercial deve ser procurado. Esse intervalo de busca, vale ressaltar, é a região da tabela DAT\_FAB\_MAT que reúne as especificações de modelos comerciais de DPS. A Figura 36 apresenta o código VBA da função "PARAM".

Figura 36 – Código VBA da função "PARAM"

```
Function PARAM(parametro As Double, intervalo As Range)

    nlinhas = intervalo.Rows.Count
    For i = 1 To nlinhas
        If parametro <= intervalo(i, 1) Then
            PARAM = intervalo(i, 1)
            Exit For
        End If
    Next

End Function
```

Fonte: Elaboração própria.

A função "UP", por sua vez, é responsável por especificar o nível de proteção necessário do DPS em dimensionamento a partir das suas outras especificações já mencionadas, que são os parâmetros de entrada dessa função juntamente com o intervalo que reúne essa informações na tabela DAT\_FAB\_MAT. O código VBA dessa função é mostrado na Figura 37.

Figura 37 – Código VBA da função "UP"

```
Function UP(uc As Double, inom As Double, imax As Double, intervalo As Range)

    nlinhas = intervalo.Rows.Count
    For i = 1 To nlinhas
        If uc = intervalo(i, 1) And inom = intervalo(i, 2) And imax = intervalo(i, 3) Then
            UP = intervalo(i, 4)
            Exit For
        End If
    Next

End Function
```

Fonte: Elaboração própria.

### 3.2.4.10 Implementação de fórmulas na tabela DIM\_MTCA\_PROT

A tabela DIM\_MTCA\_PROT é responsável pelo dimensionamento dos equipamentos de proteção de circuitos de média tensão, o que se dá automaticamente a partir da identificação destes.

Vale ressaltar que, conforme apontado no referencial teórico deste trabalho, considerou-se como requisito de projeto a elaboração do cubículo blindado por parte de um fabricante especializado. Assim, a tabela em questão indicará as especificações dos equipamentos de proteção MT-CA apenas para as subestações do tipo externa em poste. Portanto, a partir da identificação do circuito, a tabela DIM\_MTCA\_PROT localiza o tipo de subestação previsto e indica "PROJETO EXTERNO", no caso de subestações do tipo cubículo blindado. Já para subestação do tipo externa em poste, a tabela localiza automaticamente a corrente de projeto do circuito e, a partir dela, define as especificações dos dispositivos de proteção mencionados no capítulo anterior.

Para tal, utilizou-se novamente a função "IPROJ" para retornar a corrente de projeto do circuito e criou-se a função "ELO" para determinar a corrente nominal do elo fusível a ser instalado. Tendo o seu código VBA exibido na Figura 38, a função "ELO" retorna o valor comercial de corrente do referido dispositivo que for imediatamente superior ao valor da corrente de projeto do circuito.

Figura 38 – Código VBA da função "ELO"

```
Function ELO(valor As Double, intervalo As Range)

    nlinhas = intervalo.Rows.Count
    For i = 1 To nlinhas
        If valor < intervalo(i, 2) Then
            ELO = intervalo(i, 1)
            Exit For
        End If
    Next
End Function
```

Fonte: Elaboração própria.

Além disso, a tabela indica as classes de tensão desse elo fusível e do para-raio que devem ser previstos, o que é determinado pela EDBR 0942 (2021), conforme apontado no referencial teórico.

### **3.3 Sistema de teste da planilha de dimensionamento**

#### ***3.3.1 Motivação e estratégia***

Considerando os objetivos gerais e específicos da ferramenta em análise, expostos na introdução deste trabalho, é necessário verificar se o sistema elaborado é realmente capaz de realizar dimensionamentos precisos e seguros em um intervalo de tempo significativamente reduzido, em comparação com métodos menos otimizados.

Dito isto, deve-se realizar um teste comparativo no qual é realizado o dimensionamento dos equipamentos de uma usina fotovoltaica tanto através da ferramenta desenvolvida quanto de forma manual, fornecendo dois cenários para análise. Em cada cenário, deve ser monitorado o tempo demandado para a obtenção de resultados, que servirá de parâmetro para determinar se a planilha cumpre o seu objetivo acelerar a realização dos processos de dimensionamento expostos neste trabalho.

Para realizar o teste descrito, será considerado o caso de uma usina fotovoltaica de minigeração distribuída cujos dados de referência serão reunidos na Tabela 6.

#### ***3.3.2 Avaliação de desempenho***

O desempenho da planilha de dimensionamento será avaliado através de dois critérios: precisão dos resultados e tempo demandado para obtê-los. Ressalta-se que, para atestar a precisão desses resultados, serão consultadas as normas mencionadas em capítulos anteriores, referências principais na elaboração de instalações elétricas, conforme apontado no referencial teórico deste trabalho. No que diz respeito ao critério de tempo demandado, será considerado significativo o ganho de tempo maior ou igual a 30% em comparação com o tempo necessário para dimensionar os equipamentos através de meios manuais.

Tabela 6 – Dados de referência para teste de dimensionamento de usina fotovoltaica de minigeração distribuída

Dado	Valor de referência
Nível de baixa tensão do sistema	800 V
Nível de média tensão do sistema	13.800 V
Potência pico total na usina	1.026 kWp
Número de inversores	3 unidades
Potência do inversor	250 kW
Tensão CC máxima admitida pelo inversor	1.500 V
Tensão de linha na saída CA do inversor	800 V
Sobrecarga máxima admitida no inversor	40%
Número de módulos	1.800 unidades
Potência pico por módulo	570 Wp
Corrente de curto-circuito do módulo	15,93 A
Tensão de circuito aberto do módulo	45,70 V
Tensão de operação do módulo	38,40 V
Potência de transformação	1.000 kVA
Fator de potência para toda a instalação	1
Tamanho padrão para circuitos CC	57 m
Tamanho padrão para circuitos CA - Trecho INVERSOR-QGBT	15 m
Tamanho padrão para circuito CA - Trecho QGBT-TRAFO (BT)	10 m
Tamanho padrão para circuito CA - Trecho TRAFO (MT)-PONTO DE ENTREGA	30 m
Nível de curto-circuito trifásico simétrico - Trecho INVERSOR-QGBT	5 kA
Duração de curto-circuito trifásico simétrico - Trecho INVERSOR-QGBT	0,14 s
Nível de curto-circuito trifásico simétrico - Trecho QGBT-TRAFO (BT)	7 kA
Duração de curto-circuito trifásico simétrico - Trecho QGBT-TRAFO (BT)	0,14 s
Nível de curto-circuito trifásico simétrico - Trecho TRAFO (MT)-PONTO DE ENTREGA	10 kA
Duração de curto-circuito trifásico simétrico - Trecho TRAFO (MT)-PONTO DE ENTREGA	0,14 s

Fonte: Elaboração própria.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Conforme apresentado no capítulo anterior, a planilha de dimensionamentos foi submetida a um teste de desempenho para verificar sua capacidade de entregar resultados precisos a um custo de tempo significativamente menor que os métodos menos otimizados. Para tal, considerou-se o caso de uma usina fotovoltaica de minigeração, cujos dados de referência foram expostos na Tabela 6.

Foram propostos dois cenários de realização do teste. No primeiro deles, utilizou-se o ambiente de tabelas do Excel, mas os cálculos foram estruturados durante o teste e as tomadas de decisão deram-se manualmente a partir da consulta às normas pertinentes à medida em que foram necessárias. No segundo cenário, o processo de dimensionamento foi realizado através da planilha desenvolvida. Em ambas as situações, o tempo demandando para a realização completa do processo, tomado em minutos, foi cronometrado.

A Tabela 7 reúne os resultados obtidos nos dois cenários propostos para o teste da planilha de dimensionamentos.

Tabela 7 – Especificações obtidas para os componentes elétricos da usina fotovoltaica proposta para o teste da planilha de dimensionamentos

Componente	Especificação no cenário 1	Especificação no cenário 2
Cabo BT-CC	6 mm <sup>2</sup>	6 mm <sup>2</sup>
Cabo BT-CA (circuitos INVERSOR-QGBT)	300 mm <sup>2</sup> (fase) e 150 mm <sup>2</sup> (proteção)	300 mm <sup>2</sup> (fase) e 150 mm <sup>2</sup> (proteção)
Cabo BT-CA (circuito QGBT-TRAFO)	300 mm <sup>2</sup> (4 cabos por fase) e 150 mm <sup>2</sup> (3 condutores no neutro)	300 mm <sup>2</sup> (4 cabos por fase) e 150 mm <sup>2</sup> (3 condutores no neutro)
Cabo MT-CA	25 mm <sup>2</sup>	25 mm <sup>2</sup>
Eletroduto (circuitos CC)	DN40	DN40
Eletroduto (circuitos BT-CA)	DN110	DN110
Eletroduto (circuitos MT-CA)	DN63	DN63
Proteção BT-CA (circuitos INVERSOR-QGBT)		
Proteção BT-CA (circuito QGBT-TRAFO)		
Proteção MT-CA	Cubículo blindado	Cubículo blindado

Fonte: Elaboração própria.

No que diz respeito à precisão dos dimensionamentos realizados, verificou-se que ambos os métodos encontraram as mesmas especificações, devidamente adequadas às exigências normativas, expostas no referencial teórico, e compatíveis com a disponibilidade comercial

representada no banco de dados correspondente, mencionado na metodologia deste trabalho.

Quanto ao critério de tempo demandado, através da Equação 4.1 e dos dados da Tabela 8, pode-se calcular um ganho de tempo, denotado por  $G_{\%}$  de 90% no segundo cenário de teste em comparação com o primeiro, resultado acima do estabelecido anteriormente como ganho mínimo esperado.

$$G_{\%} = \left(1 - \frac{t_{auto}}{t_{manual}}\right) \times 100\% \quad (4.1)$$

Onde:

$t_{auto}$  – Tempo demandado para realizar os dimensionamentos automaticamente, usando a ferramenta em teste, em minutos;

$t_{manual}$  – Tempo demandado para realizar os dimensionamentos manualmente, em minutos.

Tabela 8 – Tempo demandado para a realização de dimensionamentos nos cenários de teste propostos

Cenário	Tempo demandado para dimensionamento
1 (método manual)	aproximadamente 125 minutos
2 (com a planilha de dimensionamentos)	aproximadamente 12 minutos

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, pode-se concluir que a planilha de dimensionamentos foi capaz de retornar os mesmos resultados encontrados manualmente, devidamente adequados às normas e à disponibilidade comercial dos equipamentos, mas com um significativo ganho de tempo em relação a um método menos otimizado. Assim, pode-se afirmar que a ferramenta desenvolvida cumpre com os seus objetivos gerais e específicos, apresentados na introdução deste trabalho, mostrando-se um recurso útil para projetistas de instalações elétricas de usinas fotovoltaicas de minigeração distribuída.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foi explorada a possibilidade de otimizar o processo de dimensionamento dos componentes elétricos de uma usina fotovoltaica de minigeração distribuída por meio do uso de uma planilha desenvolvida em Excel, capaz de realizar cálculos e tomar decisões inerentes a esse processo à medida que o usuário fornece os dados necessários em cada etapa, obtendo resultados que atendem às exigências oriundas de normas e outras fontes em um tempo significativamente menor do que o demandado por métodos menos otimizados. Dessa forma, é possibilitado ao projetista da instalação fazer análises mais detalhadas e explorar mais cenários de execução, direcionando seus esforços à busca por soluções melhores para o sistema elétrico em desenvolvimento.

Para implementar tal ferramenta, utilizou-se tanto de funções nativas do Excel quanto de comandos desenvolvidos para aplicações específicas dentro do processo de dimensionamento apresentado, o que realizou-se através do recurso de funções personalizadas do ambiente VBA no mesmo *software*. Essas funções foram utilizadas para implementar os cálculos e as tomadas de decisão expostos no referencial teórico deste trabalho, alocadas em tabelas responsáveis por realizar etapas específicas do processo de dimensionamento. Essas tabelas foram interligadas por referência simples de maneira estratégica, reproduzindo as já explanadas relações existentes entre as informações e as etapas inerentes ao dimensionamento da instalação em questão, de modo a automatizar o preenchimento de campos e conseqüentemente os cálculos e as tomadas de decisão. Assim, é exigido um reduzido esforço de fornecimento de dados por parte do usuário, evitando problemas como campos preenchidos erroneamente e requisitos de projeto não aplicados.

A fim de verificar a efetividade da planilha desenvolvida na otimização do processo de dimensionamento citado, realizou-se um teste comparativo no qual foram especificados os mesmos componentes elétricos tanto de forma manual (cenário 1) quanto com o uso da ferramenta em questão (cenário 2). O tempo demandando para a realização do dimensionamento completo da instalação em cada um dos cenários propostos foi mostrado na Tabela 8, e um ganho de tempo foi calculado em 90% pela Equação 4.1. Tendo em vista que esse ganho é superior ao mínimo estabelecido de 30%, entende-se que a ferramenta em discussão cumpre com o seu objetivo de reduzir significativamente o tempo demandando para dimensionar completamente a instalação elétrica de uma usina fotovoltaica de minigeração distribuída.

Vale ressaltar, entretanto, que, em relação à confiabilidade do teste realizado, infelizmente não foi possível adotar uma estratégia mais imparcial, ou seja, com a participação de

usuários distintos, a fim de obter uma maior variabilidade de resultados e possibilitar uma análise mais rigorosa da efetividade da solução tema deste trabalho. Ainda assim, é possível verificar o ganho de produtividade proporcionado pelo uso da planilha de dimensionamentos na rotina de elaboração de projetos das usinas fotovoltaicas, permitindo um maior investimento de tempo em análise e discussão dos resultados obtidos, além da exploração de diversos cenários de execução distintos em um curto espaço de tempo.

## **5.1 Trabalhos futuros**

Conforme explanado anteriormente, a planilha de dimensionamentos desenvolvida é capaz de executar as etapas do que foi estabelecido como processo básico de especificação dos componentes elétricos de uma usina fotovoltaica de minigeração distribuída. Para tal fim, construiu-se um sistema formado por funções e bancos de dados que, coordenados entre si, otimizam os cálculos e as tomadas de decisão inerentes ao processo supracitado.

Dessa forma, partindo da ferramenta resultante deste trabalho, pode-se aprimorar esse sistema adicionando a ele novas funções e expandindo o seu banco de dados, de modo a estender o seu uso para arranjos diferentes daquele estabelecido como critério de projeto no presente contexto. É possível, ainda, explorar o desenvolvimento de listas de materiais automáticas, cujos itens e suas respectivas quantidades são gerados à medida em que os componentes da instalação são especificados.

Por fim, a própria estratégia de otimização apresentada na metodologia deste trabalho, baseada em determinar as etapas de um processo e mapear as relações entre elas para localizar o que pode ser automatizado, pode ser aplicada para desenvolver ferramentas similares voltadas a projetos de outros tipos, como de instalações elétricas prediais, subestações de média tensão mais complexas e mesmo subestações de alta tensão.

## REFERÊNCIAS

- A CABINE. *Chave Seccionadora Tripolar*. 2024. Disponível em: <<https://www.acabine.com.br/chave-seccionadora-tripolar>>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- A CABINE. *TRANSFORMADORES*. 2024. Disponível em: <<https://www.acabine.com.br/transformadores>>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- ABB. **IEC indoor SF6 gas circuit breaker HD4/R**. 2024. Disponível em: <https://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/circuit-breakers/indoor-CB/iec-secondary-gas-cb-hd4-r>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- ABB. **Inline II – ZLBM/ ZHBM – Seccionadora fusível vertical**. 2024. Disponível em: <https://new.abb.com/low-voltage/pt/produtos/fusiveis/InLine-ii>. Acesso em: 03 mar. 2024.
- ABSOLAR. **Energia solar deve crescer 9,3 GW no Brasil em 2024, alta de 26** Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/reuters/2023/12/05/energia-solar-deve-crescer-93-gw-no-brasil-em-2024-alta-de-26-ante-2023-preve-absolar.htm>. Acesso em: 08 fev. 2024.
- ABSOLAR. **Energia solar em 2023: Expectativas para o segmento**. 2023. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/especial-publicitario/top-sun/top-sun-energia-solar/noticia/2023/03/24/energia-solar-em-2023-expectativas-para-o-segmento.ghtml>>. Acesso em: 16 jan. 2024.
- ANEEL. **Em crescimento, energia solar vai a 15,9** Disponível em: <<https://www.metropoles.com/negocios/em-crescimento-energia-solar-vai-a-159-da-matriz-eletrica-do-brasil>>. Acesso em: 16 jan. 2024.
- ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída**. 2023. Disponível em: <[https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida#:~:text=J%C3%A1%20minigera%C3%A7%C3%A3o%20distribu%C3%ADa%20%C3%A9%20aquela,Lei%20n%C2%BA%2014.300%2F2022](https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida#:~:text=J%C3%A1%20minigera%C3%A7%C3%A3o%20distribu%C3%ADa%20%C3%A9%20aquela,Lei%20n%C2%BA%2014.300%2F2022).>)>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM280**: Condutores de cabos isolados. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16690**: Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos — requisitos de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16612**: Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura, para tensão de até 1,8 kv c.c. entre condutores — requisitos de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14039**: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kv a 36,2 kv. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- CANAL SOLAR. **Inversor solar, o que é e para que serve?** 2022. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/inversor-solar-o-que-e-e-pra-que-serve/>. Acesso em: 12 fev. 2024.

CHINT. **NA8 Disjuntor em Caixa Aberta**. 2024. Disponível em: <https://chintglobal.com.br/products/na8-disjuntor-em-caixa-aberta-589-1115>. Acesso em: 03 mar. 2024.

CLAMPER. **Clamper-front - CLAMPER**. 2024. Disponível em: <https://encurtador.com.br/dWtrn>. Acesso em: 05 mai. 2024.

COBRECOM. **Cabo de Cobre Nu TMD 25,00 mm<sup>2</sup>**. 2024. Disponível em: <https://cobrecom.com.br/detalhe-produto/cabo-de-cobre-nu-tmd-2500-mm>. Acesso em: 02 mar. 2024.

COBRECOM. **SOLARCOM 0,6/1 kV (CA) ou 1,8 kV (CC)**. 2024. Disponível em: <https://cobrecom.com.br/produto/solarcom-061-kv-ca-ou-18-kv-cc>. Acesso em: 02 mar. 2024.

COBREMACK. **CABO MACKMÉDIA TENSÃO XLPE 90°C**. 2024. Disponível em: <https://www.cobremack.com.br/cabo/cabo-mackmedia-tensao-xlpe-90c/>. Acesso em: 02 mar. 2024.

ENEL. **Normas técnicas**. 2016. Disponível em: <https://www.eneldistribuicao.com.br/ce/normastecnicas.aspx>. Acesso em: 08 fev. 2024.

ENEL. **EDCE 0122**: Conexão de micro e minigeração distribuída ao sistema elétrico da enel distribuição ceará / enel distribuição goiás / enel distribuição rio. Rio de Janeiro: ENEL, 2018.

ENEL. **EDBR 0942**: Fornecimento de energia elétrica em tensão primária de distribuição até 34,5 kv. Rio de Janeiro: ENEL, 2021.

FAM ENGENHARIA. **Como escolher seu Dispositivo de Proteção contra Surto – DPS**. 2018. Disponível em: <https://engfam.com.br/como-escolher-seu-dispositivo-de-protECAO-contrA-surto-dps/>. Acesso em: 05 mai. 2024.

GAZQUEZ PAINÉIS ELÉTRICOS. **Cabine Blindada Convencional**. 2024. Disponível em: <https://www.gazquez.com.br/cabine-convencional-gazquez>. Acesso em: 09 mar. 2024.

HILTON MORENO. **Cabos elétricos para instalações fotovoltaicas**. São Paulo: IFC/COBRECOM, 2019.

IEC. **IEC60664-1**: Insulation coordination for equipment within low-voltage supply systems - part 1: Principles, requirements and tests. Rio de Janeiro: International Electrotechnical Commission, 2020.

INSOL. **Geração Centralizada x Geração Distribuída**. 2021. Disponível em: <https://insolenergia.com.br/blog/geracao-centralizada-x-geracao-distribuida->. Acesso em: 07 fev. 2024.

INTELLI. **ICALI-XP - CONDUTORES DE ALUMÍNIO ISOLADOS COM XLPE/PVC**. 2024. Disponível em: <https://www.intelli.com.br/produtos/condutores-de-aluminio/aluminio-isolado-xlpepvc/icalixp-condutores-isolados-com-xlpepvc>. Acesso em: 02 mar. 2024.

JOÃO MAMEDE FILHO. **Instalações elétricas industriais**. Rio de Janeiro: LTC, 2023.

KV LUX. **Chave Fusível**. 2024. Disponível em: <https://www.kvlux.com.br/chave-fusivel.html>. Acesso em: 04 mar. 2024.

MONTER. **Quadro geral de baixa tensão**. 2024. Disponível em: <https://www.montereletrica.com.br/quadro-geral-baixa-tensao#:~:text=Um%20quadro%20geral%20de%20baixa,primeiro%20quadro%20ap%C3%B3s%20a%20subesta%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 03 mar. 2024.

OLIVEIRA, T. E. A. D. **Projeto de minigeração distribuída conectada à rede elétrica voltada ao autoconsumo remoto**. Monografia (TCC) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2022.

PEXTRON. **URP 6000 Relé multifunção com sincronismo e salto vetorial (frente de painel - extraível)**. 2024. Disponível em: <https://www.pextron.com/index.php/pt-br/solucoes-01/coluna-2/pchs-01/itemlist/user/2-marcelogrinevicius?start=10>. Acesso em: 11 mar. 2024.

PORTAL SOLAR. **Painel solar: o que é, como funciona e tipos**. 2024. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/painel-solar>. Acesso em: 12 fev. 2024.

PORTAL SOLAR. **Usina solar: o que é, tipos, como funciona, vantagens e desvantagens**. 2024. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/usina-solar.html>. Acesso em: 12 fev. 2024.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. **Um Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK)**. Newtown Square: PMI, 2017.

PRYSMIAN GROUP. **Guia de dimensionamento de cabos para Média Tensão**. São Paulo: PRYSMIAN GROUP, 2022.

SCARABELOT, L. T.; RAMPINELLI, G. A.; RAMBO, C. R. Otimização do desempenho de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída a partir do sobredimensionamento do inversor. Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2020.

SILVA, K. D. M. e. **Projeto de minigeração distribuída solar fotovoltaica de 3 MW para o Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará**. Monografia (TCC) – Universidade Federal do Ceará, 2016.

TECHDUTO. **TUBO CORRUGADO EM PEAD**. 2024. Disponível em: <https://www.techduto.com.br/produto/tubo-corrugado-em-pead/>. Acesso em: 03 mar. 2024.

VALOR ECONÔMICO. **Crescimento de usinas solares confirma cenário de transição energética**. 2024. Disponível em: <https://valor.globo.com/patrocinado/reenergisa/noticia/2022/05/05/crescimento-de-usinas-solares-confirma-cenario-de-transicao-energetica.ghtml>. Acesso em: 17 mar. 2024.

WEG. **Disjuntores em Caixa Moldada DWP**. 2024. Disponível em: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Control-Industrial/Controls/Prote%C3%A7%C3%A3o-de-Circuitos-El%C3%A9tricos/Disjuntores/Caixa-Moldada/Disjuntores-em-Caixa-Moldada-DWP/Disjuntores-em-Caixa-Moldada-DWP/p/MKT\\_WDC\\_BRAZIL\\_MOLDED\\_CASE\\_CIRCUIT\\_BREAKERS\\_DWP](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Control-Industrial/Controls/Prote%C3%A7%C3%A3o-de-Circuitos-El%C3%A9tricos/Disjuntores/Caixa-Moldada/Disjuntores-em-Caixa-Moldada-DWP/Disjuntores-em-Caixa-Moldada-DWP/p/MKT_WDC_BRAZIL_MOLDED_CASE_CIRCUIT_BREAKERS_DWP). Acesso em: 20 abr. 2024.

WEG. **Transformador Óleo 1000.0kVA 13.8/0.22kV CST ONAN**. 2024. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%93leo/Transformadores-de-Distribui%C3%A7%C3%A3o-a-%C3%93leo/301-a-3-000-kVA/Transformador-%C3%93leo-1000-0kVA-13-8-0-22kV-CST-ONAN/p/14114181>. Acesso em: 02 mar. 2024.

**APÊNDICE A – TABELAS NORMATIVAS REPRODUZIDAS NO BANCO DE DADOS DA PLANILHA DE DIMENSIONAMENTOS**

Figura 39 – Tabela C.9: Capacidade de condução de corrente para, temperatura no condutor em regime permanente de 90 °C

Seção mm <sup>2</sup>	Capacidade de condução de corrente A		
	20 °C	30 °C	40 °C
1,5	22	20	19
2,5	29	27	24
4	37	34	31
6	46	42	39
10	62	58	53
16	79	74	67
25	102	94	86
35	124	115	105
50	151	140	128
70	186	172	157
95	217	201	183
120	250	232	212
150	287	266	243
185	321	297	271
240	380	352	321
300	429	397	362
400	503	466	425

Fonte: NBR 16612 (2020).

Figura 40 – Tabela 40: Fatores de correção para Temperaturas ambientes diferentes de 30°C para linhas não-subterrâneas e de 20°C (temperatura do solo) para linhas subterrâneas

Temperatura °C	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE
Ambiente		
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91
45	0,79	0,87
50	0,71	0,82
55	0,61	0,76
60	0,50	0,71
65	–	0,65
70	–	0,58
75	–	0,50
80	–	0,41
Do solo		
10	1,10	1,07
15	1,05	1,04
25	0,95	0,96
30	0,89	0,93
35	0,84	0,89
40	0,77	0,85
45	0,71	0,80
50	0,63	0,76
55	0,55	0,71
60	0,45	0,65
65	–	0,60
70	–	0,53
75	–	0,46
80	–	0,38

Fonte: NBR 5410 (2004).

Figura 41 – Tabela 42: Fatores de correção aplicáveis a condutores agrupados em feixe (em linhas abertas ou fechadas) e a condutores agrupados num mesmo plano, em camada única

Ref.	Forma de agrupamento dos condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares												Tabelas dos métodos de referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19	≥20	
1	Em feixe: ao ar livre ou sobre superfície; embutidos; em conduto fechado	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	36 a 39 (métodos A a F)
2	Camada única sobre parede, piso, ou em bandeja não perfurada ou prateleira	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70				36 e 37 (método C)
3	Camada única no teto	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61				
4	Camada única em bandeja perfurada	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				38 e 39 (métodos E e F)
5	Camada única sobre leito, suporte etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78				

Fonte: NBR 5410 (2004).

Figura 42 – Tabela 45: Fatores de agrupamento para linhas em eletrodutos enterrados

Cabos multipolares em eletrodutos – Um cabo por eletroduto				
Número de circuitos	Espaçamento entre eletrodutos (a)			
	Nulo	0,25 m	0,5 m	1,0 m
2	0,85	0,90	0,95	0,95
3	0,75	0,85	0,90	0,95
4	0,70	0,80	0,85	0,90
5	0,65	0,80	0,85	0,90
6	0,60	0,80	0,80	0,80
Condutores isolados ou cabos unipolares em eletrodutos <sup>2)</sup> – Um condutor por eletroduto				
Número de circuitos (grupos de dois ou três condutores)	Espaçamento entre eletrodutos (a)			
	Nulo	0,25 m	0,5 m	1,0 m
2	0,80	0,90	0,90	0,95
3	0,70	0,80	0,85	0,90
4	0,65	0,75	0,80	0,90
5	0,60	0,70	0,80	0,90
6	0,60	0,70	0,80	0,90

Fonte: NBR 5410 (2004).

Figura 43 – Tabela 37: Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D

Seções nominais mm <sup>2</sup>	Métodos de referência indicados na tabela 33											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	10	9	10	9	12	10	11	10	12	11	14	12
0,75	12	11	12	11	15	13	15	13	16	14	18	15
1	15	13	14	13	18	16	17	15	19	17	21	17
1,5	19	17	18,5	16,5	23	20	22	19,5	24	22	26	22
2,5	26	23	25	22	31	28	30	26	33	30	34	29
4	35	31	33	30	42	37	40	35	45	40	44	37
6	45	40	42	38	54	48	51	44	58	52	56	46
10	61	54	57	51	75	66	69	60	80	71	73	61
16	81	73	76	68	100	88	91	80	107	96	95	79
25	106	95	99	89	133	117	119	105	138	119	121	101
35	131	117	121	109	164	144	146	128	171	147	146	122
50	158	141	145	130	198	175	175	154	209	179	173	144
70	200	179	183	164	253	222	221	194	269	229	213	178
95	241	216	220	197	306	269	265	233	328	278	252	211
120	278	249	253	227	354	312	305	268	382	322	287	240
150	318	285	290	259	407	358	349	307	441	371	324	271
185	362	324	329	295	464	408	395	348	506	424	363	304
240	424	380	386	346	546	481	462	407	599	500	419	351
300	486	435	442	396	628	553	529	465	693	576	474	396
400	579	519	527	472	751	661	628	552	835	692	555	464
500	664	595	604	541	864	760	718	631	966	797	627	525
630	765	685	696	623	998	879	825	725	1 122	923	711	596
800	885	792	805	721	1 158	1 020	952	837	1 311	1 074	811	679
1 000	1 014	908	923	826	1 332	1 173	1 088	957	1 515	1 237	916	767
Alumínio												
16	64	58	60	55	79	71	72	64	84	76	73	61
25	84	76	78	71	105	93	94	84	101	90	93	78
35	103	94	96	87	130	116	115	103	126	112	112	94
50	125	113	115	104	157	140	138	124	154	136	132	112
70	158	142	145	131	200	179	175	156	198	174	163	138
95	191	171	175	157	242	217	210	188	241	211	193	164
120	220	197	201	180	281	251	242	216	280	245	220	186
150	253	226	230	206	323	289	277	248	324	283	249	210
185	288	256	262	233	368	330	314	281	371	323	279	236
240	338	300	307	273	433	389	368	329	439	382	322	272
300	387	344	352	313	499	447	421	377	508	440	364	308
400	462	409	421	372	597	536	500	448	612	529	426	361
500	530	468	483	426	687	617	573	513	707	610	482	408
630	611	538	556	490	794	714	658	590	821	707	547	464
800	708	622	644	566	922	830	760	682	958	824	624	529
1 000	812	712	739	648	1 061	955	870	780	1 108	950	706	598

Fonte: NBR 5410 (2004).

Figura 44 – Tabela 39: Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência E, F e G

Seções nominais dos condutores mm <sup>2</sup>	Métodos de referência indicados na tabela 33						
	Cabos multipolares			Cabos unipolares <sup>1)</sup>			
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados	Dois condutores carregados, justapostos	Três condutores carregados, em trifólio	Três condutores carregados, no mesmo plano		
					Justapostos	Espaçados	
	Método E	Método E	Método F	Método F		Método F	Método G Horizontal
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
<b>Cobre</b>							
0,5	13	12	13	10	10	15	12
0,75	17	15	17	13	14	19	16
1	21	18	21	16	17	23	19
1,5	26	23	27	21	22	30	25
2,5	36	32	37	29	30	41	35
4	49	42	50	40	42	56	48
6	63	54	65	53	55	73	63
10	86	75	90	74	77	101	88
16	115	100	121	101	105	137	120
25	149	127	161	135	141	182	161
35	185	158	200	169	176	226	201
50	225	192	242	207	216	275	246
70	289	246	310	268	279	353	318
95	352	298	377	328	342	430	389
120	410	346	437	383	400	500	454
150	473	399	504	444	464	577	527
185	542	456	575	510	533	661	605
240	641	538	679	607	634	781	719
300	741	621	783	703	736	902	833
400	892	745	940	823	868	1 085	1 008
500	1 030	859	1 083	946	998	1 253	1 169
630	1 196	995	1 254	1 088	1 151	1 454	1 362
800	1 396	1 159	1 460	1 252	1 328	1 696	1 595
1 000	1 613	1 336	1 683	1 420	1 511	1 958	1 849
<b>Alumínio</b>							
16	91	77	90	76	79	103	90
25	108	97	121	103	107	138	122
35	135	120	150	129	135	172	153
50	164	146	184	159	165	210	188
70	211	187	237	206	215	271	244
95	257	227	289	253	264	332	300
120	300	263	337	296	308	387	351
150	346	304	389	343	358	448	408
185	397	347	447	395	413	515	470
240	470	409	530	471	492	611	561
300	543	471	613	547	571	708	652
400	654	566	740	663	694	856	792
500	756	652	856	770	806	991	921
630	879	755	996	899	942	1 154	1 077
800	1 026	879	1 164	1 056	1 106	1 351	1 266
1 000	1 186	1 012	1 347	1 226	1 285	1 565	1 472

<sup>1)</sup> Ou, ainda, condutores isolados, quando o método de instalação permitir.

Fonte: NBR 5410 (2004).

Figura 45 – Tabela 58: Seção mínima do condutor de proteção

Seção dos condutores de fase S mm <sup>2</sup>	Seção mínima do condutor de proteção correspondente mm <sup>2</sup>
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	S/2

Fonte: NBR 5410 (2004).

Figura 46 – Tabela 35: Temperaturas características dos condutores

Tipo de isolamento	Temperatura máxima para serviço contínuo (condutor) °C	Temperatura limite de sobrecarga (condutor) °C	Temperatura limite de curto-circuito (condutor) °C
Policloreto de vinila (PVC) até 300 mm <sup>2</sup>	70	100	160
Policloreto de vinila (PVC) maior que 300 mm <sup>2</sup>	70	100	140
Borracha etileno-propileno (EPR)	90	130	250
Polietileno reticulado (XLPE)	90	130	250

Fonte: NBR 5410 (2004).

Figura 47 – Tabela 28: Capacidade de condução de corrente (A). Isolação: XLPE, TR XLPE, EPR ou HEPR. Temperatura do condutor 90 °C

Seção do condutor mm <sup>2</sup>	Condutor de cobre												
	Método de instalação												
	A1	A2	B1	B2	C	D	E	F1	F2	G1	G2	H	I
10	86	70	104	94	78	93	69	59	63	66	73	64	68
16	113	92	136	123	101	123	90	75	81	84	93	82	87
25	148	120	179	162	131	164	117	97	104	107	119	105	110
35	180	147	219	197	159	202	142	116	124	127	142	125	131
50	218	177	264	238	190	246	170	137	147	149	167	147	154
70	272	220	329	296	236	309	211	167	179	180	202	178	187
95	332	269	400	360	286	379	255	200	214	213	239	211	221
120	384	311	461	413	328	439	294	227	243	239	269	238	249
150	437	352	514	460	369	492	330	251	269	256	292	262	270
185	498	403	583	522	419	561	375	282	301	283	324	293	300
240	588	474	678	605	488	656	438	324	345	319	366	334	340
300	670	540	767	683	551	745	494	361	383	349	403	370	375
400	760	618	844	750	602	823	550	394	417	360	424	401	395
500	856	694	943	837	669	922	615	434	458	389	461	440	429
630	958	776	1 048	929	736	1 028	683	475	500	416	497	478	464
800	1 064	858	1 152	1 018	804	1 134	755	517	541	444	532	516	497
1 000	1 161	934	1 250	1 102	862	–	817	551	575	467	560	547	525

Seção do condutor mm <sup>2</sup>	Condutor de alumínio												
	Método de instalação												
	A1	A2	B1	B2	C	D	E	F1	F2	G1	G2	H	I
10	66	54	80	72	60	72	53	45	49	51	56	50	52
16	87	71	106	96	78	96	70	58	63	65	72	64	67
25	115	94	139	126	102	127	91	75	81	83	93	82	86
35	140	114	170	154	124	157	110	90	96	99	110	97	102
50	169	137	206	186	148	192	132	106	114	117	130	114	120
70	212	171	257	231	184	241	164	130	139	142	158	139	146
95	258	209	313	281	222	296	198	156	166	168	188	165	173
120	300	242	362	325	255	345	229	178	189	190	213	186	196
150	340	275	407	364	288	389	259	198	211	207	233	206	215
185	391	316	465	416	328	447	296	223	238	231	261	232	241
240	463	374	545	486	385	527	349	259	275	263	298	267	275
300	532	428	621	553	438	603	397	290	308	291	331	298	306
400	621	500	703	625	496	685	453	325	344	311	359	331	333
500	716	577	799	709	574	781	517	366	386	341	396	370	368
630	822	665	905	802	633	888	587	409	431	372	436	412	405
800	931	751	1 012	894	706	996	663	455	476	404	474	454	443
1 000	1 038	835	1 120	987	773	–	733	496	517	431	509	492	476

Fonte: NBR 14039 (2021).

Figura 48 – Tabela 31: Fatores de correção para temperatura ambiente diferente de 20 °C, para linhas subterrâneas

Temperatura ambiente °C	Isolação	
	EPR, HEPR, XLPE ou TR XLPE	EPR 105
10	1,07	1,06
15	1,04	1,03
25	0,96	0,97
30	0,93	0,94
35	0,89	0,91
40	0,85	0,87
45	0,80	0,84
50	0,76	0,80
55	0,71	0,77
60	0,65	0,73
65	0,60	0,69
70	0,53	0,64
75	0,46	0,59
80	0,38	0,54

Fonte: NBR 14039 (2021).

Figura 49 – Tabela 38: Fatores de correção de agrupamento de eletrodutos diretamente enterrados e espaçados, sendo cada eletroduto com um cabo unipolar, a serem multiplicados pela capacidade de condução de corrente do método de referência G1

Número de dutos	Seção do condutor mm <sup>2</sup>	Espaçamento entre os centros dos eletrodutos mm			
		200	400	600	800
3	10 a 50	1,06	1,10	1,12	1,14
	70 a 150	1,00	1,01	1,02	1,02
	185 a 400	0,97	0,93	0,92	0,92
	500 a 1 000	0,97	0,92	0,89	0,88
6	10 a 50	0,92	1,00	1,05	1,09
	70 a 150	0,86	0,91	0,95	0,97
	185 a 400	0,82	0,83	0,85	0,86
	500 a 1 000	0,82	0,81	0,81	0,82
9	10 a 50	0,85	0,95	1,02	1,07
	70 a 150	0,79	0,87	0,91	0,95
	185 a 400	0,75	0,79	0,82	0,84
	500 a 1 000	0,74	0,76	0,78	0,80
12	10 a 50	0,81	0,93	1,00	1,05
	70 a 150	0,75	0,84	0,90	0,93
	185 a 400	0,71	0,77	0,80	0,83
	500 a 1 000	0,70	0,74	0,77	0,78

Fonte: NBR 14039 (2021).

Figura 50 – Tabela 42: Valores das constantes K e  $\beta$  para o cobre e alumínio

Material	$\beta$ (°C)	K (A.s <sup>1/2</sup> .mm <sup>-2</sup> )
Cobre	234,5	226
Alumínio	228	148

Fonte: NBR 14039 (2021).

Figura 51 – Tabela 43: Temperaturas inicial e final do condutor no curto-circuito

Material da isolação	Temperatura inicial °C	Temperatura final °C <sup>a</sup>
EPR e HEPR	90	250
EPR 105	105	250
XLPE e TR XLPE	90	250

<sup>a</sup> Conexões soldadas limitam a temperatura final a 160 °C.

Fonte: NBR 14039 (2021).

Figura 52 – Tabela 44: Temperatura da blindagem no final do curto-circuito

Material da cobertura	SE1/A, SHF2 e SE1/B <sup>c</sup>	ST3 <sup>c</sup>	SHF1 e ST7 <sup>c</sup>	ST1 e ST2 <sup>c</sup>
Temperatura final máxima °C <sup>a, b</sup>	220	150	180	200

<sup>a</sup> Conexões soldadas limitam a temperatura final máxima a 160 °C.  
<sup>b</sup> A presença de capa de chumbo limita a temperatura final máxima a 200 °C (ligas de chumbo) ou a 170 °C (chumbo).  
<sup>c</sup> SE1/A e SE1/B = policloropreno, polietileno clorossulfonado, polietileno clorado ou similares  
 SHF2 = Composto poliolefinico termofixo não halogenado  
 SHF1 = Composto poliolefinico termoplástico não halogenado  
 ST3 e ST7 = Polietileno termoplástico  
 ST1 e ST2 = PVC

Fonte: NBR 14039 (2021).

Figura 53 – Item 6.2.6.2.4 da NBR 14039 (2021)

**6.2.6.2.4** A temperatura da blindagem no início do curto-circuito deve ser considerada como sendo 5 °C menor que a do condutor, ou seja, no caso dos cabos isolados com XLPE, TR XLPE, EPR e HEPR, a temperatura deve ser igual a 85 °C, e no caso dos cabos isolados com EPR 105, igual a 100 °C.

Fonte: NBR 14039 (2021).

**APÊNDICE B – TABELAS DE CÁLCULO E TOMADA DE DECISÃO  
REPRODUZIDAS DA PLANILHA DE DIMENSIONAMENTOS**

Figura 54 – Tabela DIM\_SE

ID SE	Nº DE MÓDULOS	POTÊNCIA PICO TOTAL (kWp)	Nº DE INVERSORES 1	POTÊNCIA DO INVERSOR 1 (kW)	Nº DE INVERSORES 2	POTÊNCIA DO INVERSOR 2 (kW)	POTÊNCIA TOTAL (kW)	POTÊNCIA DO TRAFÓ (kVA)	FOLGA NO TRAFÓ (%)	TIPO DE SE
01										
02										
03										
04										
05										
06										
07										
08										
09										
10										

Fonte: Elaboração própria.

Figura 55 – Tabela DIM\_BTCC\_CAR

INVERSOR	POTÊNCIA NOMINAL (kW)	MÓDULOS CONECTADOS	POTÊNCIA PICO ALOCADA (kWp)	SOBRECARGA DO INVERSOR (%)
01				
02				
03				
04				
05				
06				
07				
08				
09				
10				

Fonte: Elaboração própria.

Figura 56 – Tabela DIM\_BTCC\_STR

INVERSOR	ID INVERSOR	STRING	Nº DE MÓDULOS	POTÊNCIA PICO STRING (kWp)	Voc (V) MÓDULO	Voc (V) STRING	Vop (V) MÁX INVERSOR	Vop (V) STRING
----------	-------------	--------	---------------	----------------------------	----------------	----------------	----------------------	----------------

Fonte: Elaboração própria.

Figura 57 – Tabela DIM\_BTCC\_CABO

INVERSOR	STRING	Nº DE MODULOS	Ipac (A)	Nº CIRCUITOS	Nº ELETRODUTOS	ESPAÇAMENTO (m)	T <sub>ref</sub> (°C)	T <sub>amb</sub> (°C)	FC <sub>agor</sub>	FC <sub>grelat</sub>	FC <sub>t</sub>	Ipac (A)	L (m)	F <sub>mm²</sub> CAPACIDADE DE CONDUÇÃO	AV (N)	F <sub>mm²</sub> CALIADA	F <sub>mm²</sub> ESCOLHIDA	AV (N)	F <sub>mm²</sub> ESCOLHIDA
----------	--------	---------------	----------	--------------	----------------	-----------------	-----------------------	-----------------------	--------------------	----------------------	-----------------	----------	-------	---	--------	--------------------------	----------------------------	--------	----------------------------

Fonte: Elaboração própria.

Figura 58 – Tabela DIM\_BTCA\_CABO



Fonte: Elaboração própria.

Figura 59 – Tabela DIM\_MTCA\_COND



Fonte: Elaboração própria.

Figura 60 – Tabela DIM\_MTCA\_BLIND

CIRCUITO	ID SE	I <sub>cc</sub> F-T (A)	$\tau$ (s)	K $\beta$	$\theta_{inicial}$ (°C)	$\theta_{final}$ (°C)	mm <sup>2</sup> ESCOLHIDA
TRAFO-PE							

Fonte: Elaboração própria.

Figura 61 – Tabela DIM\_UFV\_ELET

TRECHO	CABO 1 (mm <sup>2</sup> )	DIAM. EXT. CABO 1 (mm)	Nº DE CABOS 1	CABO 2 (mm <sup>2</sup> )	DIAM. EXT. CABO 2 (mm)	Nº DE CABOS 2	ELETRODUTO	DIAM. INT. ELETRODUTO (mm)	Ocupação (%)
--------	---------------------------	------------------------	---------------	---------------------------	------------------------	---------------	------------	----------------------------	--------------

Fonte: Elaboração própria.

Figura 62 – Tabela DIM\_BTCA\_PROT

CIRCUITO	ID CIRCUITO	V <sub>SE IV</sub>	I <sub>RES</sub> [A]	I <sub>U</sub> [kA]	EQUIPAMENTO	I <sub>n</sub> [A]	V <sub>o</sub> [V]	Capacidade de interrupção [kA]	DPS I <sub>U</sub> [V]	DPS I <sub>n</sub> [kA]	DPS I <sub>max</sub> [kA]	DPS I <sub>Up</sub> [kV]
----------	-------------	--------------------	----------------------	---------------------	-------------	--------------------	--------------------	--------------------------------	------------------------	-------------------------	---------------------------	--------------------------

Fonte: Elaboração própria.

Figura 63 – Tabela DIM\_MTCA\_PROT

CIRCUITO	ID CIRCUITO	TIPO DE SE	$I_{proj}$ (A)	$I_n$ (A)	ELO FUSÍVEL TIPO K   SE AÉREA	$V_n$ (kV)	ELO FUSÍVEL TIPO K   SE AÉREA	$V_n$ (kV)	PARA-RAIO   SE AÉREA	$V_n$ (kV)	SE CUBÍCULO BLINDADO
TRAFO-PE											

Fonte: Elaboração própria.