



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

**LORENA FREIRE PINHO**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA REDE DE BAIXA  
TENSÃO ENTRE TOPOLOGIA DE INVERSOR CENTRAL E *STRING* PARA GERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA**

**FORTALEZA**

**2023**

**LORENA FREIRE PINHO**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA REDE DE BAIXA  
TENSÃO ENTRE TOPOLOGIA DE INVERSOR CENTRAL E *STRING* PARA GERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA**

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 Morais.

**FORTALEZA**

**2023**

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)

---

P723a Pinho, Lorena Freire.

Análise comparativa de viabilidade econômica da rede de baixa tensão entre topologia de inversor central e string para geração fotovoltaica : estudo de caso de uma usina fotovoltaica / Lorena Freire Pinho. – 2023.

96 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Ernande Eugenio Campelo Morais.

1. Inversor string. 2. Inversor central. 3. Comparativo de custos. 4. Instalação elétrica de baixa tensão. 5. Usina solar fotovoltaica. I. Título.

CDD 621.3

---

**LORENA FREIRE PINHO**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA REDE DE BAIXA  
TENSÃO ENTRE TOPOLOGIA DE INVERSOR CENTRAL E *STRING* PARA GERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA**

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.

Aprovado em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

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

---

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

---

Eng. Edvaldo de Sousa Queiroz Filho  
Secretaria de Conservação e Serviços Públicos (SCSP)



“Respondeu Jesus: ‘Você não compreende agora o que estou fazendo a você; mais tarde, porém, entenderá’.”  
João 13:7

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de começar agradecendo a Deus por até aqui ter me sustentado.

Aos meus pais, Eveline e Bosco, que são meus grandes incentivadores e apoiadores durante toda a minha trajetória acadêmica. Agradeço-lhes por todo esforço que fizeram até aqui por mim.

Agradeço a minha avó Maria (Nicinha) e meu avô Luís (Bebé), por terem sido as pessoas que cuidaram de mim enquanto meus pais não puderam estar presentes.

Agradeço a minha avó Terezinha Pinho, que hoje não está mais entre nós, mas que até hoje tem seus esforços reconhecidos na criação de todos os seus filhos e netos.

Agradeço aos meus padrinhos, Alexandre e Lubiana, por terem me acolhido em sua casa e me criado como uma filha para que eu pudesse ter uma boa educação.

Agradeço aos meus tios Karol e Thiago, que foram criados como meus irmãos, por serem tão presentes na vida e me aconselharem para o caminho do bem.

Agradeço ao meu professor orientador Dr. Ernande Eugenio por toda compreensão, paciência, empatia e por todas as contribuições neste trabalho.

Agradeço aos demais participantes da banca, professor Dr. Dalton Honório e Eng. Edvaldo Queiroz, por terem aceitado meu convite com muita receptividade.

Agradeço a todos os meus amigos que estiveram dividindo esta caminhada comigo, compartilhando momentos que foram essenciais para que eu não desistisse da graduação.

Agradeço aos meus companheiros de trabalho, em especial aqueles que dividiram conhecimentos que foram de fundamental importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao professor Me. Gustavo Castelo Branco por ter sido um grande incentivador para que eu pudesse concluir minha graduação.

## RESUMO

Uma usina solar fotovoltaica, situada no município de Terra Nova, Pernambuco, inicialmente foi projetada para que toda a conversão de energia elétrica CC/CA fosse realizada por meio de inversores *string*, e, portanto, todo o seu *layout* foi desenvolvido considerando equipamentos e componentes que compõe a instalação elétrica quando há a utilização de inversores *strings*. Contudo, devido a necessidade de avaliar o menor custo para implementação desta usina, foi desenvolvido um novo cenário adotando a topologia de inversores centrais. Dessa forma, tendo em vista o crescimento da utilização de plantas de geração centralizada solar fotovoltaica, este trabalho tem como objetivo comparar, do ponto de vista econômico, os custos da instalação elétrica de baixa tensão, utilizando tecnologia de inversor *string* e inversor central. Para isto, a fim de avaliar a melhor topologia de planta para esta usina, foi realizada uma pesquisa para descrever os componentes da instalação elétrica de baixa tensão e quantificá-los de acordo com a especificidade de cada planta, e através do levantamento destes dados, pode-se calcular o impacto no custo total da usina para cada cenário.

**Palavras-chave:** Inversor *string*, Inversor central, Geração Centralizada, Usina Solar Fotovoltaica, Instalação Elétrica de Baixa Tensão, Comparativo de Custos.

## **ABSTRACT**

A solar photovoltaic power plant located in the Terra Nova, county, Pernambuco, was initially designed for the entire DC/AC electrical energy conversion to be carried out through string inverters. Therefore, its entire layout was developed considering equipment and components that make up the electrical installation when string inverters are used. However, due to the need to assess the lowest cost for implementing this plant, a new scenario was developed adopting the topology of central inverters. Thus, considering the growing use of centralized solar photovoltaic generation plants, this study aims to compare, from an economic perspective, the costs of low-voltage electrical installation using string inverter technology and central inverter technology. To achieve this, in order to assess the best plant topology for this solar facility, a analysis was conducted to describe the components of the low-voltage electrical installation and quantify them according to the specificity of each plant. Through the collection of these data, the impact on the total cost of the plant for each scenario could be calculated.

**Keywords:** String Inverter, Central Inverter, Centralized Generation, Photovoltaic Solar Power Plant, Low-Voltage Electrical Installation, Cost Comparison.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Topologia de uma planta fotovoltaica com inversor central .....	18
Figura 2 - Topologia de uma planta fotovoltaica com inversor <i>string</i> .....	19
Figura 3 – Elementos do arranjo fotovoltaico .....	23
Figura 4 – Sistema fotovoltaico com um módulo por inversor .....	24
Figura 5 – Sistema fotovoltaico com uma string por inversor .....	25
Figura 6 – Sistema fotovoltaico com uma <i>string</i> para um único inversor .....	26
Figura 7 – Componentes para fixação de módulos fotovoltaicos em telhas de barro usando gancho .....	27
Figura 8 – Fixação de módulos fotovoltaicos em sistemas com rastreamento solar .....	28
Figura 9 – Aplicações dos cabos elétricos em sistemas FV .....	28
Figura 10 – Aplicações dos cabos elétricos fotovoltaicos .....	30
Figura 11 – Especificações técnicas de cabos da classe de tensão 0,6/1kV .....	31
Figura 12 – Diagrama esquemático energia solar <i>on-grid</i> .....	32
Figura 13 – Topologia de instalação descentralizada .....	32
Figura 14 – Fluxograma da metodologia .....	40
Figura 15 – <i>Layout</i> do subcampo com inversor <i>string</i> .....	49
Figura 16 – Distribuição de valas do subcampo com inversor <i>string</i> .....	50
Figura 17 – <i>Layout</i> do subcampo com inversor central .....	56
Figura 18 – Distribuição de valas do subcampo com inversor central .....	57

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Geração de Energia Elétrica no Brasil - Balanço de geração.....	18
Gráfico 2 – Utilização de Inversores <i>string</i> e central entre 2019 e 2022 no Brasil ...	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Premissas do projeto para a topologia com inversor <i>string</i> .....	47
Tabela 2 - Configuração eletromecânica utilizando inversor <i>string</i> .....	47
Tabela 3 – Resumo da potência pico por inversor e eletrocentro - cenário com inversor <i>string</i> .....	48
Tabela 4 – Resumo da potência nominal por inversor e eletrocentro - cenário com inversor <i>string</i> .....	48
Tabela 5 – Dados de entrada para dimensionamento dos condutores BT/CA.....	51
Tabela 6 – Dados dos condutores BT/CA .....	51
Tabela 7 – Dados de entrada para dimensionamento dos condutores FV – cenário com inversor <i>string</i> .....	52
Tabela 8 – Dados dos condutores FV – cenário com inversor <i>string</i> .....	52
Tabela 9 – Premissas do projeto para a topologia com inversor central .....	53
Tabela 10 – Configuração eletromecânica das <i>combiner boxes</i> para o cenário com inversor central.....	53
Tabela 11 – Configuração eletromecânica dos inversores para o cenário com inversor central.....	54
Tabela 12 – Resumo da potência pico por inversor e eletrocentro - cenário com inversor <i>string</i> .....	54
Tabela 13 – Resumo da potência nominal por inversor e eletrocentro - cenário com inversor central.....	55
Tabela 14 – Dados de entrada para dimensionamento dos condutores BT/CC.....	58
Tabela 15 – Dados dos condutores BT/CC .....	58
Tabela 16 – Dados de entrada para dimensionamento dos condutores FV para o cenário com inversor central .....	59
Tabela 17 – Dados dos condutores FV para o cenário com inversor central .....	59
Tabela 18 – Premissas de reservas técnicas adotadas para o cabo BT/CA.....	61
Tabela 19 – Lista de/para cabos BT/CA.....	62
Tabela 20 – Quantitativo de cabo por trecho – Cabos BT/CA.....	63
Tabela 21 – Resumo do quantitativo de cabos BT/CA.....	63
Tabela 22 – Premissas de reservas técnicas adotadas para o cabo FV – cenário com inversor <i>string</i> .....	64

Tabela 23 – Quantitativo de cabo FV por tipo de delimitação – cenário com inversor <i>string</i> .....	64
Tabela 24 – Quantitativo total de cabo FV por tipo de delimitação – cenário com inversor <i>string</i> .....	65
Tabela 25 – Resumo do quantitativo de cabo FV – cenário com inversor <i>string</i> .....	66
Tabela 26 – Dimensões das valas BT/CA.....	66
Tabela 27 – Dimensões das valas FV – cenário com inversor <i>string</i> .....	67
Tabela 28 – Quantitativo total das valas FV – cenário com inversor <i>string</i> .....	67
Tabela 29 – Eletrodutos nas travessias de cabos BT/CA .....	68
Tabela 30 – Dimensionamento do eletroduto nas travessias de cabos BT/CA.....	68
Tabela 31 – Eletrodutos nas travessias de cabos BT/CA .....	69
Tabela 32 – Dimensionamento do eletroduto dos cabos FV – cenário com inversor <i>string</i> .....	69
Tabela 33 – Comprimento linear dos eletrodutos por tipo de delimitação – cenário com inversor <i>string</i> .....	70
Tabela 34 – Comprimento linear dos eletrodutos por trecho – cenário com inversor <i>string</i> .....	70
Tabela 35 – Quantidade total de eletrodutos para o cabo FV – cenário com inversor <i>string</i> – cenário com inversor <i>string</i> .....	71
Tabela 36 – Placas de PVC para cabos BT/CA .....	71
Tabela 37 – Fita sinalizadora para cabos BT/CA .....	72
Tabela 38 – Abraçadeiras para cabos BT/CA .....	72
Tabela 39 – Resumo do quantitativo do cenário com inversor <i>string</i> .....	73
Tabela 40 – Premissas de reservas técnicas adotadas para o cabo BT/CC.....	73
Tabela 41 – Lista de/para cabos BT/CC .....	74
Tabela 42 – Quantitativo de cabo por trecho – Cabos BT/CC.....	76
Tabela 43 – Resumo do quantitativo de cabos BT/CC.....	77
Tabela 44 – Premissas de reservas técnicas adotadas para o cabo FV – cenário com inversor central.....	77
Tabela 45 – Quantitativo de cabo FV por tipo de delimitação – cenário com inversor central .....	78
Tabela 46 – Quantitativo total de cabo FV por tipo de delimitação – cenário com inversor central.....	78



Tabela 47 – Resumo do quantitativo de cabo FV – cenário com inversor central.....	79
Tabela 48 – Quantitativo das valas BT/CC .....	79
Tabela 49 – Dimensões das valas FV – cenário com inversor central.....	80
Tabela 50 – Quantitativo total das valas FV - cenário com inversor central.....	80
Tabela 51 – Dimensionamento do eletroduto nas travessias de cabos BT/CC.....	81
Tabela 52 – Eletrodutos nas travessias de cabos BT/CC .....	82
Tabela 53 – Dimensionamento do eletroduto dos cabos FV - cenário com inversor central .....	82
Tabela 54 – Comprimento linear dos eletrodutos por tipo de delimitação - cenário com inversor central .....	83
Tabela 55 – Comprimento linear dos eletrodutos por trecho - cenário com inversor central .....	83
Tabela 56 – Quantidade total de eletrodutos para o cabo FV - cenário com inversor central .....	84
Tabela 57 – Placas de PVC para cabos BT/CC.....	84
Tabela 58 – Fita sinalizadora para cabos BT/CC .....	85
Tabela 59 – Abraçadeiras para cabos BT/CC .....	85
Tabela 60 – Resumo do quantitativo do cenário com inversor central.....	86
Tabela 61 – Precificação dos materiais elétricos - cenário com inversor <i>string</i> .....	87
Tabela 62 – Custo total da rede de baixa tensão para o cenário com inversor <i>string</i> .....	87
Tabela 63 – Precificação dos materiais elétricos - cenário com inversor central .....	88
Tabela 64 – Custo total da rede de baixa tensão para o cenário com inversor central .....	88

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
FV	Fotovoltaica
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
GW	<i>Gigawatt</i>
<i>kV</i>	<i>Kilovolt</i>
<i>kW</i>	<i>Kilowatt</i>
LUIGMME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MT	Média Tensão
MWp	Megawatt-pico
QD	Quadro de Distribuição
UC	Unidade Consumidora
UFV	Centrais Geradoras Fotovoltaicas

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>1.1 Contextualização</b> .....	<b>17</b>
<b>1.2 Justificativa</b> .....	<b>19</b>
<b>1.3 Objetivos</b> .....	<b>20</b>
<b>1.3.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>20</b>
<b>1.3.2 Objetivo Específico</b> .....	<b>20</b>
<b>1.4 Estrutura do trabalho</b> .....	<b>20</b>
<b>2 PLANTAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1 Componentes de planta de geração solar fotovoltaica</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.1 Módulos fotovoltaicos</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.2 Inversores</b> .....	<b>23</b>
2.1.2.1 <i>Microinversores</i> .....	24
2.1.2.2 <i>Inversores String</i> .....	25
2.1.2.3 <i>Inversores Centrais</i> .....	26
<b>2.1.3 Estruturas de fixação dos módulos fotovoltaicos</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1.4 Cabos e condutores</b> .....	<b>28</b>
2.1.4.1 <i>Cabos solares</i> .....	29
2.1.4.2 <i>Cabos BT/CA</i> .....	31
<b>2.2 Normas que se aplicam a geração solar fotovoltaica</b> .....	<b>33</b>
<b>2.2.1 Normas nacionais</b> .....	<b>33</b>
<b>2.2.2 Normas internacionais</b> .....	<b>34</b>
<b>3 INVERSORES STRINGS X INVERSORES CENTRAIS: ANÁLISE COMPARATIVA</b> .....	<b>36</b>
<b>3.1 Planta de geração fotovoltaica com inversores <i>string</i></b> .....	<b>37</b>
<b>3.2 Planta de geração fotovoltaica com inversor central</b> .....	<b>38</b>
<b>3.3 Metodologia</b> .....	<b>39</b>

<b>3.3.1 Caracterização dos cenários projetados.....</b>	<b>40</b>
3.3.1.1 Caracterização do layout com inversor string.....	40
3.3.1.2 Caracterização do layout com inversor central.....	42
<b>3.3.2 Quantitativo de materiais.....</b>	<b>43</b>
<b>3.3.3 Levantamento de custos .....</b>	<b>44</b>
<b>4 ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA ENTRE INVERSORES CENTRAIS E STRING.....</b>	<b>46</b>
<b>4.1 Caracterização do complexo fotovoltaico.....</b>	<b>46</b>
4.1.1 Caracterização do cenário com inversor string .....	47
4.1.2 Caracterização do cenário com inversor central.....	52
<b>4.2 Caracterização e levantamento dos materiais da rede de baixa tensão .....</b>	<b>59</b>
<b>4.2.1 Caracterização e levantamento dos materiais do cenário com inversor string.....</b>	<b>60</b>
4.2.1.1 Cabos elétricos.....	60
4.2.1.2 Valas .....	66
4.2.1.3 Eletrodutos, Placas de PVC, Fitas Sinalizadoras e Abraçadeiras .....	68
<b>4.2.2 Caracterização e levantamento dos materiais do cenário com inversor central.....</b>	<b>73</b>
4.2.2.1 Cabos elétricos.....	73
4.2.2.2 Valas .....	79
4.2.2.3 Eletrodutos, Placas de PVC, Fitas Sinalizadoras e Abraçadeiras .....	81
<b>4.3 Precificação dos materiais elétricos e custos da rede de baixa tensão para cada cenário .....</b>	<b>86</b>
<b>4.3.1 Custos da rede de baixa tensão do cenário com inversor string .....</b>	<b>86</b>
<b>4.3.1 Custos da rede de baixa tensão do cenário com inversor central .....</b>	<b>87</b>
<b>4.4 Discussões .....</b>	<b>89</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>91</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>93</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Os avanços nas tecnologias utilizadas para a geração solar fotovoltaica (FV) e, conseqüentemente, o seu barateamento, têm tornado a energia solar fotovoltaica um atrativo sólido para sua adoção na expansão da matriz elétrica brasileira. De acordo com a (ANEEL, 2023), no primeiro semestre de 2023, houve um acréscimo de 5,1 GW na capacidade instalada de geração de energia elétrica, dos quais, 2,2 GW são de fonte solar fotovoltaica.

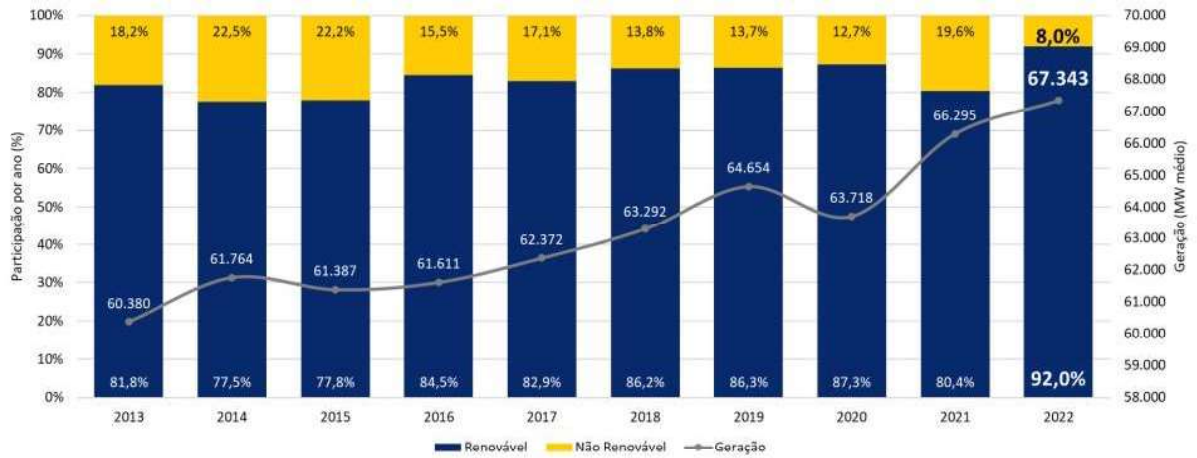
A composição da fonte de energia solar no Brasil é formada por dois tipos de geração: geração distribuída (GD) e geração centralizada (GC). Segundo o Art.1º da Lei 14.300, de 6 de janeiro de 2022, a geração distribuída é constituída pela microgeração e minigeração, ambas são caracterizadas pela conexão que há entre as unidades consumidoras (UCs) com a rede de distribuição de energia elétrica, e são definidas pela potência instalada. Para microgeração, deverá ser menor ou igual a 75 kW, enquanto a minigeração é estabelecida para faixas de potências maiores que 75 kW, menor ou igual a 5 MW para fontes despacháveis<sup>1</sup> e menor ou igual a 3 MW para fontes não despacháveis<sup>2</sup> (Brasil, 2022). Em contrapartida, a geração centralizada, de acordo com Zilles (2012), é a oferta de energia elétrica formada por grandes unidades geradoras que estão distantes dos centros consumidores.

De acordo com o Gráfico 1, no ano de 2022, cerca de 92% da geração de energia elétrica no Brasil foi proveniente de usinas que utilizam fontes de energia renovável, e ainda nesse mesmo ano, segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2023), a geração solar centralizada teve o seu maior aumento de geração de energia quando comparado dois anos consecutivos, superando em 64,3% a geração solar fotovoltaica centralizada do ano de 2021. Além disso, conforme dados da (ANEEL, 2023), atualmente a matriz elétrica brasileira é constituída em 4,93% por centrais geradoras fotovoltaicas (UFVs) em operação.

<sup>1</sup> Centrais elétricas que podem ser utilizadas de acordo com a demanda dos operadores da rede elétrica, interagindo com as exigências do mercado de energia;

<sup>2</sup> Centrais elétricas que não podem ser ligadas ou desligadas para atender a uma demanda de energia flutuante.

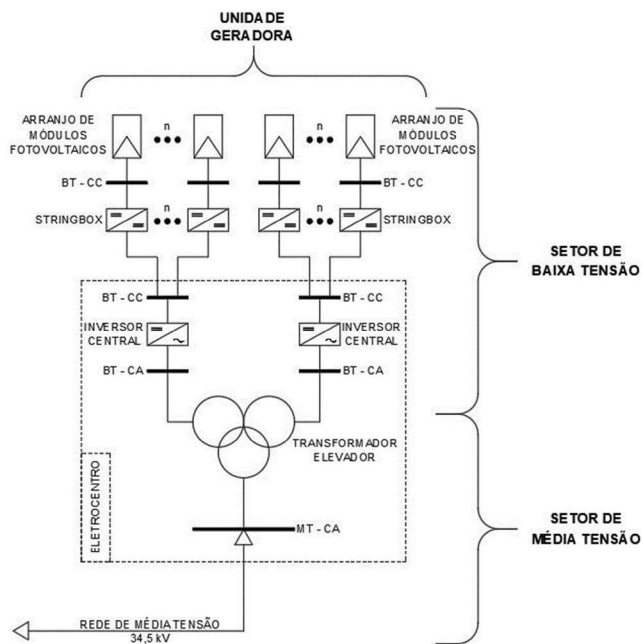
Gráfico 1 - Geração de Energia Elétrica no Brasil - Balanço de geração



Fonte: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (2023).

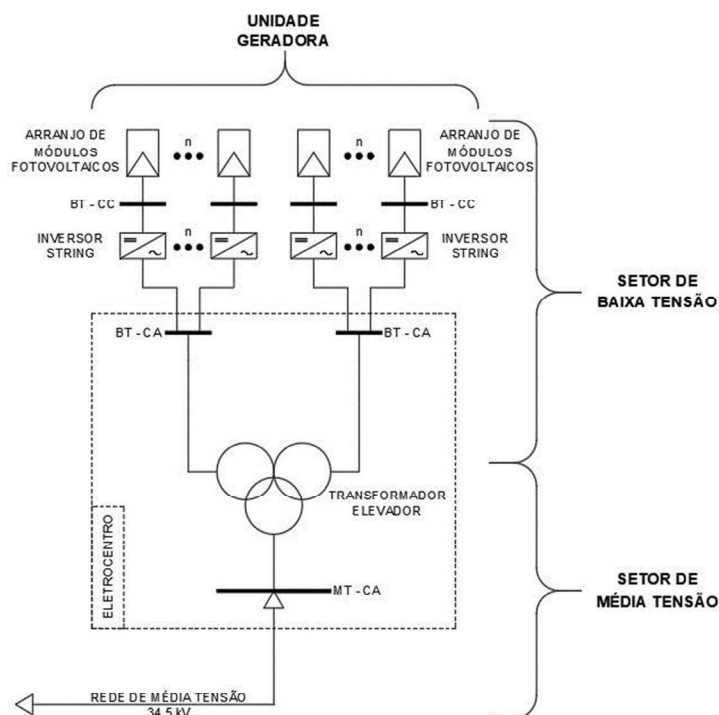
No Brasil, existem várias topologias de plantas que incorporam o cenário das UFVs. Sua escolha varia de acordo com as características de área de instalação, objetivos da geração e de tecnologias disponibilizadas. As principais topologias encontradas são as topologias de inversor *string* e inversor central. Na Figura 1 é representado o diagrama simplificado de uma usina solar que utiliza topologia de inversor central, enquanto na Figura 2 é representada a topologia de inversor *string*.

Figura 1 - Topologia de uma planta fotovoltaica com inversor central



Fonte: Sampaio (2023).

Figura 2 - Topologia de uma planta fotovoltaica com inversor *string*



Fonte: Sampaio (2023).

As duas tecnologias de inversores utilizadas no Brasil para plantas de geração solar fotovoltaica apresentam diferenças na composição dos materiais elétricos da instalação elétrica de baixa tensão (BT) da UFV. Em plantas solares fotovoltaicas, cuja topologia é constituída por inversores *string*, em sua instalação elétrica, são adotados cabos com tensões nominais de 0,6/1 kV em corrente alternada (CA), enquanto nas plantas que utilizam inversor central a classe de tensão utilizada dos cabos é de 1,8 kV em corrente contínua (CC).

Ademais, a escolha da topologia da planta, por influenciar nos componentes da instalação elétrica de baixa tensão, impacta não somente nos custos de construção da usina, mas também na sua operação e manutenção.

## 1.2 Justificativa

Compreendendo que a escolha da tecnologia de inversor em centrais geradoras fotovoltaicas afeta os custos de materiais elétricos e mão de obra, consequentemente, o custo global da usina, a definição das topologias de planta fotovoltaica, levando em consideração inversores *string* ou centrais, torna-se fundamental para garantir a viabilidade financeira de sua construção. Dessa forma, é

possível avaliar qual topologia se torna financeiramente mais atrativa para a construção. Além disso, conhecendo as especificidades da tecnologia dos inversores, pode-se estabelecer uma análise para a compreensão de qual topologia atende os requisitos estabelecidos para a operacionalidade e manutenção de um subcampo, que representa apenas uma das usinas do complexo solar fotovoltaico localizado no município de Terra Nova em Pernambuco.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é comparar os custos da instalação elétrica em baixa tensão de uma usina solar fotovoltaica, através do *layout* da usina com o uso de inversores *string* e do *layout* com o uso de inversores centrais, verificando os impactos nos custos de construção, operacionalidade e manutenção da usina. Vale ressaltar que, durante a elaboração deste trabalho, o estudo de caso passou por uma mudança técnica no projeto inicial, na qual o *layout*, inicialmente adotado no projeto real com inversores *string*, será modificado, agora, para o *layout* com inversores centrais. Ou seja, esse relato reafirma a importância de se analisar a viabilidade técnica entre essas duas opções de *layout* dentre diferentes aspectos, entre eles o econômico, que consiste no objetivo central do presente trabalho.

#### **1.3.2 Objetivo Específico**

- a) Quantificar os materiais elétricos da rede de baixa tensão do *layout* com inversor *string* e central.
- b) Levantar custos dos materiais elétricos e mão de obra da rede de baixa tensão do *layout* com inversor *string* e central.

### **1.4 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, dos quais:

O capítulo 2 aborda as plantas de geração fotovoltaica. Inicialmente, é apresentada a estrutura genérica das plantas de geração fotovoltaica. Além disso, são apresentadas normas técnicas vigentes nacionais e internacionais para sistemas fotovoltaicos, e apresentados os seus objetivos e como serão aplicadas neste trabalho.



No capítulo 3 é feita a abordagem comparativa de plantas de geração fotovoltaica que utilizam tecnologias de inversores *string* e centrais. É feita a comparação de operacionalidade das plantas, apresentando custos de investimento e como cada tipo de topologia de inversor impacta na manutenção de uma usina. Também é introduzido o conceito que será utilizado para comparar a viabilidade econômica desse estudo de caso e apresentada a metodologia utilizada para composição dos custos dos dois tipos de *layout* da usina.

No capítulo 4 será detalhado a configuração eletromecânica de cada um dos *layouts* propostos, destacando os componentes que são específicos de cada topologia de planta. Ademais, é quantificado e estimado os custos de materiais elétricos e sua instalação. Dessa forma, é apresentada uma tabela resumo com os custos da planta de geração fotovoltaica com inversor *string* e com inversor central e feita uma breve discussão acerca da viabilidade econômica das plantas.

No capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho, na qual são discutidos os resultados obtidos no capítulo anterior e limitações das metodologias abordadas. Além disso, são apresentadas recomendações de temas para futuras pesquisas relacionadas.

## 2 PLANTAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

### 2.1 Componentes de planta de geração solar fotovoltaica

As plantas de geração fotovoltaica são caracterizadas de acordo com a sua geração. No Brasil, tem-se como principais modelos a geração distribuída e centralizada. Os dois tipos de geração possuem como componentes em comum, que definem plantas de geração solar, os módulos fotovoltaicos e inversores de energia.

Além disso, o tipo de geração impacta na escolha da estrutura de fixação dos módulos fotovoltaicos. De acordo com Bueno *et al.*, (2017, p.58), as usinas de geração solar fotovoltaica centralizada são “usinas de grande porte instaladas em solo sobre estruturas metálicas inclinadas fixas, ou com seguimento da trajetória aparente do Sol em um eixo”, enquanto plantas de GD, são caracterizadas por serem modelos de planta que são mais utilizadas em ambientes urbanos, incorporada aos telhados e coberturas das edificações (INPE, 2017).

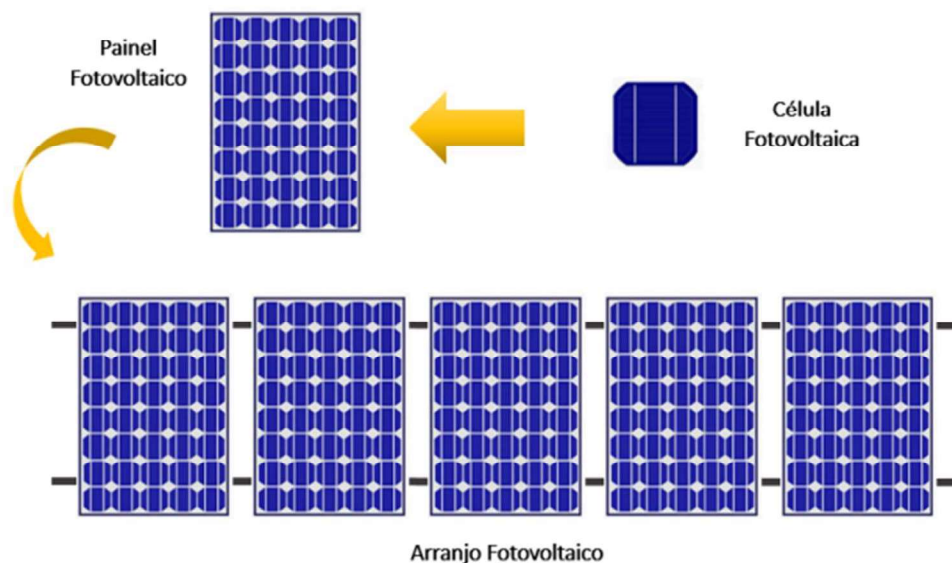
Ademais, convém lembrar a importância dos cabos e condutores que são utilizados para conexão elétrica dos componentes da planta, pois a aplicação e instalação dos cabos se diferencia em alguns aspectos da forma convencional de instalação.

#### 2.1.1 Módulos fotovoltaicos

Conforme a NBR 10899:2023, a qual define as terminologias para Energia Solar Fotovoltaica, o módulo fotovoltaico consiste em um conjunto de células fotovoltaicas (FV), interligadas eletricamente e encapsuladas, que tem como objetivo gerar energia elétrica (NBR 10899, 2023). As células FV, segundo Jorge (2022), são elementos capazes de captar a energia gerada por uma fonte luminosa e converter em eletricidade.

Quando se tem um conjunto de módulos fotovoltaicos ou subarranjos fotovoltaicos mecanicamente e eletricamente integrados, segundo a NBR 16690:2019, tem-se o que se chama de arranjo fotovoltaico (NBR 16690, 2019). O arranjo fotovoltaico nada mais é que o agrupamento de séries de módulos denominado de *strings*, como pode se ver na Figura 3.

Figura 3 – Elementos do arranjo fotovoltaico



Fonte: Pereira (2019).

Ademais, os módulos FV podem ser caracterizados de acordo com seu tipo de célula. Essa diferença na composição das células distingue as duas tecnologias de módulos, podendo estes serem monofaciais ou bifaciais. Os módulos monofaciais contribuem para a geração de energia em somente uma das faces, enquanto os módulos bifaciais tanto a superfície frontal quanto a posterior favorecem na geração (NBR 10899, 2023). Além disso, para Villalva (2019), os módulos bifaciais são utilizados somente em usinas, visto que em instalações em telhados a parte traseira do módulo ficará muito próxima ao telhado e, portanto, não irá receber luz.

### 2.1.2 Inversores

O inversor FV, assim como os módulos, é um componente indispensável para o funcionamento de uma planta solar fotovoltaica, o qual funciona como um condicionador de energia e sua principal função é transformar a energia produzida pelos módulos solares, de corrente contínua em corrente alternada (Miranda, 2022).

Os inversores solares podem ser tanto *on-grid* quanto *off-grid*. Quando a geração de energia tem como foco principal o seu armazenamento em baterias, se utiliza o inversor solar *off-grid*, estes são mais utilizados em locais remotos onde não há acesso à energia elétrica, enquanto inversores *on-grid* são projetados para se

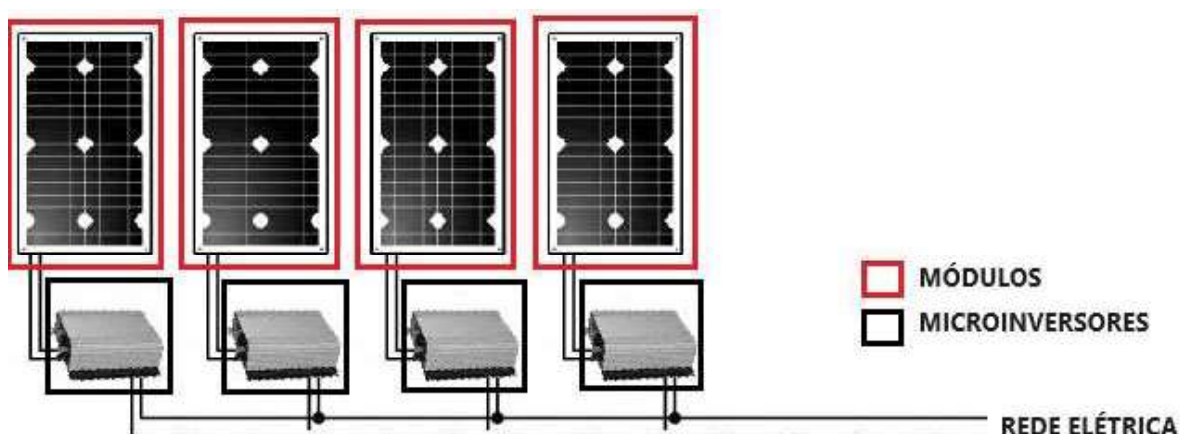
conectar às redes residenciais ou empresariais, permitindo injetar energia na rede elétrica do empreendimento (Gonzaga, 2019).

Além disso, os inversores podem ser caracterizados de acordo com a sua eficiência em termos de geração. Os sistemas fotovoltaicos podem ser de diferentes tamanhos e níveis de potência e, portanto, os inversores podem ser selecionados em função da configuração da planta e da quantidade de módulos da instalação. Para isto, existem três tipos de inversores: inversor central, inversor *string* e microinversores (Coelho, 2022). Dessa forma, serão explicitadas as características de cada inversor a seguir.

### 2.1.2.1 Microinversores

Os microinversores, conforme Figura 4, são partes da categoria de inversores de pequena potência, os quais são projetados para ter o domínio de somente um único módulo FV. As principais características desse tipo de inversor é o seu tamanho compacto, que permite que estes sejam posicionados na parte traseira dos módulos, além do mais, é um equipamento que permite uma conexão simples com a rede elétrica (Villalva, 2012).

Figura 4 – Sistema fotovoltaico com um módulo por inversor



Fonte: Adaptado pela autora nas ideias de Villalva (2012).

Além disso, os microinversores em ocasiões de sombreamento, sujeira ou de falhas em um dos módulos, permitem que não haja perda de geração, pois somente o módulo específico é afetado, de forma a não impactar na produção dos demais e aumentando a eficiência do sistema. Ademais, convém lembrar que estes operam

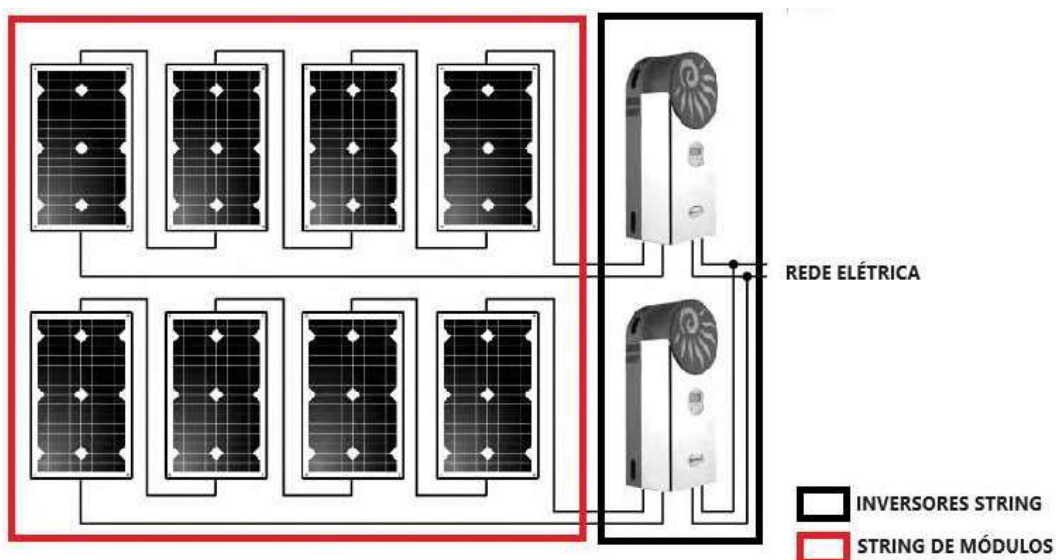
com tensões em CC na ordem de 30 V, a qual varia de acordo com a potência do módulo, mas que permite que não seja necessário o uso de proteções adicionais para sistemas que utilizam essa topologia (Colodette, 2019).

No entanto, apesar dos benefícios citados acima, em sistemas de grande porte, como UFV's, os custos com a utilização de microinversores é significativamente maior e não recomendados pois, estas usinas são projetadas de maneira que o impacto por sombreamento seja mínimo e, portanto, não deve haver perda significativa por sombras ao utilizar outras tecnologias de inversores, tornando este equipamento mais atraente em sistemas fotovoltaicos residenciais.

### 2.1.2.2 Inversores String

Para Coelho (2022), os inversores *strings* são responsáveis por processar a energia proveniente de vários módulos em série de acordo com a Figura 5. A conexão dos módulos em série é possível pois os módulos FV são limitados a tensões inferiores a 50 V, e são responsáveis pela formação das *strings* fotovoltaicas (Coelho, 2022).

Figura 5 – Sistema fotovoltaico com uma string por inversor



Fonte: Adaptado pela autora nas ideias de Villalva (2012).

Além do mais, ainda segundo Coelho (2022), diferente dos microinversores, nos inversores *string* o sistema de *maximum power point tracking* (MPPT), que permite o rastreamento do ponto de máxima potência do arranjo FV, é realizado de forma simultânea para todo o arranjo FV dos módulos associados em

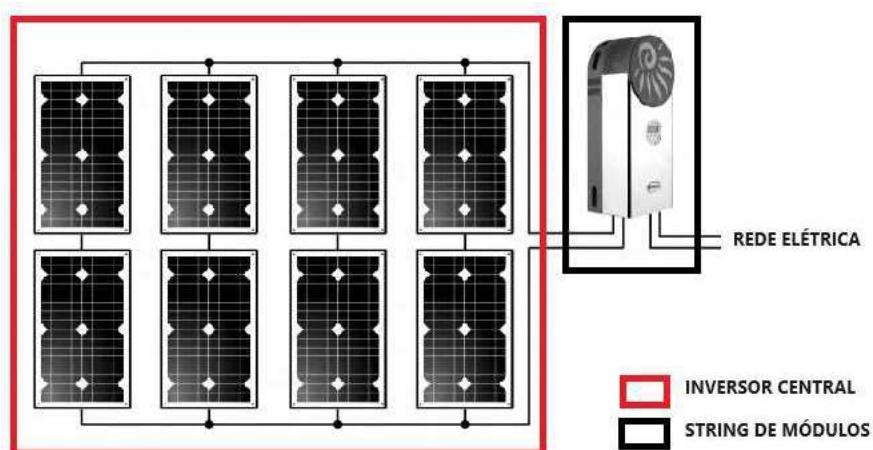
série. Dessa forma, a potência de saída da *string*, comparada com a máxima potência teórica disponível, pode ser reduzida devido aos sombreamentos parciais, assim como também pode ser afetada pela incompatibilidade entre módulos.

Convém lembrar que a conexão de vários módulos em série ocasiona elevadas tensões CC em sistemas fotovoltaicos, que utilizam inversores *string*, fazendo com que seja necessário a utilização de circuitos de proteção em corrente contínua, os quais devem estar contidos em um invólucro conhecido como *string box*. O adicional de proteção torna as plantas, com essa topologia de inversor, mais complexas, no entanto, o custo por *watt de pico* (R\$/Wp) é consideravelmente menor que o de microinversor, o que torna mais viável a sua implementação (Coelho, 2022).

### 2.1.2.3 Inversores Centrais

Os inversores centrais são caracterizados por processar a energia proveniente dos arranjos fotovoltaicos por meio da conexão das *strings* conectadas em paralelo, conforme a Figura 6. Estes possuem uma única entrada e conta com MPPT, que rastreia o ponto de máxima potência de todo o arranjo, o que ocasiona a perda de geração por sombreamento quando os módulos estão sujeitos a sombreamentos parciais ou quando há a incompatibilidade desses módulos (Coelho, 2022). Além disso, são mais indicados para usinas de grande porte, e costumavam ser a topologia de planta mais usual, mas devido ao crescimento da GD e à redução da variação do custo por watt de pico entre as diversas configurações, os inversores *string* se tornaram predominante no mercado (Coelho, 2022).

Figura 6 – Sistema fotovoltaico com uma *string* para um único inversor



Fonte: Adaptado pela autora nas ideias de Villalva (2012).

### 2.1.3 Estruturas de fixação dos módulos fotovoltaicos

De acordo com Souza (2018, p.9), “A estrutura de sustentação dos módulos utiliza materiais comuns e tais como madeira, aço galvanizado ou alumínio. Além do suporte, a estrutura deve permitir o agrupamento e interligação dos módulos de forma simples.” Estas variam de acordo com o local em que será feita a montagem do sistema FV.

Para os sistemas FV montados em telhas, são tipicamente utilizados ganchos os quais são fixados no caibro, e então estes ganchos são fixados a um trilho que deve acomodar as placas fotovoltaicas conforme a Figura 7 (Insol, 2021). Já as estruturas para usinas de geração centralizada, segundo Rodrigues (2023, p.28) “são estruturas metálicas que podem ser do tipo fixas ou seguidoras solares.” Os sistemas que utilizam sistemas de rastreamento solar, são comercialmente chamados de *trackers* e podem ser visualizados na Figura 8.

Figura 7 – Componentes para fixação de módulos fotovoltaicos em telhas de barro usando gancho



Fonte: Portal Solar (s.a).

De acordo com Alves (2021, p.74), “Os sistemas fixos, utilizam alguns dados de irradiação solar por região, e posicionam a placa em um ângulo que seria a melhor média anual para a geração de energia.” Enquanto, os sistemas de seguidores utilizam tecnologias como sistemas de posicionamento global para definir latitude, longitude, horário do nascer do sol, estações do ano e outros dados. Apesar de mais eficientes, os sistemas com seguidor solar são sensíveis e de alto custo (Alves, 2021).



Figura 8 – Fixação de módulos fotovoltaicos em sistemas com rastreamento solar



Fonte: Portal Solar (2023).

#### **2.1.4 Cabos e condutores**

Além dos componentes citados acima, uma planta de geração solar FV, é constituída por outros itens, como os cabos elétricos e condutores elétricos, como pode ser visto na Figura 9. Para este tipo de instalação é necessário o uso de condutores elétricos com requisitos diferentes dos cabos convencionais (Casarin, 2023). Assim, regulamenta o conjunto de normas, que define que as instalações devem ter como premissa, características básicas da proteção contra choque elétrico no usuário, proteção contra efeitos térmicos e incêndio, além de proteções contra sobrecorrente, sobretensão e garantir a capacidade de seccionamento (Canal Solar, 2019).

Figura 9 – Aplicações dos cabos elétricos em sistemas FV



Fonte: Canal Solar (2019).



Ademais, é de extrema importância ressaltar que, conforme a ABNT NBR 16612 (2020), que aborda os requisitos de projeto para Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos, os requisitos para os condutores em construções fotovoltaicas é que estes devem ser de cobre estanhado, têmpera mole e estar conforme a ABNT NBR NM 280, que classifica os condutores de cabos isolados, considerando a classe de encordoamento igual a 5 (Moreno, 2019). Além disso, sobre cabos em usinas solares pode-se afirmar que:

A energia gerada por uma usina solar fotovoltaica varia ao longo do dia com a variação da irradiância solar. Em condições ideais, a potência máxima é geralmente gerada por volta do meio-dia, quando a irradiância é máxima. Portanto, o carregamento em cabos de energia em usinas solares fotovoltaicas é de magnitude diferente em diferentes momentos do dia e do ano, ou seja, é de natureza cíclica (Grigoletto, 2022, p.26).

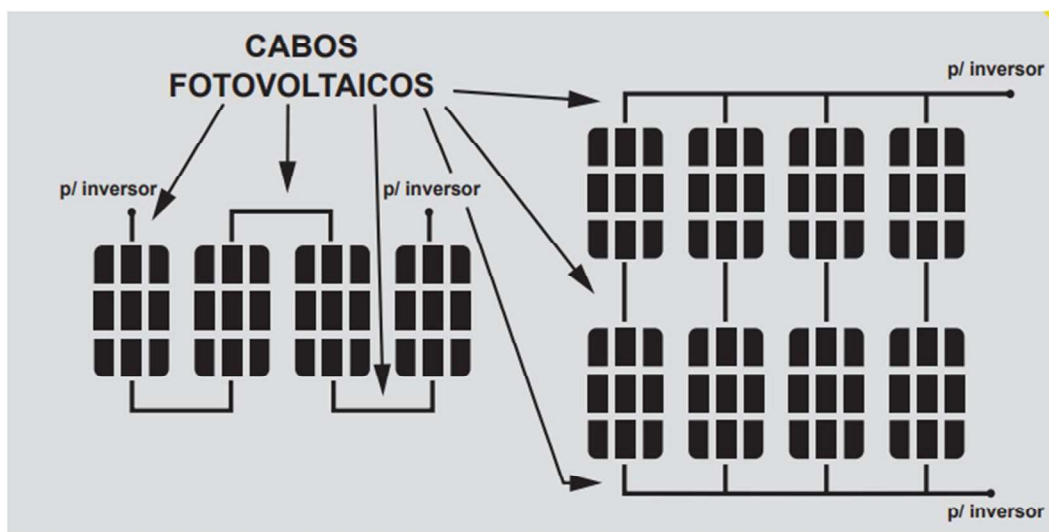
Em plantas de geração solar, os níveis de irradiância considerados em cálculos e projetos, levando em consideração o fator que o céu está limpo e ao meio-dia, chega a  $1000 \text{ W/m}^2$  (Melo, 1993). Dessa forma, é necessário a utilização de cabos elétricos com proteção contra a radiação ultravioleta e para suportar temperaturas extremas, de forma a evitar o seu ressecamento e sua deterioração (Villalva, 2012). Nos casos em que as instalações são abrigadas em calhas ou eletrodutos, podem ser utilizados cabos com isolamento convencional (Villalva, 2012).

Dessa forma, pelo fato do sistema fotovoltaico ser constituído por cabos solares, cabeamento em corrente contínua e alternada é de extrema importância entender o funcionamento desses cabos e condutos e compreender como se comportam os condutores nestas instalações. Portanto, nos subtópicos a seguir serão apresentados requisitos normativos de instalação e dimensionamento, além de premissas que devem ser seguidas para que não haja danos aos equipamentos, além de garantir a continuidade do serviço de geração de energia elétrica.

#### *2.1.4.1 Cabos solares*

De acordo com Villalva (2012, p. 94), “O acesso à eletricidade do módulo fotovoltaico dá-se através de dois cabos elétricos conectados à caixa de junção e com terminais elétricos padronizados para sistemas fotovoltaicos”. Ou seja, os cabos FV podem ser utilizados para conectar a série fotovoltaica a uma caixa de junção e para interligar os módulos fotovoltaicos, formando o que caracteriza uma série fotovoltaica, conforme a Figura 10 (Moreno, 2019).

Figura 10 – Aplicações dos cabos elétricos fotovoltaicos



Fonte: Moreno (2019).

Além disso, ainda conforme Villalva (2012, p.203), “os sistemas fotovoltaicos trabalham com tensões de corrente contínua mais elevadas do que as tensões de corrente alternada encontrada nas instalações elétricas convencionais, principalmente nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.” Portanto, estes cabos devem ter tensão máxima de operação de 1,8 kV (CC), conforme a ABNT NBR 16612 (2020). Convém lembrar que ao dimensionar estes cabos, é de extrema importância que, na fase do projeto e de instalação, seja respeitado o limite de tensão de operação do cabo, de forma que não diminua a sua vida útil e para que não provoque danos irreversíveis a isolação do cabo (Moreno, 2019).

Ademais, apesar da diferença existente em cabos convencionais para cabos fotovoltaicos, de acordo com Moreno (2019, p. 29):

a ABNT NBR 16690 permite o uso de cabos conforme as normas ABNT NBR 7286 e 7287[6] no lugar dos cabos ABNT NBR 16612, mas apenas nos trechos dos subarranjos ou arranjos fotovoltaicos, mantendo a obrigação exclusiva de cabos ABNT NBR 16612 nos trechos das séries fotovoltaicas (interligação entre módulos ou que conecta a série fotovoltaica a uma caixa de junção).

Por fim, o dimensionamento deste tipo de cabo, ocorre após a obtenção das correntes de projeto dos circuitos e suas seções são especificadas de acordo com a ABNT NBR 16690, e devem ser determinadas seguindo os critérios de capacidade de condução de corrente e considerando a queda de tensão. Deverá ser escolhida a maior seção entre os critérios abordados.

### 2.1.4.2 Cabos BT/CA

Em plantas de geração fotovoltaica conectadas a rede de distribuição de baixa tensão, as conexões elétricas são dimensionadas de acordo com normas que atendam requisitos de instalação elétrica de baixa tensão (Villalva, 2012). Assim, os Cabos BT/CA, vistos na Figura 11, são caracterizados por constituir as conexões que saem do inversor do lado CA (Moreno, 2019).

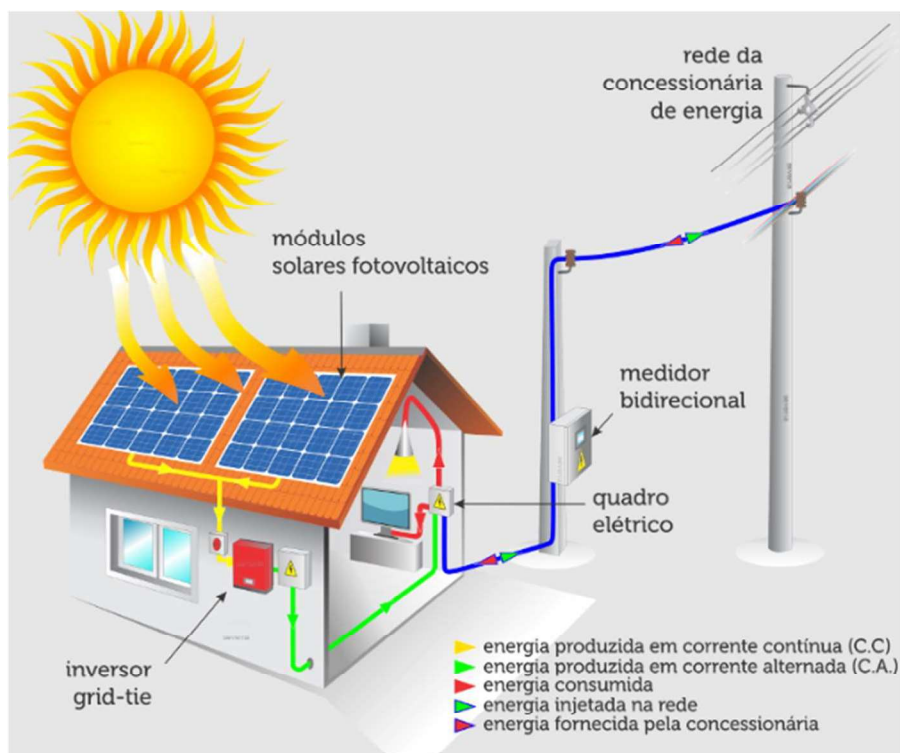
Figura 11 – Especificações técnicas de cabos da classe de tensão 0,6/1kV



Fonte: Ferreira (2020)

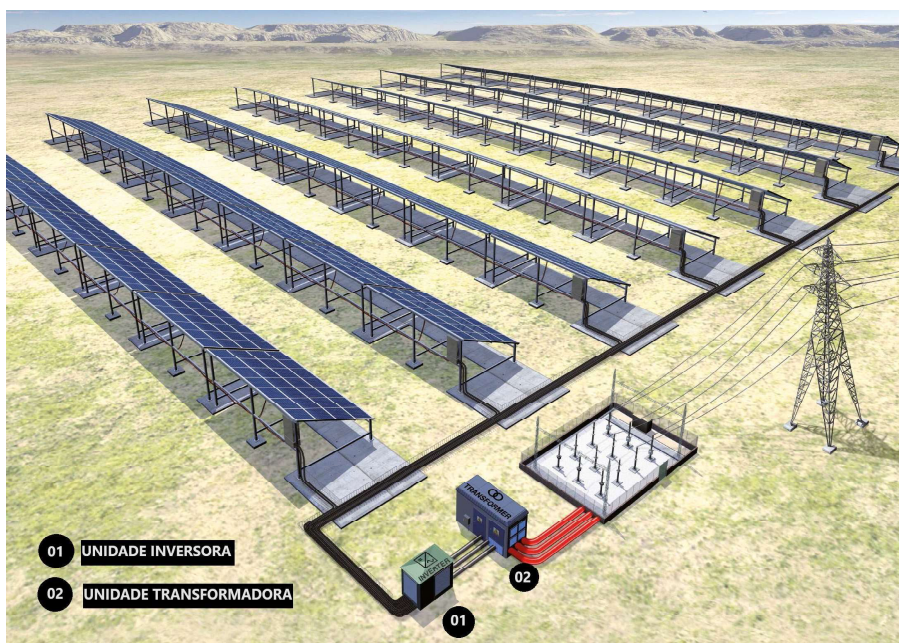
Nas plantas de GD sempre haverá a utilização dos cabos BT/CA, sendo o trecho de utilização considerado entre o inversor e os quadros de distribuição de energia (QD), conforme a Figura 12, enquanto nas usinas de geração fotovoltaica centralizadas o uso desses cabos somente acontece em topologia de inversores descentralizados, conforme a Figura 13, no trecho entre as unidades inversora e transformadora.

Figura 12 – Diagrama esquemático energia solar *on-grid*



Fonte: Luz Solar (2021).

Figura 13 – Topologia de instalação descentralizada



Fonte: Adaptado pela autora nas ideias de Prysmian (2023).

Portanto, os condutores de baixa tensão em corrente alternada, não se diferenciam das aplicações convencionais em instalações elétricas em baixa tensão

para faixa de componentes CA em 0,6/1 kV e, portanto, devem atender os requisitos e exigências da ABNT NBR 5410:2008, que se refere às Instalações Elétricas em baixa tensão (Moreno, 2019).

## **2.2 Normas que se aplicam a geração solar fotovoltaica**

Devido ao aumento da implementação da energia gerada por fonte solar fotovoltaica, houve a necessidade de regulamentar e estabelecer critérios e requisitos para este modelo de instalação. Normas nacionais e internacionais foram desenvolvidas para estabelecer esses requisitos e, assim, foram desenvolvidas tanto para critério de requisitos de projetos como para definir componentes das instalações elétricas. A seguir serão descritas algumas normas que são aplicadas a projetos de geração solar fotovoltaica.

### **2.2.1 Normas nacionais**

Durante o desenvolvimento deste trabalho são utilizadas as normas a seguir da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), para atender os objetivos especificados anteriormente. Para o dimensionamento de cabos de baixa tensão deve ser utilizada a norma que se aplica às instalações elétricas convencionais de baixa tensão: A ABNT NBR 5410:2008, a qual estabelece requisitos necessários para a concepção de uma instalação elétrica de baixa tensão de forma a garantir o bom funcionamento das instalações através da determinação das características a seguir: utilização para qual é prevista a instalação, exigências quanto a divisão da instalação, as influências externas que a instalação será submetida, além de riscos de interferências e os requisitos de manutenção (NBR 5410, 2008).

Ademais, outra norma fundamental é a ABNT NBR 16274:2014 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho, essa norma categoriza o comissionamento e a avaliação de sistemas fotovoltaicos no Brasil, dividindo-os nos ensaios de Categoria 1 e Ensaios de Categoria 2. A depender do tipo de topologia utilizada no projeto de uma UFV, testes como o de resistência de isolamento dos cabos, podem ser feitos de maneiras diferentes como será visto no próximo capítulo (NBR 16274, 2014).

Neste trabalho, também, está sendo utilizada a ABNT NBR 16690:2019 Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos – Requisitos de projeto, que tem como objetivo estabelecer requisitos de projeto das instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos, adentrando a tópicos que abordam sobre a disposição dos condutores, dispositivos de proteção elétrica, dispositivos de manobra e define os requisitos de aterramento e equipotencialização do arranjo fotovoltaico (NBR 16690, 2019).

Além disso, convém lembrar, como já mencionado no item 2.1.4, que os cabos utilizados nas instalações elétricas não devem ser iguais aos cabos utilizados nas instalações convencionais e, portanto, a ABNT NBR 16612:2020 Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura – Requisitos de desempenho, define todos os critérios necessários para que o condutor utilizado nas plantas de geração solar fotovoltaica esteja em conformidade normativamente (NBR 16622, 2020).

Por fim, também é utilizada a ABNT NBR 10899:2023 Energia solar fotovoltaica – Terminologia que abrange e define os termos técnicos relativos aos sistemas fotovoltaicos, essa norma é de fundamental importância para poder caracterizar os elementos utilizados na planta deste estudo de caso (NBR 10899, 2023).

### **2.2.2 Normas internacionais**

A norma IEC 62738:2023 *Design guidelines and recommendations for photovoltaic power plants*, tem como objetivo estabelecer diretrizes e recomendações para centrais geradoras fotovoltaicas (IEC 62738, 2023), Essa norma será utilizada como boas práticas na construção de usinas para o desenvolvimento deste trabalho.

Além disso, também será utilizada a IEC 60287 *Electric cables - Calculation of the current rating* como complementar ao uso da ABNT NBR 5410:2008, pois o dimensionamento de cabos em tensões CC e CA de até 5kV é dimensionado considerando que o cabo está sendo submetido a um fator de carga de 100%, ou seja, o condutor estaria submetido a sua temperatura máxima e portanto, seria um dimensionamento mais preciso dos cabos de baixa tensão (IEC 60287, 2023)

Portanto, sabendo que existem normas similares às adotadas em território nacional, é de fundamental importância compará-las e verificar os seus objetivos e quais metodologias são aplicadas, visto que uma norma internacional pode

complementar a nacional ou até mesmo adicionar parâmetros de projeto para garantir mais exatidão e precisão quando estes forem aplicados nas condições reais.

No próximo capítulo será abordado a estrutura para centrais geradoras fotovoltaicas com topologia de inversor *strings* e central, de forma comparativa, especificando suas diferenças e apontando seus benefícios bem como suas desvantagens.

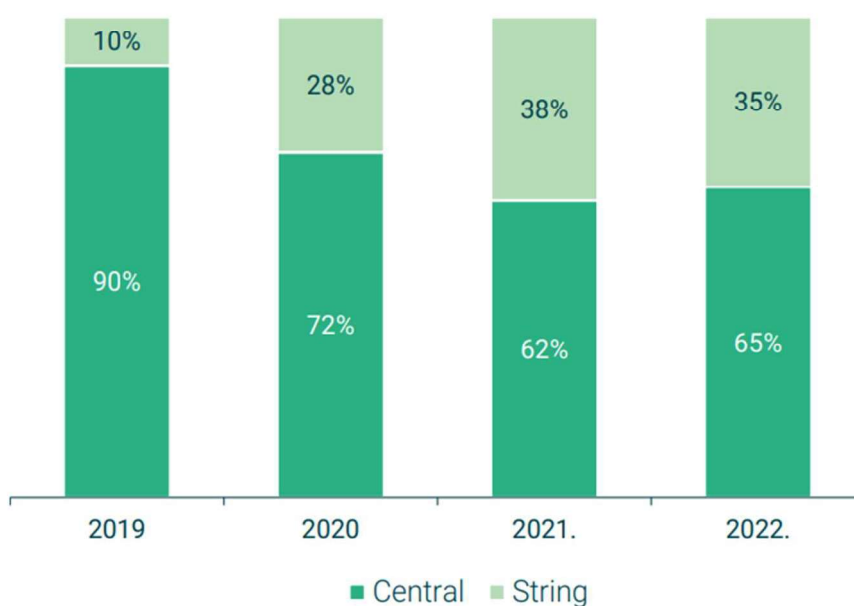


### 3 INVERSORES *STRINGS* X INVERSORES CENTRAIS: ANÁLISE COMPARATIVA

Durante o período que a Resolução Normativa (REN) nº 687, de novembro de 2015, da ANEEL, que estabeleceu novos modelos de compensação de créditos de energia através de consórcios e cooperativas foi promulgada, substituindo a REN nº 482, a topologia de plantas de geração solar fotovoltaica em usinas de minigeração remotas era restrita apenas ao uso entre inversor *string* ou inversor central, ou seja, em usina centralizada ou descentralizada, e somente a partir da substituição da REN nº 482 foi que o mercado de minigeração compreendeu as vantagens de ser utilizar topologias de inversores descentralizados, pois houve a percepção de que essas tecnologias de inversores permitem uma maior taxa de disponibilidade em paradas programadas (Henrique, 2022).

Já para a geração centralizada, a topologia central, como visto no Gráfico 2, é predominante, sendo os inversores mais utilizados nas centrais geradoras fotovoltaicas. No entanto, conforme aponta a pesquisa da Greener (2022, n.p), “os inversores *string* vem ganhando espaço. Sua participação avançou de 10% em 2019 para 38% em 2021”. Ainda segundo a Greener, cerca de 39% dos contratos para construção de UFVs entre os anos de 2021 e 2022 foram projetados para utilizar topologia de inversor *string*.

Gráfico 2 – Utilização de Inversores *string* e central entre 2019 e 2022 no Brasil



Fonte: Pesquisa Greener (2022).



Além do que foi mencionado anteriormente, por meio do comparativo entre a utilização de inversores *string* e central do Gráfico 2, pode-se perceber que por mais que haja um declínio na utilização de inversor central, o ano de 2022 marca um acréscimo da adoção de inversores central com relação ao ano de 2021, o que pode evidenciar que este tipo de inversor não está em desuso em usinas fotovoltaicas, mas sim que há fatores que impactam na escolha da topologia de inversor adotada para a construção das usinas. Dessa forma, a seguir são mostradas as características para cada topologia: com inversores *string* e central. Será evidenciado aspectos observando a operação, manutenção e instalações físicas destas topologias.

### **3.1 Planta de geração fotovoltaica com inversores *string***

As plantas de geração fotovoltaica que utilizam a topologia de inversor *string* possuem diversos MPPT's para que as *strings* do módulo possam ser conectadas diretamente ao inversor sem haver a necessidade do uso de caixas combinadoras de cabos CC. Estas caixas, em centrais geradoras fotovoltaicas, são denominadas de *combiner boxes* e possuem dispositivos de proteção contra sobrecorrente, seccionadores e dispositivos contra sobretensão, a depender do modelo, permitem que haja o monitoramento das variáveis de tensão, corrente e temperatura.

Usinas que utilizam a topologia de inversor *string* tornam o sistema mais flexível, pois ao ocorrer a falha em um inversor *string* não será afetada a operação geral da usina, porque a capacidade desses inversores não é grande (Deline, 2010; Chao, 2018; Mäki *et al*, 2012 *apud* Phap; Thuy Le, 2019). Além do mais, devido a existência dos vários MPPT's aplicados a cada uma das *strings* dos módulos, as perdas parciais por sombreamento e, conseqüentemente, uma maior eficiência energética são características de geração neste tipo de planta (Alawadhi *et al*, 2022).

Outro recurso presente nessa configuração de planta é a utilização de quadros de distribuição em corrente alternada (QDCA), os quais coletam as diversas saídas do inversor *string* e se conectam ao transformador de média tensão. Nas usinas solares fotovoltaicas de grande porte, os transformadores elevadores de tensão estão localizados nos eletrocentros, caracterizado por ser um sistema pré-montado constituído por recursos e funcionalidades de uma subestação abrigada em alvenaria (Phap; Thuy Le, 2019; Franco, 2013).

Além disso, a utilização do inversor *string*, por se tratar de um equipamento relativamente pequeno quando comparado ao inversor central, permite reduzir custos na instalação do equipamento, pois não há a necessidade do uso de guindastes e pessoas para auxiliar na alocação. No entanto, ao comparar um sistema fotovoltaico que faz o uso de inversores *string* a uma planta fotovoltaica de capacidade similar utilizando inversores centrais, nota-se que a taxa de custo de investimento poderá ser maior (Deline *et al*, 2010 *apud* Phap; Thuy Le, 2019).

Ademais, convém lembrar que para a equipe de Operação e Manutenção (O&M), em ocorrência de falhas será substituído o equipamento por um novo e a substituição ocorrerá no local da usina solar. No caso de inversores *strings* é possível que o proprietário reserve inversores com características técnicas semelhantes prevendo essas falhas, no caso de inversores centrais, devido ao alto custo para sua aquisição, e por suas estruturas não serem tão compactas fisicamente e necessitar de equipamentos especializados e um alto contingente de mão de obra para o seu transporte, dificultando sua troca em eventuais falhas (Phap; Thuy Le, 2019).

### **3.2 Planta de geração fotovoltaica com inversor central**

Os inversores centrais são comumente utilizados em usinas de grande porte por causa da sua simplicidade. No entanto, ao contrário da topologia com inversor *string*, em topologias de plantas com inversor central existe limitações devido ao MPPT centralizado, impactando na redução do rendimento energético através de sombreamentos ou incompatibilidade entre os módulos fotovoltaicos (IFC, 2015).

A utilização do inversor central é indicada para usinas de grande porte que possuem implementação de *strings* de módulos com as mesmas características, pois possuem somente de 1 a 2 MPPT's. Por outro lado, o uso desta topologia facilita o monitoramento de sistemas de controle, pois a quantidade de inversores necessários é menor do que ao utilizar inversor *string*, e, portanto, os painéis de controle devem ser reduzidos (Kröger-Vodde *et al*, 2010; Villarejo *et al*, 2011 *apud* Phap; Thuy Le, 2019).

Ademais, convém lembrar que o desempenho das plantas de geração fotovoltaica centralizada pode ser bastante reduzido, pois estes inversores concentram grandes quantidades de *strings* de módulos e, em caso de falhas, todas as *strings* terão sua operação interrompida (Phap; Thuy Le, 2019). Além disso, ao utilizar inversores centrais, as *strings* dos módulos devem ser conectadas em paralelo

com uma *combiner boxes*, o que permite reduzir custos com materiais elétricos, pois ao combinar as *strings*, é possível a entrada uniforme de cabos de baixa tensão CC, com seções bastante elevadas, nos inversores, quando comparadas às seções dos cabos fotovoltaicos das *strings* dos módulos (tungou, 2023).

Além do mais, em plantas de geração centralizada, utilizar a topologia de inversor central possibilita trabalhar com tensões de 690 V CA, que se enquadram no nível de baixa tensão devido ao curto trecho entre o inversor e o transformador, e, devido a redução da corrente CC em 2,5 vezes, é melhor transferir energia no lado CC ao invés do lado CA (Meywirth, 2021).

Em cenários em que a sobrecarga CC é alta, devido ao sobredimensionamento da potência de pico do arranjo fotovoltaico sobre a potência nominal do inversor (Souza, 2019), utilizar a topologia de inversor centralizada é mais vantajoso, pois o inversor *string* limita a potência quando ocorre o aumento da relação entre potência dos módulos e a potência do inversor, e a partir disso irá transmitir a energia CC por um trecho de longa distância até o transformador, o que atribui perdas elétricas no cabo. Enquanto isso, ao utilizar inversores centrais, primeiro será transmitido e depois será limitada a potência (Meywirth, 2021).

Um outro fator que é de extrema importância ser observado é que os inversores centrais são equipamentos de grande porte e podem ter um peso elevado, que influencia no aumento da troca de calor com o ambiente, fazendo com que seja necessário a utilização de uma base de concreto adicional para que seja utilizado um dispositivo que realize o resfriamento de forma a diminuir o calor gerado pelo ambiente, o qual influencia na operação do inversor (Phap; Thuy Le, 2019).

### **3.3 Metodologia**

A seguir serão descritos todos os processos utilizados para realizar a comparação do custo da instalação elétrica de baixa tensão de uma planta de geração centralizada, utilizando topologia de inversor central e inversor *string*. Deve ser realizada uma pesquisa para descrever os componentes da instalação e quantificá-los de acordo com a especificidade de cada planta, e através do levantamento destes dados, pode-se levantar o custo para cada cenário e definir o impacto no custo total da usina.

A Figura 14 sintetiza, por meio de um fluxograma, os métodos utilizados para atingir os objetivos específicos e gerais deste trabalho.

Figura 14 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

### 3.3.1 Caracterização dos cenários projetados

Esta etapa consiste em caracterizar e definir como foram desenvolvidos os dois *layouts* da planta: o cenário com inversor *string* e o cenário com inversor central.

Para este estudo será caracterizado apenas um subcampo da usina localizada em Pernambuco, este subcampo teve sua potência definida por premissas da empresa contratante do projeto básico. Portanto, todos os dimensionamentos foram feitos a partir destas premissas que serão abordadas no próximo capítulo deste trabalho.

#### 3.3.1.1 Caracterização do layout com inversor *string*

Inicialmente, a partir das premissas de projetos da empresa contratante, foram definidas as características da planta que é desenvolvida na configuração eletromecânica.

A configuração eletromecânica, foi desenvolvida em uma planilha no *Microsoft Excel*, antes do desenvolvimento do *layout* do projeto básico, e contém dados de configuração das *strings* dos módulos onde são representadas:

- a) Potência do inversor;
- b) Quantidade de inversores;
- c) Quantidade de *strings* dos módulos por inversor;
- d) Quantidade de módulos por *strings* dos módulos.

A partir da configuração eletromecânica, foi desenvolvido um *layout* com topologia de inversor *string* e definido as especificações técnicas dos equipamentos utilizados.

O *layout* foi desenvolvido no software *Autodesk AutoCad*, e nele é representado a posição dos equipamentos contidos na usina: inversores *string*,

eletrocentros e os *trackers*. A partir disso, foi desenvolvida a rede de baixa tensão por meio dos encaminhamentos dos cabos BT/CC e representado a disposição dos cabos fotovoltaicos. Além disso, para os dimensionamentos dos condutores BT/CC e FV, e para a especificação dos cabos elétricos, a empresa construtora adotou os requisitos e premissas da NBR 5410:2008, assim como a aplicação complementar das normas NBR 16612:2020 e IEC 60287 descritos nas alíneas a seguir:

a) Método de instalação

De acordo com a NBR 5410:2008, os métodos para referência utilizados nas instalações elétricas, são métodos de instalação, indicados na IEC 60364-5-2, para os quais a capacidade de condução de corrente foi determinada por ensaio ou por cálculo (NBR 5410, 2008).

Em centrais geradoras fotovoltaicas, para instalação de condutores elétricos em baixa tensão, de forma subterrânea, é utilizado o método de referência D, que se refere à instalação de cabo unipolar ou multipolar diretamente enterrado, com proteção mecânica adicional conforme a Tabela 33 da NBR 5410:2008, enquanto nos trechos em que há a exposição do cabo solar à irradiação solar, deve ser utilizado o método de instalação apresentado no item C.1 do anexo C da NBR 16612:2020, que se refere a cabo ao ar livre exposto a radiação solar.

b) Critério da capacidade de condução

O critério da capacidade de condução nada mais é do que a determinação da menor seção nominal de forma que a corrente de projeto esteja em condições ideais para que não provoque aquecimento excessivo nos condutores. Este critério, conforme a NBR 16690:2019, para cabos expostos à irradiação solar, os quais estão próximos aos arranjos fotovoltaicos, devem ter como referência para suas seções mínimas de condutores, a Tabela 5 da NBR 16690:2019 que apresenta as mínimas capacidades de corrente dos circuitos, e as tabelas apresentadas no anexo C da NBR 16612:2020.

Para os demais cabos, deve se ter como referência a NBR 5410:2008, onde são encontradas as tabelas de capacidade de condução de corrente, para os projetos de geração solar fotovoltaica, conforme os métodos de instalação citados, deve ser utilizada a Tabela 36, caso a isolação do cabo seja PVC ou a Tabela 37 quando a isolação do cabo é HEPR ou XLPE. Além disso, deverá ser consultada a NBR 16690:2019, como referência a mínima capacidade de corrente dos circuitos.

c) Critério da queda de tensão

O critério da queda de tensão é um fator que intervém no dimensionamento dos cabos, suas seções nominais são determinadas por este e pelos demais critérios, pois o dimensionamento dos cabos afeta na queda de tensão em condições de carga.

A ABNT 16612:2020, define que, em condições de carga máxima, a queda de tensão em arranjos fotovoltaicos não deve ser superior a 3% da sua tensão em condições do ponto de máxima potência.

d) Critério de curto-circuito

Este critério consiste em dimensionar os cabos a partir do valor de curto-circuito do sistema. É considerado para o dimensionamento dos cabos fatores como temperatura do cabo, tempo de atuação da proteção e os esforços térmicos que o cabo é submetido.

Utilizando os critérios apresentados, o cálculo de dimensionamento dos condutores foi desenvolvido no *Software Excel* e serão apresentados os resultados conforme sua aplicação no Capítulo 4 deste trabalho.

### 3.3.1.2 Caracterização do layout com inversor central

Para o desenvolvimento do *layout* com topologia de inversor central foram utilizadas as mesmas premissas de geração adotada para o desenvolvimento do cenário com inversor *string*. A partir das premissas para desenvolvimento do projeto foi feita uma nova planilha de configuração eletromecânica, adequando os parâmetros a seguir:

- a) Potência do inversor central;
- b) Quantidade de inversores;
- c) Quantidade de *strings* dos módulos por inversor.

Estes parâmetros são afetados principalmente devido a diferença de potência de saída do inversor *string* para o inversor central.

Para o desenvolvimento da topologia de inversor central foi adotado, como requisito de projeto, a utilização de *combiner boxes*, visando garantir a proteção dos equipamentos e condutores CC que formam as *strings* dos módulos, além de reduzir custos ao unificar as *strings* dos módulos em cabos BT/CC de maiores seção. Dessa forma, após definir a *combiner box* para o projeto, foi definido a quantidade de *strings*

associadas à *combiner box* e, a partir disso, foi desenvolvido o novo *layout* com inversor central.

Por fim, utilizando o *AutoCad*, foi feito o rearranjo da planta, que foi inicialmente projetada com topologia de inversor *string*, e feita a locação das *combiner boxes* com as suas respectivas *strings* dos módulos, que são representadas no *layout* por delimitações que contém os *trackers* pertencentes a cada *combiner box*, e também foi definido a localização do eletrocentro, que em topologias de plantas centralizadas é onde os inversores centrais estão posicionados.

Após a locação dos equipamentos, foi traçado o encaminhamento dos condutores da rede de baixa tensão, incluindo a disposição dos cabos fotovoltaicos. A instalação elétrica de baixa tensão, diferente do *layout* desenvolvido com inversor *string*, utiliza cabos BT da classe de tensão 1,8 kV CC. Esses cabos também foram dimensionados seguindo as mesmas normas e requisitos da topologia com inversor *string* e serão apresentados os resultados posteriormente.

### **3.3.2 Quantitativo de materiais**

Esta etapa consiste em especificar e atribuir a quantidade dos materiais e componentes elétricos da rede de baixa tensão para as duas configurações de topologias da usina.

Como cada topologia se constitui de configurações de *layouts* diferentes e, portanto, os materiais podem apresentar diferenças nas suas especificações de acordo com cada cenário, este levantamento deverá ser feito de forma individualizada e especificando cada componente referente a cada configuração de *layout* da usina.

Inicialmente, deve ser desenvolvido um memorial de cálculo no *Excel* para calcular a quantidade de materiais utilizados. Neste memorial deve conter uma lista com os equipamentos e componentes necessários conforme obrigatoriedade normativa para o tipo de instalação.

Além disso, o memorial foi feito totalmente baseado nos *layouts* que foram desenvolvidos, no entanto, como pode haver variações na forma de instalação durante o projeto executivo, foram previstas folgas (unidades sobressalentes) no cálculo do quantitativo de cada componente, de forma que o projeto possa ser bem desenvolvido apesar de condições adversas.

Ademais, no caso em que foi necessário obter os comprimentos das valas, foi necessário utilizar o *AutoCad*, onde por meio da ferramenta *AutoLisp* do *AutoCad*, a qual possui um recurso que ao selecionar diversas linhas permite a soma total dos comprimentos destas linhas, e como as valas são representadas por linhas, pôde-se obter os comprimentos lineares tanto na direção X quanto na direção Y. Convém lembrar que as valas são de espessuras diferentes, variando com a seção dos cabos e a quantidade de cabos por vala em cada trecho, e, portanto, o levantamento foi feito de forma individual por tipo de vala.

Além disso, os comprimentos lineares das valas, obtidos no *AutoCad*, também foram utilizados para obter o comprimento dos condutores de baixa tensão e para o comprimento dos eletrodutos que são necessários quando os cabos estão expostos à irradiação solar. Vale lembrar que a seção dos eletrodutos deve ser dimensionada a partir da seção dos condutores, considerando a taxa de ocupação de até 53% a depender da quantidade de condutores no eletroduto, conforme NBR 5410:2008.

Para obter o comprimento dos condutores de baixa tensão e dos eletrodutos, também, deve ser prevista uma folga para que se considere pontos de subida a partir da vala, pois há uma profundidade estabelecida que foi definida em projeto conforme a NBR 5410:2008, que diz que como forma de prevenção a efeitos de movimentação de terra, os cabos devem ser instalados pelo menos a 0,70 m da superfície do solo, e quando houver travessias de vias que dão acessos a veículos a pelo menos 1 m.

A partir disso, foi possível preencher o memorial de cálculo e obter as quantidades finais necessárias para a construção da rede elétrica de baixa tensão da usina, tanto para o cenário com inversor *string* quanto para o cenário com inversor central.

### **3.3.3 Levantamento de custos**

O levantamento de custos também será realizado por meio de uma planilha no *Microsoft Excel*, onde serão apresentadas por meio de tabelas os custos referentes a cada componente que será abordado, diferenciando-os de acordo com a topologia de inversor. Os custos serão baseados na Tabela Unificada Seinfra de 2023, a qual uniformiza e padroniza custos de serviços de engenharia relativos a obras de



edificação, saneamento, rodovias, portos e ferrovias no Estado do Ceará. Quando não houver a presença do material especificado na base de dados da tabela Seinfra, os custos destes materiais serão adotados com base em orçamentos, referentes ao ano de 2023, realizados pela empresa construtora com as empresas fornecedoras de materiais elétricos.

## 4 ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA ENTRE INVERSORES CENTRAIS E *STRING*

Neste capítulo será caracterizada a usina fotovoltaica deste estudo de caso e em seguida serão apresentadas as duas propostas de *layout* para a usina bem como as especificações de materiais e equipamentos que foram determinados para compor o projeto da usina.

### 4.1 Caracterização do complexo fotovoltaico

O complexo fotovoltaico estará situado geograficamente nas coordenadas 8°06'17.3"S 39°20'24.2"W no município de Terra Nova no Estado de Pernambuco, e tem uma área total de 4.685.856 m<sup>2</sup>. O complexo foi projetado para que sua potência nominal seja de 90 MW distribuídos por 3 parques fotovoltaicos que representam cada usina, as quais são formadas cada uma por 5 subcampos contendo os eletrocentros, que são responsáveis por abrigar transformador elevador, transformador auxiliar, cubículo de baixa tensão e média tensão.

Além disso, o gerador fotovoltaico será composto por 165.888 módulos FV de silício monocristalino, bifaciais, com potências de 680, 685, 690 e 695 Wp do modelo TOPBiHiKu7, da fabricante Canadian Solar. Já a fixação dos módulos será feita nas estruturas de suporte em seguidores solar de eixo único horizontal de duas linhas. Serão utilizados 1.728 *trackers* no total.

A maioria dos trechos dos cabos de baixa tensão, são com os cabos instalados diretamente enterrados no solo. No entanto, em áreas onde esses cabos cruzam caminhos destinados à circulação de veículos, como carros e caminhões, é recomendado que sejam instalados em eletrodutos revestidos de concreto.

Ademais, para realizar o quantitativo da rede de baixa tensão, é utilizado somente um subcampo de uma usina do complexo fotovoltaico. Este subcampo possui sua potência nominal afetada pelo tipo de configuração eletromecânica definida pela empresa contratante, a qual variou conforme a topologia de inversor da planta e será visto nos tópicos a seguir.

A quantidade de inversores varia conforme o tipo de topologia adotada, no entanto, como o cenário definido para a construção foi o *layout* com inversor central, serão utilizados 90 inversores de 1.1 MVA cada da fabricante Sungrow.

#### 4.1.1 Caracterização do cenário com inversor *string*

A Tabela 1 apresenta as premissas de projetos adotadas para desenvolvimento do cenário com inversor *string* em um subcampo de uma usina do complexo fotovoltaico, a partir dela é possível desenvolver a configuração eletromecânica.

Tabela 1 – Premissas do projeto para a topologia com inversor *string*

PREMISSAS DO PROJETO	
Nº MÓDULOS/TRACKER	96
Nº DE MÓDULOS POR STRING	32
PREMISSA DE POTÊNCIA NOMINAL DO SUBCAMPO	5,77 MW

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

Na Tabela 2, pode-se observar os parâmetros da configuração eletromecânica para o inversor *string*. Para esta configuração foram definidos 10 inversores cada, um com 16 *strings* e 10 inversores, com 17 *strings*, totalizando 20 inversores neste subcampo, onde cada um dos inversores conta com a potência de 325 kVA. Além disso, foi definido que a *string* é composta por 32 módulos de 685 Wp, a partir disso pôde-se obter o número de módulos por *string*. Além disso, cada *tracker* é composto por 96 módulos, sendo 48 módulos por linha, totalizando em 3 *strings* de módulos por *tracker*, por meio disso foi possível calcular o número de *trackers* por quantidade de *strings* no inversor e então obteve-se a quantidade total de 110 *trackers* para este subcampo desta usina.

Tabela 2 - Configuração eletromecânica utilizando inversor *string*

QUANTIDADE DE STRINGS DE MÓDULOS POR INVERSOR	QUANTIDADE DE INVERSORES	QUANTIDADE DE MÓDULOS				QUANTIDADE DE TRACKERS
		680 Wp	685 Wp	690 Wp	695 Wp	
16	10	-	512	-	-	5,33
17	10	-	544	-	-	5,67
TOTAL	20	0	1.056	0	0	11

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

Na Tabela 3, por meio da configuração eletromecânica, foi possível obter a potência expressa em MegaWatt pico (MWp) para o subcampo, e na Tabela 4 foi possível resumir a potência instalada do eletrocentro que foi anteriormente definida na Tabela 1.

Tabela 3 – Resumo da potência pico por inversor e eletrocentro - cenário com inversor *string*

QUANTIDADE DE STRINGS DE MÓDULOS POR INVERSOR	POTÊNCIA TOTAL (MWp)				
	POR INVERSOR				POR ELETROCENTRO
	680 Wp	685 Wp	690 Wp	695 Wp	
16	-	0,351	-	-	3,51
17	-	0,373	-	-	3,73
<b>TOTAL</b>				7,23	

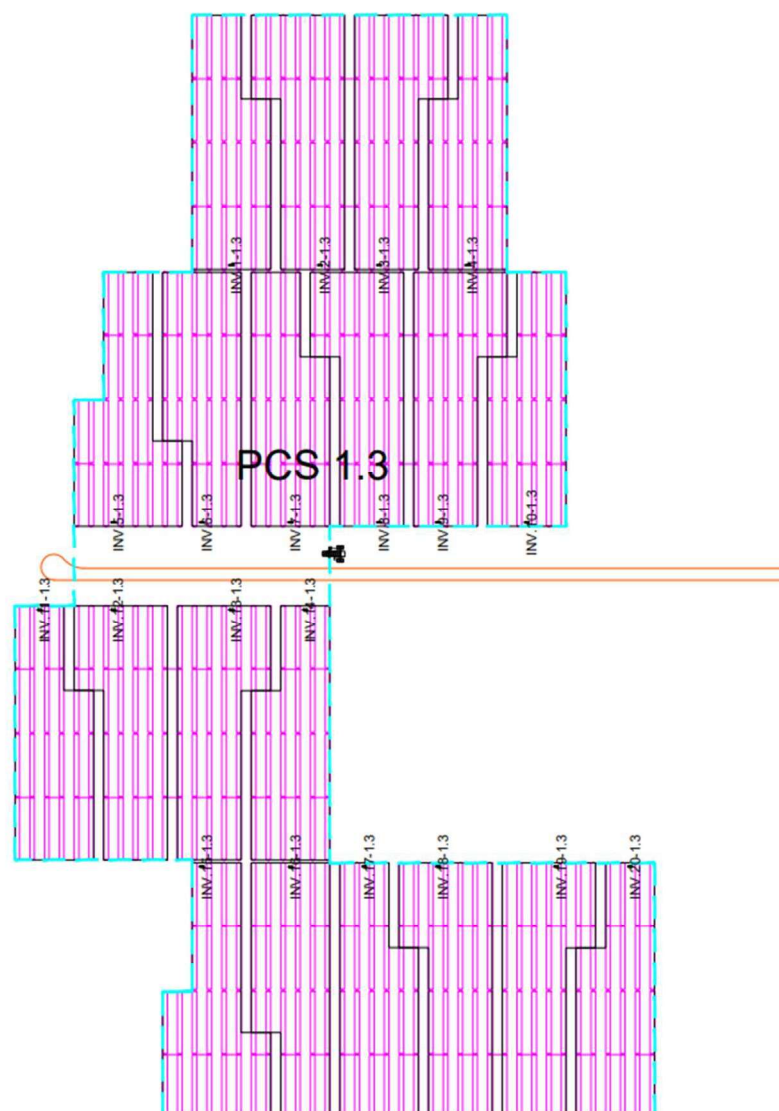
Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

Tabela 4 – Resumo da potência nominal por inversor e eletrocentro - cenário com inversor *string*

QUANTIDADE DE STRINGS DE MÓDULOS POR INVERSOR	POTÊNCIA TOTAL (MW)				
	POR INVERSOR				POR ELETROCENTRO
	680 Wp	685 Wp	690 Wp	695 Wp	
16	-	0,289	-	-	5,77
17	-	0,289	-	-	
<b>TOTAL</b>				5,77	

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023)

A partir da definição da quantidade dos equipamentos, foi desenvolvido o *layout* da planta utilizando inversor *string* no *Autocad*, como visto na Figura 15. Neste *layout* é definida as posições dos inversores *strings*, o eletrocentro e os *trackers*.

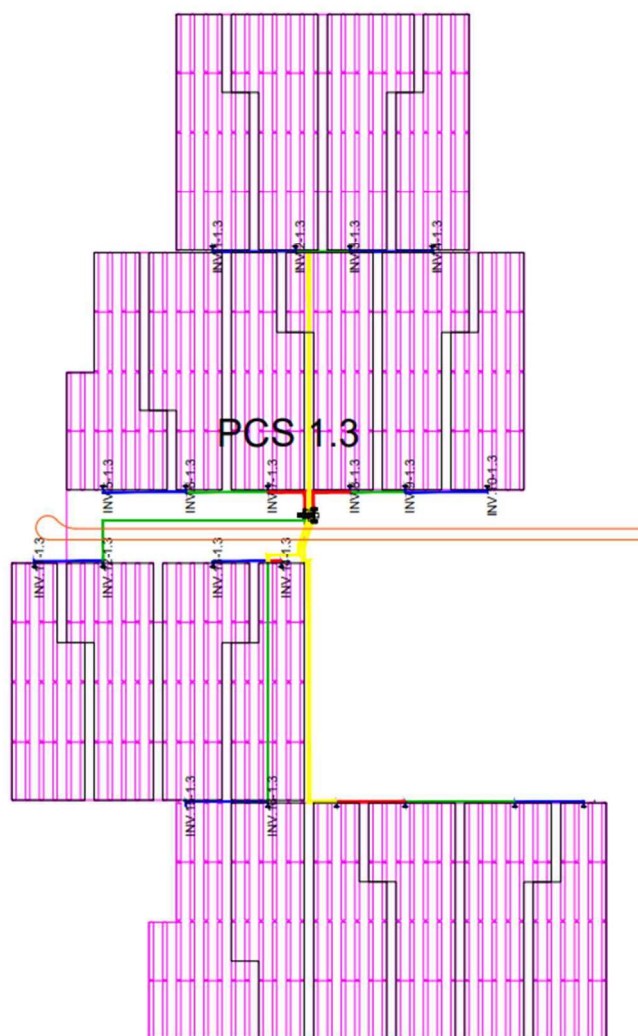
Figura 15 – *Layout* do subcampo com inversor *string*

Fonte: Empresa construtora (2023).

Além disso, devido a definição das posições dos equipamentos na planta, foi desenvolvido o encaminhamento dos cabos BT/CA conforme a Figura 16, os quais tiveram como premissa de instalação o método de instalação D da NBR 5410:2008, sendo diretamente enterrado em valas, exceto nos trechos em que houver travessias de acessos. Portanto, a rede de baixa tensão foi desenvolvida de forma totalmente subterrânea com valas contendo no máximo 4 circuitos por valas com uma profundidade de 0,7 m do solo. Estas valas são responsáveis por acomodar os cabos que fazem a conexão entre os inversores *string* ao QDCA, que fica localizado nos

eletrocentros. Desta forma, utilizando os parâmetros mostrados na Tabela 5 e sabendo que na saída desses inversores o cabo é da classe de tensão 0,6 /1 kV CA, os cabos foram dimensionados, conforme os requisitos normativos da NBR 5410:2008.

Figura 16 – Distribuição de valas do subcampo com inversor *string*



Fonte: Empresa construtora (2023).

Tabela 5 – Dados de entrada para dimensionamento dos condutores BT/CA

DADOS DE ENTRADA PARA DIMENSIONAMENTO DOS CABOS BT/CA	
TENSÃO NOMINAL (kV)	0,8
COS ( $\phi$ )	0,95
FREQUÊNCIA (Hz)	60
DISPOSIÇÃO DA INSTALAÇÃO	DIRETAMENTE ENTERRADO
DISPOSIÇÃO DA LINHA	TRIFÓLIO
MATERIAL CONDUTOR	ALUMÍNIO
Nº MÁXIMO DE CIRCUITOS POR VALA	4
RESISTIVIDADE TÉRMICA DO SOLO (K.m/W)	3
TEMPERATURA DO SOLO (°C)	35
DISTÂNCIA ENTRE CIRCUITOS (m)	0,5
PROFUNDIDADE DOS CONDUTORES (m)	0,7

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

A partir das premissas apresentadas nas tabelas anteriores, foi dimensionada a seção dos condutores BT/CA e resumidas na Tabela 6. A seção será a mesma para todos os cabos dos inversores e foi dimensionada para que seja necessário utilizar apenas um cabo por fase.

Tabela 6 – Dados dos condutores BT/CA

DADOS DOS CONDUTORES BT/CA	
DESCRIÇÃO	Nº DE CABOS/FASE
400 mm <sup>2</sup>	1

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

Além das considerações anteriores, através da configuração eletromecânica e da disposição dos *trackers* no *layout*, foram definidos os formatos das delimitações que estabelecem as *strings* dos módulos de cada inversor para o subcampo deste estudo de caso. Pode-se obter 12 diferentes delimitações, as quais definem a disposição dos *trackers*, dos módulos fotovoltaicos e dos inversores *string*, com 16 e 17 *strings* de módulos, e a partir destas delimitações e das premissas para o encaminhamento destes cabos mostrados na Tabela 7, foi possível realizar o dimensionamento dos cabos fotovoltaicos, os quais também foram dimensionados conforme requisitos normativos da NBR 5410:2008 e NBR 16612:2020.

No entanto, diferente dos cabos BT/CA, para os cabos FV foi previsto adotar dois métodos de instalação: inicialmente, o encaminhamento dos cabos FV das

*strings* dos módulos percorre toda a estrutura de fixação dos módulos, e somente um pequeno trecho entre o *tracker* e a localização em que o inversor foi definido para estar fixado, é onde o cabo será diretamente enterrado em eletroduto. Para o trecho em que o cabo é enterrado em eletroduto, deve haver no máximo 3 circuitos de *strings* dos módulos no eletroduto, e este deve estar a uma distância de 0,5 m do nível do solo.

Tabela 7 – Dados de entrada para dimensionamento dos condutores FV – cenário com inversor *string*

DADOS DE ENTRADA PARA DIMENSIONAMENTO DOS CABOS FV		
	680 Wp	1.254,4
TENSÃO NOMINAL DA STRING PARA CADA POTÊNCIA DE MÓDULO (V)	685 Wp	1.260,8
	690 Wp	1.267,2
	695 Wp	1.273,6
FATOR DE SEGURANÇA		1,25
MATERIAL CONDUTOR		COBRE ESTANHADO
DISPOSIÇÃO DA INSTALAÇÃO		ELETRODUTO ENTERRADO
Nº MÁXIMO DE CIRCUITOS POR ELETRODUTO		3
Nº MÁXIMO DE ELETRODUTOS POR VALA		2
PROFUNDIDADE DOS CONDUTORES (m)		0,5

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

Desta forma, utilizando as premissas adotadas para desenvolvimento da configuração da usina, obteve-se a seção dos condutores FV que está sintetizada na Tabela 8.

Tabela 8 – Dados dos condutores FV – cenário com inversor *string*

DADOS DOS CONDUTORES FV	
DESCRIÇÃO	Nº DE CABOS/FASE
10 mm <sup>2</sup>	1

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

#### 4.1.2 Caracterização do cenário com inversor central

Para o cenário com inversor central, é apresentado na Tabela 9 os dados de entrada utilizados para o desenvolvimento da configuração eletromecânica com inversor central.



Tabela 9 – Premissas do projeto para a topologia com inversor central

PREMISSAS DO PROJETO	
Nº MÓDULOS/TRACKER	96
Nº DE MÓDULOS POR STRING	32
PREMISSA DE POTÊNCIA NOMINAL DO SUBCAMPO	6,60 MW

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

Com relação ao cenário com inversor *string* pode-se observar que a potência nominal do subcampo variou. Essa mudança reflete na quantidade total de módulos e na potência dos módulos, como é visto na Tabela 10 e na Tabela 11. A configuração eletromecânica é vista nestas duas tabelas, sendo a Tabela 10 utilizada para sintetizar os dados referente as *combiner boxes*, que são adotadas para a topologia com inversor central. As *combiner boxes* foram projetadas para que agrupem as *strings* e sejam responsáveis pela sua proteção e seu encaminhamento, por meio de cabo BT/CC da classe de tensão 0,8/1 kV CC. Já a Tabela 11 é utilizada para resumir a quantidade de equipamentos com relação a cada inversor, além disso foi adotado para elaboração do projeto a utilização de 6 inversores com 1.1 MVA de potência nominal cada.

Tabela 10 – Configuração eletromecânica das *combiner boxes* para o cenário com inversor central

QUANTIDADE DE STRINGS DE MÓDULOS POR COMBINER BOX	QUANTIDADE DE COMBINER BOXES	QUANTIDADE DE MÓDULOS				QUANTIDADE DE TRACKERS
		680 Wp	685 Wp	690 Wp	695 Wp	
12	24	-	-	384	-	4,00
15	4	-	-	480	-	5,00
TOTAL	28	0	0	864	0	9,00

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

Tabela 11 – Configuração eletromecânica dos inversores para o cenário com inversor central

INVERSOR	QUANTIDADE DE COMBINER BOXES		N° DE MÓDULOS/ INVERSOR				QUANTIDADE DE TRACKERS
	12 STRINGS	15 STRINGS	680 Wp	685 Wp	690 Wp	695 Wp	
1	4	1	-	-	2.016	-	21
2	4	1	-	-	2.016	-	21
3	4	1	-	-	2.016	-	21
4	4	1	-	-	2.016	-	21
5	4	-	-	-	1.536	-	16
6	4	-	-	-	1.536	-	16
TOTAL	24	4	0	0	11.136	0	116

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

Na Tabela 10, pode-se perceber que o subcampo é composto por 28 combiner boxes, sendo 24 *combiner boxes* que serão responsáveis por encaminhar e acomodar 12 *strings*, enquanto as demais acomodarão 15 *strings*. Além disso, pode-se perceber que para esta nova configuração, a planta é composta por 864 módulos fotovoltaicos, o que impacta também na quantidade de *trackers*, visto que o número de módulos por *string* se manteve o mesmo.

Ademais, também pode-se perceber o impacto devido ao aumento da quantidade de módulos na potência total do subcampo. Percebe-se na Tabela 13 que a potência nominal é 6,60 MW, enquanto na Tabela 12, mostra que a potência máxima é 7,68 MWp.

Tabela 12 – Resumo da potência pico por inversor e eletrocentro - cenário com inversor *string*

INVERSOR	POTÊNCIA TOTAL/INVERSOR (MWp)				
	POR INVERSOR				POR PCS
	680 Wp	685 Wp	690 Wp	695 Wp	
1				1,39	7,68
2				1,39	
3				1,39	
4				1,39	

INVERSOR	POTÊNCIA TOTAL/INVERSOR (MWp)				
	POR INVERSOR				POR PCS
	680 Wp	685 Wp	690 Wp	695 Wp	
5				1,06	
6				1,06	
TOTAL				7,68	

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

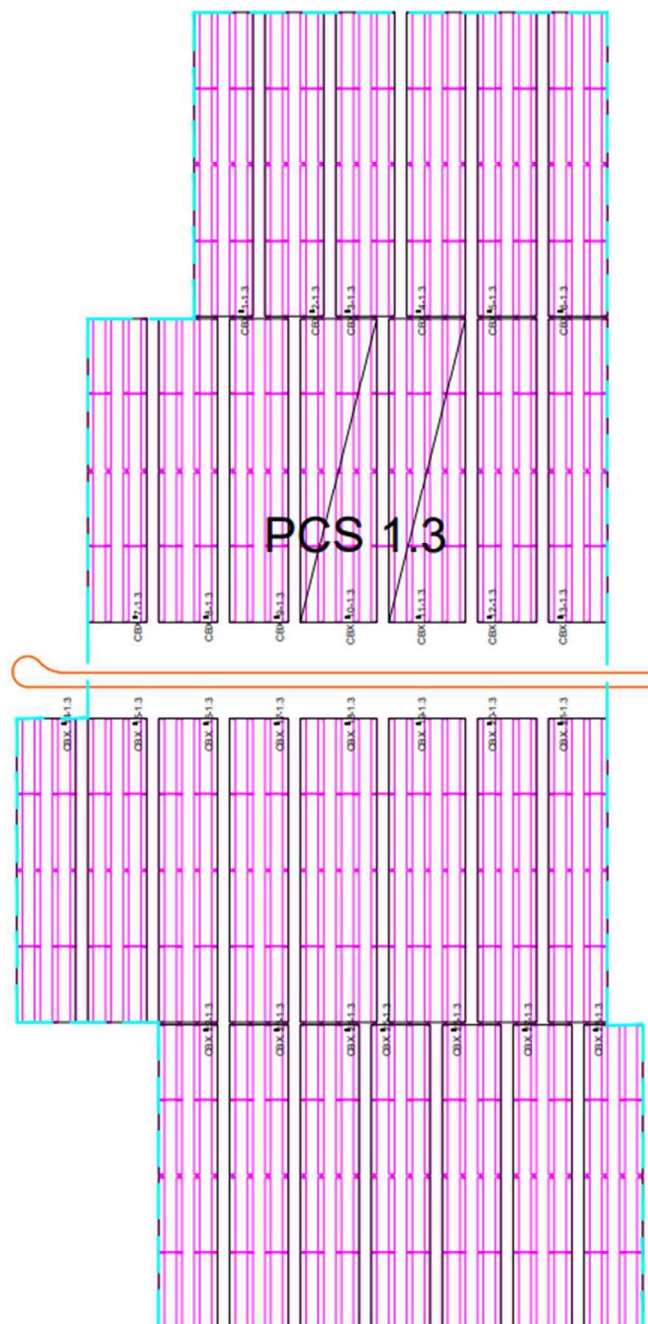
Tabela 13 – Resumo da potência nominal por inversor e eletrocentro - cenário com inversor central

INVERSOR	POTÊNCIA TOTAL (MW)				
	POR INVERSOR				POR PCS
	680 Wp	685 Wp	690 Wp	695 Wp	
1				1,1	6,60
2				1,1	
3				1,1	
4				1,1	
5				1,1	
6				1,1	
TOTAL				6,60	

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

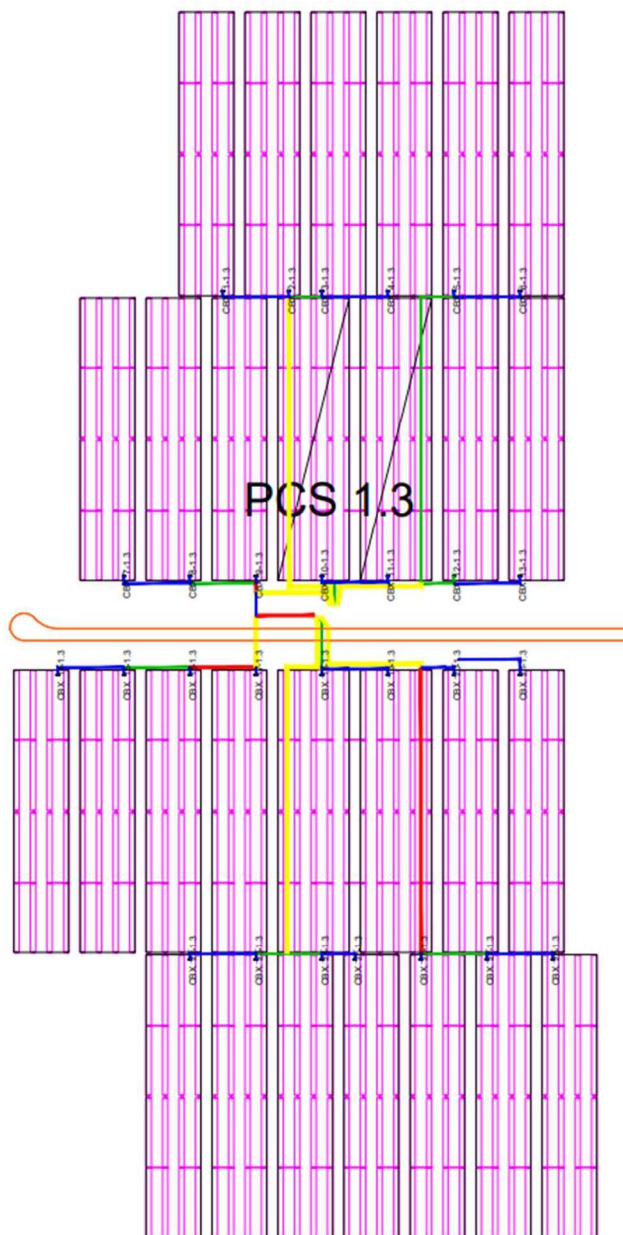
A partir da configuração eletromecânica apresentada acima, foi possível desenvolver o novo *layout* o qual é composto por eletrocentro, *combiner boxes* e, a partir do posicionamento desses equipamentos, foram traçadas as valas BT/CC que são responsáveis por acomodar os cabos que fazem a conexão entre as *combiner boxes* e o inversor central. Na Figura 17, pode ser visto a disposição dos equipamentos, enquanto na Figura 18 podem ser vistas as valas traçadas.

Figura 17 – Layout do subcampo com inversor central



Fonte: Empresa construtora (2023).

Figura 18 – Distribuição de valas do subcampo com inversor central



Fonte: Empresa construtora (2023).

Para o cenário com inversor central, o cabo BT/CC será diretamente enterrado, com exceção onde há travessias no acesso, neste caso foi previsto a utilização de eletroduto enterrado para a passagem dos cabos. Além disso, os condutores foram previstos para serem dispostos em bifólios à 0,5 m de profundidade do solo, com o número máximo de circuitos em uma vala sendo igual a 3. Dessa forma, adotando essas premissas que estão resumidas na Tabela 14, foi possível dimensionar os condutores elétricos BT/CC.

Tabela 14 – Dados de entrada para dimensionamento dos condutores BT/CC

DADOS DE ENTRADA PARA DIMENSIONAMENTO DOS CABOS BT/CC	
TENSÃO NOMINAL (kV)	1,27
FATOR DE SEGURANÇA	1,25
DISPOSIÇÃO DA INSTALAÇÃO	DIRETAMENTE ENTERRADO / ELETRODUTO ENTERRADO
DISPOSIÇÃO DA LINHA	BIFÓLIO
MATERIAL CONDUTOR	ALUMÍNIO
Nº MÁXIMO DE CIRCUITOS POR VALA	3
RESISTIVIDADE TÉRMICA DO SOLO (K.m/W)	3
TEMPERATURA DO SOLO (°C)	35
DISTÂNCIA ENTRE CIRCUITOS (m)	0,25
PROFUNDIDADE DOS CONDUTORES (m)	0,5

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

Utilizando os dados de entradas para dimensionamento dos condutores, obteve-se duas seções de cabo, variando conforme a quantidade de *strings*. Para a *combiner box* com 12 *strings* foi dimensionado um condutor por polo negativo e positivo com seção nominal de 400 mm<sup>2</sup>, enquanto para a *combiner box* com 15 *strings*, foi dimensionado um condutor por polo com seção nominal de 500 mm<sup>2</sup>, como visto na Tabela 15.

Tabela 15 – Dados dos condutores BT/CC

DADOS DOS CONDUTORES BT/CA		
DESCRIÇÃO		Nº DE CABOS/POLO
12 STRINGS	15 STRINGS	
400 mm <sup>2</sup>	500 mm <sup>2</sup>	1

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

Por fim, a Tabela 16 apresenta os dados de entrada para dimensionamento dos condutores FV, os quais diferem para o cenário com inversor *string* devido a quantidade de *strings*. Além disso, estes cabos também terão seu encaminhamento através da estrutura do módulo e em trechos expostos à radiação solar, entre a *combiner box* e o término do *tracker*, assim como na configuração com inversor *string*,

no trecho subterrâneo são admitidos no máximo até 3 eletrodutos por vala com até 3 circuitos por eletroduto.

Tabela 16 – Dados de entrada para dimensionamento dos condutores FV para o cenário com inversor central

<b>DADOS DE ENTRADA PARA DIMENSIONAMENTO DOS CABOS FV</b>		
	680 Wp	1.254,4
TENSÃO NOMINAL DA STRING PARA	685 Wp	1.260,8
CADA POTÊNCIA DE MÓDULO (V)	690 Wp	1.267,2
	695 Wp	1.273,6
FATOR DE SEGURANÇA		1,25
MATERIAL CONDUTOR		COBRE ESTANHADO
DISPOSIÇÃO DA INSTALAÇÃO		ELETRODUTO ENTERRADO
Nº MÁXIMO DE CIRCUITOS POR ELETRODUTO		3
Nº MÁXIMO DE ELETRODUTOS POR VALA		2
PROFUNDIDADE DOS CONDUTORES (m)		0,5

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

Através destas premissas, foram dimensionados os condutores FV, com seção nominal de 6 mm<sup>2</sup>, sendo necessário a utilização de apenas um condutor por fase, conforme a Tabela 17.

Tabela 17 – Dados dos condutores FV para o cenário com inversor central

<b>DADOS DOS CONDUTORES FV</b>	
<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>Nº DE CABOS/FASE</b>
6 mm <sup>2</sup>	1

Fonte: Adaptada da Empresa construtora (2023).

#### **4.2 Caracterização e levantamento dos materiais da rede de baixa tensão**

O levantamento dos materiais consiste em quantificar os materiais vistos a seguir:

- Cabos FV;
- Cabos BT;
- Valas BT;
- Valas FV;
- Eletrodutos;

- Placas de PVC;
- Fitas Sinalizadoras;
- Abraçadeiras plásticas.

Alguns dos itens mencionados anteriormente, como eletrodutos, placas de PVC, fitas sinalizadoras são requisitos fundamentais para instalação de baixa tensão. De acordo com Eccel (2019), em centrais geradoras fotovoltaicas, quando a rede de baixa tensão é subterrânea, o método mais comum para o encaminhamento dos cabos é o de instalação de cabos em eletrodutos enterrados. No entanto, um dos métodos mais viáveis é o método de lançamento direto, que consiste no lançamento do cabo diretamente enterrado no solo.

Dessa forma, quando o lançamento do cabo é direto, conforme premissa adotada em projeto para a usina com inversor *string*, a NBR 5410:2008 obriga a utilização de proteção mecânica adicional e por isso será utilizada placas de PVC. Além disso, a NBR 5410:2008, afirma que é obrigatório a utilização de sinalizadores quando há a presença de linhas elétricas enterradas, portanto, as fitas sinalizadoras serão utilizadas para essa finalidade.

Por fim, os eletrodutos serão utilizados para o encaminhamento dos cabos fotovoltaicos segundo os requisitos da NBR 16612:2019, nos trechos em que ficam expostos à irradiação solar. Já as abraçadeiras plásticas serão aplicadas no encaminhamento dos cabos BT/CC e BT/CA nas suas respectivas valas, com o intuito de aninhar os bifólios e os trifólios para que mantenham o distanciamento entre circuitos nas valas.

#### **4.2.1 Caracterização e levantamento dos materiais do cenário com inversor *string***

##### **4.2.1.1 Cabos elétricos**

Para desenvolver o quantitativo de cabos BT/CA para este cenário, inicialmente foi feita um a lista de/para, apresentada na Tabela 19, que contém os comprimentos dos cabos necessários para a conexão dos inversores com a unidade transformadora presente no eletrocentro. Nesta lista, cada inversor *string* é representado com a nomenclatura “INV.X.” em que X se refere a numeração de cada inversor. Além de apresentar o comprimento linear dos cabos para cada trecho, na Tabela 19, também é apresentado o comprimento do cabo considerando uma reserva



técnica (escolta) do cabo no lado do inversor como também na chegada do cabo no eletrocentro, e quantidades sobressalentes (folgas) para o cabo. Os valores adotados são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Premissas de reservas técnicas adotadas para o cabo BT/CA

<b>ESCOLTA INVERSOR (m)</b>	<b>ESCOLTA ELETROCENTRO (m)</b>	<b>FOLGA</b>
3,00	6,00	7%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 19 – Lista de/para cabos BT/CA

LISTA DE/PARA CABOS BT/CA					
TRECHO	DE	PARA	CONDUTOR UTILIZADO	COMPRIMENTO LINEAR DO CABO (m)	COMPRIMENTO DO CABO (m)
INV.1 - ELETROCENTRO	INV.1	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	199,23	208,65
INV.2 - ELETROCENTRO	INV.2	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	154,23	163,65
INV.3 - ELETROCENTRO	INV.3	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	169,24	178,66
INV.4 - ELETROCENTRO	INV.4	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	214,23	223,65
INV.5 - ELETROCENTRO	INV.5	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	128,43	137,85
INV.6 - ELETROCENTRO	INV.6	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	83,41	92,83
INV.7 - ELETROCENTRO	INV.7	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	38,47	47,89
INV.8 - ELETROCENTRO	INV.8	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	38,51	47,93
INV.9 - ELETROCENTRO	INV.9	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	68,52	77,94
INV.10 - ELETROCENTRO	INV.10	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	113,51	122,93
INV.11 - ELETROCENTRO	INV.11	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	178,90	188,32
INV.12 - ELETROCENTRO	INV.12	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	140,88	150,30
INV.13 - ELETROCENTRO	INV.13	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	80,88	90,30
INV.14 - ELETROCENTRO	INV.14	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	43,39	52,81
INV.15 - ELETROCENTRO	INV.15	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	226,63	236,05
INV.16 - ELETROCENTRO	INV.16	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	181,66	191,08
INV.17 - ELETROCENTRO	INV.17	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	174,19	183,61
INV.18 - ELETROCENTRO	INV.18	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	211,65	221,07
INV.19 - ELETROCENTRO	INV.19	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	271,68	281,10
INV.20 - ELETROCENTRO	INV.20	ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	309,19	318,61

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Além disso, é importante lembrar que o circuito que representa a conexão dos inversores com o transformador é disposto em trifólio, ou seja, tem-se que para cada trecho, o comprimento do cabo deverá ser triplicado. O comprimento do cabo, considerando este requisito, pode ser visto na Tabela 20.

Tabela 20 – Quantitativo de cabo por trecho – Cabos BT/CA

TRECHO	CONDUTOR UTILIZADO	COMPRIMENTO TOTAL DO CABO (m)
INV.1 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	625,95
INV.2 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	490,95
INV.3 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	535,98
INV.4 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	670,95
INV.5 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	413,55
INV.6 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	278,49
INV.7 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	143,67
INV.8 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	143,79
INV.9 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	233,82
INV.10 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	368,79
INV.11 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	564,96
INV.12 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	450,9
INV.13 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	270,9
INV.14 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	158,43
INV.15 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	708,15
INV.16 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	573,24
INV.17 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	550,83
INV.18 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	663,21
INV.19 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	843,3
INV.20 - ELETROCENTRO	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	955,83

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Tabela 21 sintetiza, de forma resumida, a quantidade total de cabo BT/CA que deve ser comprado para que haja a conexão entre o inversor *string* com a unidade transformadora.

Tabela 21 – Resumo do quantitativo de cabos BT/CA

RESUMO DO QUANTITIVO DE CABOS BT/CA	
CONDUTOR UTILIZADO	COMPRIMENTO TOTAL / CONDUTOR (m)
3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	9.645,69

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Através da seção do cabo apresentada na Tabela 6 e da informação que o cabo dimensionado é de Alumínio com isolamento (HEPR) XLPE, conforme a Tabela 5, obtendo o comprimento total do cabo e obedecendo as premissas para o dimensionamento do condutor, optou-se por escolher o modelo de Cabo VOLTENAX GRID ALUMÍNIO, da fabricante Prysmian com classe de tensão nominal CA 0,6/1 kV.

Além dos cabos BT/CA apresentados acima, tem-se o quantitativo referente aos cabos FV. Os cabos FV são obtidos pelo tipo de delimitação das *strings* de módulos em que o inversor *string* está inserido. Para este cenário, foram necessárias 12 delimitações distintas, em que o comprimento linear dos cabos vermelho e preto para cada tipo é apresentado na Tabela 23, assim como também é apresentado o comprimento destes cabos, considerando as reservas técnicas adotadas que são apresentadas na Tabela 22. As reservas adotadas consideram a descida do cabo FV na estrutura do *tracker*, incluindo a profundidade da vala FV, e a subida dos cabos no inversor, considerando também o nível de subida do cabo na vala FV.

Tabela 22 – Premissas de reservas técnicas adotadas para o cabo FV – cenário com inversor *string*

SUBIDA NO INVERSOR (m)	DESCIDA DO TRACKER (m)	FOLGA
3,00	6,00	15%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 23 – Quantitativo de cabo FV por tipo de delimitação – cenário com inversor *string*

TIPO DE DELIMITAÇÃO	COMPRIMENTO LINEAR DE CABO FV (VERMELHO) (m)	COMPRIMENTO LINEAR DE CABO FV (PRETO) (m)	COMPRIMENTO TOTAL CABO FV (VERMELHO) (m)	COMPRIMENTO TOTAL CABO FV (PRETO) (m)
INV-16-1-N	783,74	770,47	911,65	896,40
INV-16-2-N	783,78	770,59	911,70	896,53
INV-16-1-S	961,11	935,19	1.115,63	1.085,82
INV-16-2-S	961,12	935,22	1.115,64	1.085,86
INV-16-4-N	954,88	937,86	1.108,47	1.088,89
INV-16-5-S	771,83	771,31	897,95	897,35
INV-17-1-N	1.029,87	1.014,00	1.194,70	1.176,45
INV-17-2-N	1.029,86	1.013,83	1.194,69	1.176,25
INV-17-1-S	877,25	850,79	1.019,19	988,76
INV-17-2-S	876,97	850,57	1.018,87	988,51
INV-17-4-N	790,73	768,32	919,69	893,92

TIPO DE DELIMITAÇÃO	COMPRIMENTO LINEAR DE CABO FV (VERMELHO) (m)	COMPRIMENTO LINEAR DE CABO FV (PRETO) (m)	COMPRIMENTO TOTAL CABO FV (VERMELHO) (m)	COMPRIMENTO TOTAL CABO FV (PRETO) (m)
INV-17-5-S	1.128,16	1.150,55	1.307,74	1.333,48

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Na Tabela 24 é mostrado a quantidade total de cabo FV, do tipo vermelho e preto, para o cenário com inversor *string* com as reservas técnicas aplicadas e considerando a quantidade total de cada tipo de delimitação dos inversores. Enquanto na Tabela 25, é feito um resumo da quantidade total de cabo FV de 10 mm<sup>2</sup>. Esta quantidade adotada para calcular o custo total deste cabo no orçamento da rede de baixa tensão, em uma usina com inversor *string*.

Tabela 24 – Quantitativo total de cabo FV por tipo de delimitação – cenário com inversor *string*

TIPO DE DELIMITAÇÃO	QTD. DE DELIMITAÇÕES/TIPO	COMPRIMENTO DE CABO FV (VERMELHO) X QTD. DE DELIMITAÇÕES (m)	COMPRIMENTO DE CABO FV (PRETO) X QTD. DE DELIMITAÇÕES (m)
INV-16-1-N	2	1.823,29	1.792,79
INV-16-2-N	2	1.823,39	1.793,06
INV-16-1-S	2	2.231,26	2.171,64
INV-16-2-S	2	2.231,28	2.171,71
INV-16-4-N	1	1.108,47	1.088,89
INV-16-5-S	1	897,95	897,35
INV-17-1-N	2	2.389,41	2.352,91
INV-17-2-N	2	2.389,37	2.352,51
INV-17-1-S	2	2.038,38	1.977,52
INV-17-2-S	2	2.037,74	1.977,02
INV-17-4-N	1	919,69	893,92
INV-17-5-S	1	1.307,74	1.333,48
TOTAL	20	21.197,96	20.802,80

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 25 – Resumo do quantitativo de cabo FV – cenário com inversor *string*

RESUMO DO QUANTITATIVO DE CABOS BT/CA	
CONDUTOR UTILIZADO	COMPRIMENTO TOTAL CABO FV (m)
2x(#10mm <sup>2</sup> ) CU 1,0kVca XLPE	42.000,76

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### 4.2.1.2 Valas

Nesse tópico, será mostrado o volume das valas BT/CA e FV para o cenário com inversor *string*, que serão necessários para calcular o custo das valas para este cenário.

Na Tabela 26 é mostrado o comprimento total das valas por quantidade de circuitos, obtido no *Autodesk AutoCad* através da *Autolisp*, tendo sido a profundidade da vala definida como premissa de projeto e a largura da vala definida pela distância entre os trifólios, conforme NBR 5410:2008, pode-se obter o volume das valas BT/CA.

Tabela 26 – Dimensões das valas BT/CA

VALAS/Nº DE CIRCUITOS	DIMENSÕES DAS VALAS POR Nº DE CIRCUITOS			
	COMPRIMENTO TOTAL LINEAR DA VALA (m)	PROFUNDIDADE DA VALA (m)	LARGURA DA VALA (m)	VOLUME DAS VALAS (m <sup>3</sup> )
VALAS DE 1 CIRCUITO	382,93	0,7	1,1	293,62
VALAS DE 2 CIRCUITOS	430,09	0,7	1,7	509,04
VALAS DE 3 CIRCUITOS	108,39	0,7	2,3	173,46
VALAS DE 4 CIRCUITOS	359,12	0,7	2,9	724,39
TOTAL				1.700,51

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Além das valas BT/CA, foram quantificados os volumes de valas FV necessárias para a passagem dos cabos das *strings* dos módulos. A largura dessas valas diferente da BT/CA é de 0,3 m em todo seu comprimento, não variando pela quantidade de circuitos contidos nas valas. Portanto, sabendo a largura das valas e considerando a profundidade das valas definidas na Tabela 7, e obtendo o comprimento linear das valas por tipo de delimitação do inversor *string*, obteve-se o volume das valas por tipo de delimitação conforme a Tabela 27.

Tabela 27 – Dimensões das valas FV – cenário com inversor *string*

TIPO DE DELIMITAÇÃO	DIMENSÕES DAS VALAS POR Nº TIPO DE DELIMITAÇÃO			
	COMPRIMENTO TOTAL LINEAR DA VALA (m)	PROFUNDIDADE DA VALA (m)	LARGURA DA VALA (m)	VOLUME DAS VALAS POR TIPO (m <sup>3</sup> )
INV-16-1-N	46,43	0,5	0,3	6,96
INV-16-2-N	46,43	0,5	0,3	6,96
INV-16-1-S	96,08	0,5	0,3	14,41
INV-16-2-S	96,08	0,5	0,3	14,41
INV-16-4-N	90,49	0,5	0,3	13,57
INV-16-5-S	46,95	0,5	0,3	7,04
INV-17-1-N	157,03	0,5	0,3	23,55
INV-17-2-N	157,03	0,5	0,3	23,55
INV-17-1-S	66,71	0,5	0,3	10,01
INV-17-2-S	66,71	0,5	0,3	10,01
INV-17-4-N	71,43	0,5	0,3	10,71
INV-17-5-S	169,34	0,5	0,3	25,40

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Já na Tabela 28, tem-se o quantitativo total das valas FV atribuindo os comprimentos das valas das delimitações dos inversores a suas quantidades.

Tabela 28 – Quantitativo total das valas FV – cenário com inversor *string*

TIPO DE DELIMITAÇÃO	VOLUME DAS VALAS POR TIPO (m <sup>3</sup> )	QUANTIDADE DE DELIMITAÇÃO	VOLUME DAS VALAS FV (m <sup>3</sup> )
INV-16-1-N	6,96	2	13,93
INV-16-2-N	6,96	2	13,93
INV-16-1-S	14,41	2	28,82
INV-16-2-S	14,41	2	28,82
INV-16-4-N	13,57	1	13,57
INV-16-5-S	7,04	1	7,04
INV-17-1-N	23,55	2	47,11
INV-17-2-N	23,55	2	47,11
INV-17-1-S	10,01	2	20,01
INV-17-2-S	10,01	2	20,01
INV-17-4-N	10,71	1	10,71
INV-17-5-S	25,401	1	25,40
TOTAL			276,48

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### 4.2.1.3 Eletrodutos, Placas de PVC, Fitas Sinalizadoras e Abraçadeiras

Neste tópico serão abordados os materiais elétricos utilizados para proteção mecânica dos cabos BT/CA e FV do cenário com inversor *string*:

##### a) Eletrodutos

Inicialmente, é feito o quantitativo de eletrodutos para o uso em travessias de cabos BT/CA. Este quantitativo é feito sabendo que o comprimento do acesso é de 6 m, e conforme o item 6.2.11.6.3 da NBR 5410:2008, quando houver travessias de vias acessíveis a veículos deve ser acrescido um comprimento de 0,50 m de um lado e de outro dessas vias, portanto, as travessias serão de 7 m, e a quantidade de duto varia de acordo com o a quantidade de circuitos contidos na vala, em que é necessário fazer travessia em acessos, conforme a Tabela 29.

Tabela 29 – Eletrodutos nas travessias de cabos BT/CA

TRAVESSIAS/Nº DE CIRCUITOS	COMPRIMENTO DAS TRAVESSIAS (m)	QUANTIDADE DE DUTOS NAS TRAVESSIAS	COMPRIMENTO DOS DUTOS (m)
TRAVESSIAS DE 1 CIRCUITO	7	1	7
TRAVESSIAS DE 2 CIRCUITOS	7	2	14
TRAVESSIAS DE 3 CIRCUITOS	7	3	21
TRAVESSIAS DE 4 CIRCUITOS	7	4	28

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Além disso, tendo definido os cabos BT/CA, foi feito o dimensionamento do eletroduto que seria necessário para que a taxa máxima de ocupação de 40% definido para até 3 condutores em um eletroduto de acordo com a NBR 5410:2008, não fosse ultrapassada, o dimensionamento foi feito considerando a área útil do cabo e a área útil do eletroduto de 4" de acordo com a Tabela 30. Dessa forma, tendo em vista que a taxa máxima de ocupação foi satisfeita, foi definido o uso de eletroduto PEAD de 4".

Tabela 30 – Dimensionamento do eletroduto nas travessias de cabos BT/CA

ÁREA ÚTIL DO CONDUTOR DE 400 mm <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	ÁREA ÚTIL DO ELETRODUTO DE 4" (mm <sup>2</sup> )	TAXA DE OCUPAÇÃO DO ELETRODUTO
794,23	8.332,29	29%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).



Após definir o comprimento e o diâmetro nominal do eletroduto por circuito, na Tabela 31 foi sintetizado o comprimento total de eletroduto de 4" utilizado para a travessia dos cabos em acessos.

Tabela 31 – Eletrodutos nas travessias de cabos BT/CA

TRAVESSIAS/Nº DE CIRCUITOS	QUANTIDADE DE TRAVESSIAS	COMPRIMENTO DOS DUTO (m)
TRAVESSIAS DE 1 CIRCUITO		0
TRAVESSIAS DE 2 CIRCUITOS	1	14
TRAVESSIAS DE 3 CIRCUITOS		0
TRAVESSIAS DE 4 CIRCUITOS	2	56
TOTAL		70

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Além dos eletrodutos para a travessia dos cabos BT/CA, também foi feito o levantamento da quantidade de eletrodutos utilizados no encaminhamento das *strings* dos módulos (Cabos FV), o qual partir do diâmetro externo do cabo de 10 mm<sup>2</sup> para esta finalidade que é 7,9 mm, foi dimensionado para que a taxa de ocupação máxima do eletroduto não seja maior que 40% conforme a NBR 5410:2008, para isso foi utilizado eletroduto de 1.1/4" e visto que a taxa de ocupação atende os requisitos normativos, conforme visto na Tabela 32.

Tabela 32 – Dimensionamento do eletroduto dos cabos FV – cenário com inversor *string*

ÁREA ÚTIL DO CONDUTOR DE 10 mm <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	ÁREA ÚTIL DO ELETRODUTO DE 1.1/4" (mm <sup>2</sup> )	TAXA DE OCUPAÇÃO DO ELETRODUTO
49,02	779,31	19%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Em seguida, foi feito o levantamento do comprimento linear dos trechos da vala em que há um ou dois dutos pelo tipo de delimitação do inversor, conforme a Tabela 33, e em seguida estes comprimentos são multiplicados pela quantidade de vezes em que essas delimitações aparecem para o subcampo para que se obtenha o comprimento total dos dutos. No entanto, devido a presença dos dois dutos em alguns trechos das valas é necessário dobrar o valor dos comprimentos dos dutos nestes trechos, dessa forma, obtém-se o comprimento total dos eletrodutos de 1.1/4"

necessários para o encaminhamento do cabo solar no cenário com inversor *string*, conforme é visualizado na Tabela 34.

Tabela 33 – Comprimento linear dos eletrodutos por tipo de delimitação – cenário com inversor *string*

TIPO DE DELIMITAÇÃO	COMPRIMENTO LINEAR DA VALA COM UM DUTO (m)	COMPRIMENTO LINEAR DA VALA COM DOIS DUTOS (m)
INV-16-1-N	25,38	21,05
INV-16-2-N	25,38	21,05
INV-16-1-S	90,03	6,05
INV-16-2-S	90,03	6,05
INV-16-4-N	75,35	15,14
INV-16-5-S	24,72	15,13
INV-17-1-N	143,48	13,55
INV-17-2-N	142,43	14,60
INV-17-1-S	39,41	27,30
INV-17-2-S	42,42	24,29
INV-17-4-N	49,87	21,56
INV-17-5-S	93,66	75,68

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 34 – Comprimento linear dos eletrodutos por trecho – cenário com inversor *string*

TIPO DE DELIMITAÇÃO	QUANTIDADE DE DELIMITAÇÃO	COMPRIMENTO LINEAR DE VALA COM UM DUTO X QTD. DE DELIMITAÇÕES (m)	COMPRIMENTO LINEAR DE VALA COM DOIS DUTOS X QTD. DE DELIMITAÇÕES (m)
INV-16-1-N	2	50,76	42,1
INV-16-2-N	2	50,76	42,1
INV-16-1-S	2	180,06	12,1
INV-16-2-S	2	180,06	12,1
INV-16-4-N	1	75,35	15,14
INV-16-5-S	1	24,72	15,13
INV-17-1-N	2	286,96	27,1
INV-17-2-N	2	284,86	29,2
INV-17-1-S	2	78,82	54,6
INV-17-2-S	2	84,84	48,58
INV-17-4-N	1	49,87	21,56
INV-17-5-S	1	93,66	75,68
TOTAL		1.440,72	395,39

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 35 – Quantidade total de eletrodutos para o cabo FV – cenário com inversor *string*– cenário com inversor *string*

TRECHO DA VALA	COMPRIMENTO DE DUTO DE 1.1/4" (m)
VALA COM UM DUTO	1.441
VALA COM DOIS DUTOS	791
TOTAL	2.232

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### b) Placas de PVC

O quantitativo das placas de PVC é feito somente para as valas BT/CA, e é feito considerando o comprimento linear das valas e a quantidade de placas em uma vala, que pode variar conforme a quantidade dos circuitos contidos nas valas. A partir dos comprimentos das valas obtidos no *layout* com inversor *string*, tem-se a quantidade total em metros de placas utilizadas conforme a Tabela 36.

Tabela 36 – Placas de PVC para cabos BT/CA

VALAS/Nº DE CIRCUITOS	COMPRIMENTO LINEAR DAS VALAS (m)	Nº DE PLACAS / Nº DE CIRCUITOS NA VALA	QUANTIDADE DE PLACAS (m)
VALAS DE 1 CIRCUITO	382,93	1	421
VALAS DE 2 CIRCUITOS	430,09	2	946
VALAS DE 3 CIRCUITOS	108,39	2	238
VALAS DE 4 CIRCUITOS	359,12	3	1.185
TOTAL			2.791

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### c) Fitas Sinalizadoras

As fitas sinalizadoras assim como as placas de PVC, são materiais utilizados para proteção dos cabos BT/CA, e, portanto, o quantitativo das fitas também foi feito com base no comprimento linear das valas BT/CA e a quantidade de fita por vala varia de acordo com a quantidade de circuitos. Na Tabela 37, tem-se a quantidade total de fita utilizada para sinalizar os cabos BT/CA.

Tabela 37 – Fita sinalizadora para cabos BT/CA

VALAS/Nº DE CIRCUITOS	COMPRIMENTO LINEAR DAS VALAS (m)	Nº DE FITAS / Nº DE CIRCUITOS NA VALA	QUANTIDADE FITAS / VALA (m)
VALAS DE 1 CIRCUITO	382,93	1	421
VALAS DE 2 CIRCUITOS	430,09	2	946
VALAS DE 3 CIRCUITOS	108,39	3	358
VALAS DE 4 CIRCUITOS	359,12	4	1.580
TOTAL			3.305

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### d) Abraçadeiras

As abraçadeiras também só devem ser utilizadas para os cabos BT/CA e, portanto, foram dimensionadas de forma que seja possível amarrar os três condutores do trifólio e distanciadas entre si a cada 1,5 m, considerada a distância suficiente para garantir o distanciamento dos trifólios nas valas. Dessa forma, na Tabela 38, pode-se visualizar a quantidade total de abraçadeiras necessária para atender os requisitos de projeto para os cabos BT/CA.

Tabela 38 – Abraçadeiras para cabos BT/CA

VALAS/Nº DE CIRCUITOS	COMPRIMENTO LINEAR DAS VALAS (m)	QUANTIDADE DE ABRAÇADEIRAS
VALAS DE 1 CIRCUITO	382,93	281
VALAS DE 2 CIRCUITOS	430,09	631
VALAS DE 3 CIRCUITOS	108,39	238
VALAS DE 4 CIRCUITOS	359,12	1.053
TOTAL		2.203

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Considerando que o diâmetro da cobertura do cabo (externo) é de 31,8 mm e são 3 condutores, é necessária uma abraçadeira de 400 mm que possui diâmetro de amarração igual a 114 mm para que o trifólio seja abraçado. Portanto, foi adotada a abraçadeira de 400 mm.

Após ter feito o levantamento do quantitativos de todos os materiais elétricos necessários para a rede de baixa tensão para o cenário com o inversor *strings*, na tabela abaixo, tem-se sintetizado de forma resumida, cada item e a sua quantidade.

Tabela 39 – Resumo do quantitativo do cenário com inversor *string*

#	ITEM	UNIDADE	QUANTIDADE
1	3x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	m	9.645,69
2	2x(#10mm <sup>2</sup> ) CU 1,0kVca XLPE	m	42.000,76
3	VALAS BT/CA	m <sup>3</sup>	1.700,51
4	VALAS FV	m <sup>3</sup>	276,48
5	ELETRODUTO PEAD 4"	m	70,00
6	ELETRODUTO PEAD 1.1/4"	m	2.231,50
7	PLACA DE PVC	m	2.790,98
8	FITA SINALIZADORA	m	3.305,24
9	ABRAÇADEIRA PLASTICA 400 mm	un.	2.203

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### 4.2.2 Caracterização e levantamento dos materiais do cenário com inversor central

##### 4.2.2.1 Cabos elétricos

Para desenvolver o quantitativo de cabos BT/CC para o cenário com inversor central, também foi feita uma lista de/para, apresentada na Tabela 41, que contém os comprimentos dos cabos necessários para a conexão das *combiner boxes* com o inversor central que está localizado no eletrocentro. Cada *combiner box*, é representada com a nomenclatura "CBX.X." em que X se refere a numeração de cada uma. Assim como no cenário com inversor *string* os cabos BT/CC também utilizam escoltas no lado da *combiner box* e no lado da conexão com o inversor central, e são quantificados utilizando folgas. Estes valores são apresentados na Tabela 40. Na Tabela 41, é apresentada a lista de/para, que indica os trechos de encaminhamento dos cabos das *combiner boxes* até o eletrocentro, e contém o comprimento linear dos cabos BT/CC, assim como o comprimento dos cabos considerando as reservas técnicas.

Tabela 40 – Premissas de reservas técnicas adotadas para o cabo BT/CC

ESCOLTA COMBINER BOX (m)	ESCOLTA ELETROCENTRO (m)	FOLGA
3,00	6,00	7%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 41 – Lista de/para cabos BT/CC

LISTA DE/PARA CABOS BT/CC					
TRECHO	DE	PARA	CONDUTOR UTILIZADO	COMPRIMENTO LINEAR DO CABO (m)	COMPRIMENTO DO CABO (m)
CBX.1 - ELETROCENTRO	CBX.1	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	195,99	205,41
CBX.2 - ELETROCENTRO	CBX.2	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	165,99	175,41
CBX.3 - ELETROCENTRO	CBX.3	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	150,99	160,41
CBX.4 - ELETROCENTRO	CBX.4	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	169,91	179,33
CBX.5 - ELETROCENTRO	CBX.5	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	199,91	209,33
CBX.6 - ELETROCENTRO	CBX.6	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	229,91	239,33
CBX.7 - ELETROCENTRO	CBX.7	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	111,45	120,87
CBX.8 - ELETROCENTRO	CBX.8	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	81,45	90,87
CBX.9 - ELETROCENTRO	CBX.9	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	51,45	60,87
CBX.10 - ELETROCENTRO	CBX.10	ELETROCENTRO	2x(#500mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	21,41	30,83
CBX.11 - ELETROCENTRO	CBX.11	ELETROCENTRO	2x(#500mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	40,10	49,52
CBX.12 - ELETROCENTRO	CBX.12	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	70,11	79,53
CBX.13 - ELETROCENTRO	CBX.13	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	100,11	109,53
CBX.14 - ELETROCENTRO	CBX.14	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	155,28	164,70
CBX.15 - ELETROCENTRO	CBX.15	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	117,46	126,88
CBX.16 - ELETROCENTRO	CBX.16	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	87,46	96,88
CBX.17 - ELETROCENTRO	CBX.17	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	57,46	66,88
CBX.18 - ELETROCENTRO	CBX.18	ELETROCENTRO	2x(#500mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	31,11	40,53
CBX.19 - ELETROCENTRO	CBX.19	ELETROCENTRO	2x(#500mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	61,12	70,54
CBX.20 - ELETROCENTRO	CBX.20	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	91,12	100,54
CBX.21 - ELETROCENTRO	CBX.21	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	121,12	130,54
CBX.22 - ELETROCENTRO	CBX.22	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	217,13	226,55
CBX.23 - ELETROCENTRO	CBX.23	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	187,13	196,55

LISTA DE/PARA CABOS BT/CC					
TRECHO	DE	PARA	CONDUTOR UTILIZADO	COMPRIMENTO LINEAR DO CABO (m)	COMPRIMENTO DO CABO (m)
CBX.24 - ELETROCENTRO	CBX.24	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	160,80	170,22
CBX.25 - ELETROCENTRO	CBX.25	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	175,79	185,21
CBX.26 - ELETROCENTRO	CBX.26	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	205,79	215,21
CBX.27 - ELETROCENTRO	CBX.27	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	235,79	245,21
CBX.28 - ELETROCENTRO	CBX.28	ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	265,79	275,21

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Diferente dos cabos BT/CA, os cabos BT/CC são dispostos por circuito em bifólios, e, portanto, para obter o comprimento total de cabos por trecho, é necessário duplicar o comprimento do cabo. A quantidade total de cabo de 400 mm<sup>2</sup> e 500 mm<sup>2</sup> está sintetizada na Tabela 42.

Tabela 42 – Quantitativo de cabo por trecho – Cabos BT/CC

TRECHO	CONDUTOR UTILIZADO	COMPRIMENTO TOTAL DO CABO
CBX.1 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	410,81
CBX.2 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	350,81
CBX.3 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	320,81
CBX.4 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	358,66
CBX.5 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	418,66
CBX.6 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	478,66
CBX.7 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	241,73
CBX.8 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	181,73
CBX.9 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	121,73
CBX.10 - ELETROCENTRO	2x(#500mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	61,67
CBX.11 - ELETROCENTRO	2x(#500mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	99,05
CBX.12 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	159,05
CBX.13 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	219,05
CBX.14 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	329,40
CBX.15 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	253,76
CBX.16 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	193,76
CBX.17 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	133,76
CBX.18 - ELETROCENTRO	2x(#500mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	81,07
CBX.19 - ELETROCENTRO	2x(#500mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	141,07
CBX.20 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	201,08
CBX.21 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	261,08
CBX.22 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	453,11
CBX.23 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	393,11
CBX.24 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	340,43
CBX.25 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	370,42
CBX.26 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	430,42
CBX.27 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	490,42
CBX.28 - ELETROCENTRO	2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	550,42

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A partir das tabelas visualizadas anteriormente, pode-se obter o quantitativo total dos cabos de alumínio de 500 mm<sup>2</sup> e 400 mm<sup>2</sup>, conforme a Tabela 43.



Tabela 43 – Resumo do quantitativo de cabos BT/CC

RESUMO DO QUANTITIVO DE CABOS BT/CA	
CONDUTOR UTILIZADO	COMPRIMENTO TOTAL / CONDUTOR
2x(#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	7.662,88
2x(#500mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	382,85

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Através da seção do cabo apresentada na Tabela 15 e da informação que o cabo dimensionado é de Alumínio com isolamento (HEPR) XLPE, conforme a Tabela 14, foi feita a escolha de utilizar o cabo VOLTENAX GRID ALUMÍNIO da fabricante Prysmian com classe de tensão nominal CC 1,5/1,5 kV.

Da mesma forma que no cenário com inversor *string*, também é necessário realizar a quantificação de cabos FV para o cenário com inversor central. Esse quantitativo é determinado da mesma maneira, levando em consideração as mesmas reservas técnicas apresentadas na Tabela 44. A única variável alterada é o comprimento dos cabos, pois no cenário com inversor central, as delimitações com as *strings* de módulos das *combiner boxes*, como apresentadas anteriormente, contém apenas 15 ou 12 *strings* e contam com apenas 8 variações de delimitações.

Tabela 44 – Premissas de reservas técnicas adotadas para o cabo FV – cenário com inversor central

SUBIDA NA COMBINER BOX (m)	DESCIDA DO TRACKER (m)	FOLGA
3,00	6,00	15%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Tabela 45 expõe o quantitativo dos cabos FV, vermelho e preto, para o cenário com inversor central, e as folgas aplicadas a esses cabos por tipo de delimitação. Já na Tabela 46 é mostrado a quantidade total de Cabo FV, diferenciando os cabos que são vermelhos dos pretos.

Tabela 45 – Quantitativo de cabo FV por tipo de delimitação – cenário com inversor central

TIPO DE DELIMITAÇÃO	COMPRIMENTO LINEAR DE CABO FV (VERMELHO) (m)	COMPRIMENTO LINEAR DE CABO FV (PRETO) (m)	COMPRIMENTO TOTAL CABO FV (VERMELHO) (m)	COMPRIMENTO TOTAL CABO FV (PRETO) (m)
INV-12-1-N	649,90	675,00	757,74	786,60
INV-12-2-N	649,90	675,00	757,74	786,60
INV-12-1-S	638,20	662,00	744,28	771,65
INV-12-2-S	638,20	662,00	744,28	771,65
INV-15-1-N	818,2	849	951,28	986,70
INV-15-2-N	817,70	849,00	950,71	986,70
INV-15-1-S	802,70	833,00	933,46	968,30
INV-15-2-S	803,20	833,00	934,03	968,30
<b>TOTAL</b>	<b>5.818,00</b>	<b>6.038,00</b>	<b>6.773,50</b>	<b>7.026,50</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 46 – Quantitativo total de cabo FV por tipo de delimitação – cenário com inversor central

TIPO DE DELIMITAÇÃO	QTD. DE DELIMITAÇÕES/TIPO	COMPRIMENTO DE CABO FV (VERMELHO) X QTD. DE DELIMITAÇÕES (m)	COMPRIMENTO DE CABO FV (PRETO) X QTD. DE DELIMITAÇÕES (m)
INV-12-1-N	5	3.788,68	3.933,00
INV-12-2-N	6	4.546,41	4.719,60
INV-12-1-S	7	5.209,96	5.401,55
INV-12-2-S	6	4.465,68	4.629,90
INV-15-1-N	1	951,28	986,70
INV-15-2-N	1	950,71	986,70
INV-15-1-S	1	933,46	968,30
INV-15-2-S	1	934,03	968,30
<b>TOTAL</b>	<b>28</b>	<b>21.780,20</b>	<b>22.594,05</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Na Tabela 47, é mostrada a quantidade total de cabo FV. Esta quantidade será utilizada para calcular o custo do cabo de 6 mm<sup>2</sup>, utilizado para fazer a conexão das *strings* dos módulos com a *combiner box*.

Tabela 47 – Resumo do quantitativo de cabo FV – cenário com inversor central

RESUMO DO QUANTITATIVO DE CABOS BT/CA	
CONDUTOR UTILIZADO	COMPRIMENTO TOTAL CABO FV (m)
2x(#6mm <sup>2</sup> ) CU 1,0kVca XLPE	44.374,25

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### 4.2.2.2 Valas

Neste item é feito o levantamento do volume das valas BT/CC e FV que é necessário para levantar os custos de escavação das valas da rede de baixa tensão para o cenário com inversor central.

Inicialmente, foi realizado o levantamento do comprimento linear das valas em função da quantidade de circuitos nelas presentes, seguindo uma abordagem semelhante à adotada no cenário com inversor *string*. As premissas de cálculo para o volume de valas foram as mesmas para ambos os cenários, variando apenas a profundidade da vala e a largura das valas. No cenário com inversor central, os cabos são BT/CC, permitindo um espaçamento menor entre os circuitos devido a não ocorrência de interferência eletromagnética entre os condutores de corrente contínua. A Tabela 48 apresenta o volume das valas por quantidade de circuitos, assim como o volume total das valas para cabos BT/CC.

Tabela 48 – Quantitativo das valas BT/CC

VALAS/Nº DE CIRCUITOS	DIMENSÕES DAS VALAS POR Nº DE CIRCUITOS			
	COMPRIMENTO TOTAL LINEAR DA VALA (m)	PROFUNDIDADE DA VALA (m)	LARGURA DA VALA (m)	VOLUME DAS VALAS (m <sup>3</sup> )
VALAS DE 1 CIRCUITO	524,97	0,8	0,6	239,89
VALAS DE 2 CIRCUITOS	332,71	0,8	0,9	237,53
VALAS DE 3 CIRCUITOS	191,16	0,8	1,2	185,59
VALAS DE 4 CIRCUITOS	500,18	0,8	1,5	614,14
	TOTAL			1.277,15

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Já as valas FV, também, foram quantificadas para o cenário com inversor central, levando em consideração as delimitações das *combiner boxes*, obtendo o comprimento linear das valas para cada tipo de delimitação, e considerando cada vala

com 0,3 m de largura e a sua profundidade igual a adotada na Tabela 16. A partir disso, pode-se calcular o volume das valas por tipo de delimitação, visto na Tabela 49.

Tabela 49 – Dimensões das valas FV – cenário com inversor central

TIPO DE DELIMITAÇÃO	DIMENSÕES DAS VALAS POR Nº TIPO DE DELIMITAÇÃO			
	COMPRIMENTO TOTAL LINEAR DA VALA (m)	PROFUNDIDADE DA VALA (m)	LARGURA DA VALA (m)	VOLUME DAS VALAS POR TIPO (m <sup>3</sup> )
INV-12-1-N	29,59	0,5	0,3	4,44
INV-12-2-N	29,44	0,5	0,3	4,42
INV-12-1-S	28,43	0,5	0,3	4,26
INV-12-2-S	28,43	0,5	0,3	4,26
INV-15-1-N	38,51	0,5	0,3	5,78
INV-15-2-N	38,51	0,5	0,3	5,78
INV-15-1-S	37,19	0,5	0,3	5,58
INV-15-2-S	37,19	0,5	0,3	5,58

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Na Tabela 50, tem-se o volume total necessário para escavar as valas FV para o cenário com inversor central.

Tabela 50 – Quantitativo total das valas FV - cenário com inversor central

TIPO DE DELIMITAÇÃO	VOLUME DAS VALAS POR TIPO (m <sup>3</sup> )	QUANTIDADE DE DELIMITAÇÃO	VOLUME DAS VALAS FV (m <sup>3</sup> )
INV-12-1-N	4,44	5	22,19
INV-12-2-N	4,42	6	26,50
INV-12-1-S	4,26	7	29,85
INV-12-2-S	4,26	6	25,59
INV-15-1-N	5,78	1	5,78
INV-15-2-N	5,78	1	5,78
INV-15-1-S	5,58	1	5,58
INV-15-2-S	5,58	1	5,58
TOTAL			126,84

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### 4.2.2.3 Eletrodutos, Placas de PVC, Fitas Sinalizadoras e Abraçadeiras

Neste tópico serão abordados os materiais elétricos utilizados nos cabos BT/CC e FV, durante o seu encaminhamento, no cenário com inversor central. Os materiais utilizados são os mesmos do cenário com inversor *string*, não havendo distinção entre os dois cenários:

##### a) Eletrodutos

Após a seleção dos cabos BT/CC, foi realizado o dimensionamento do eletroduto, levando em consideração o requisito normativo da NBR 5410:2008, que estipula que a taxa de ocupação do eletroduto com dois condutores não deve ultrapassar 31%. Para otimizar custos, o eletroduto foi dimensionado considerando o condutor de seção de 500 mm<sup>2</sup>, que representa o pior caso.

Os resultados indicaram que um eletroduto de 4" atende a esse requisito, mantendo uma taxa de ocupação inferior a 31%. Portanto, nas travessias de vias, onde será utilizado eletroduto, será adotado eletrodutos de 4". Similarmente ao cenário com inversor *strings*, o acesso terá a mesma espessura de 6 m, acrescido de 0,5 m de cada lado do acesso como requisito de segurança conforme solicitado pela NBR 5410:2008. Os detalhes do dimensionamento do eletroduto podem ser encontrados na Tabela 51.

Tabela 51 – Dimensionamento do eletroduto nas travessias de cabos BT/CC

ÁREA ÚTIL DO CONDUTOR DE 500 mm <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	AREA ÚTIL DO ELETRODUTO DE 4" (mm <sup>2</sup> )	TAXA DE OCUPAÇÃO DO ELETRODUTO
995,38	8.332,29	24%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A quantidade de eletrodutos por vala depende do número de circuitos em cada vala. As quantidades de eletrodutos adotadas são as mesmas do cenário com inversor *string*, portanto, será adotada a Tabela 29 para o cálculo da quantidade total de eletrodutos necessária para as travessias, na Tabela 52 tem-se este valor sintetizado.

Tabela 52 – Eletrodutos nas travessias de cabos BT/CC

TRAVESSIAS/Nº DE CIRCUITOS	QUANTIDADE DE TRAVESSIAS	COMPRIMENTO DOS DUTOS (m)
TRAVESSIAS DE 1 CIRCUITO	1	7
TRAVESSIAS DE 2 CIRCUITOS	1	14
TRAVESSIAS DE 3 CIRCUITOS		0
TRAVESSIAS DE 4 CIRCUITOS	3	84
TOTAL		105

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Além dos eletrodutos utilizados para as travessias de vias dos cabos BT/CC, também foi adotado o uso de eletrodutos para o encaminhamento subterrâneo dos cabos FV. Inicialmente, o dimensionamento do eletroduto foi realizado para atender a condição estipulada pela NBR 5410:2008, considerando que, quando houver no máximo 3 circuitos no eletroduto, a taxa máxima de ocupação seja de 40%. Para isso, foram considerados o diâmetro externo do cabo de 6 mm<sup>2</sup> de 6,3 mm e a o diâmetro interno do eletroduto de 1.1/4". Os resultados desse dimensionamento asseguram que a taxa de ocupação do eletroduto satisfaz as condições normativas, como detalhado na Tabela 53.

Tabela 53 – Dimensionamento do eletroduto dos cabos FV - cenário com inversor central

ÁREA ÚTIL DO CONDUTOR DE 400 mm <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	ÁREA ÚTIL DO ELETRODUTO DE 1.1/4" (mm <sup>2</sup> )	TAXA DE OCUPAÇÃO DO ELETRODUTO
31,17	779,31	12%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para determinar o comprimento total de eletroduto necessário para o encaminhamento dos cabos FV, realizou-se a fragmentação dos trechos das valas em trechos que comportam um ou dois dutos. Isso permitiu calcular a quantidade de trechos nos quais são necessários dois dutos, duplicando assim o comprimento do eletroduto para obter uma estimativa aproximada da quantidade de eletrodutos necessários para o encaminhamento do cabo solar. Na Tabela 54, apresenta-se o comprimento por tipo de delimitação da *combiner box* para os trechos das valas com um ou dois dutos. Já na Tabela 55, mostra-se o comprimento multiplicado pela

quantidade de delimitações utilizadas neste subcampo, resultando no comprimento total do eletroduto para cada trecho.

Tabela 54 – Comprimento linear dos eletrodutos por tipo de delimitação - cenário com inversor central

TIPO DE DELIMITAÇÃO	COMPRIMENTO LINEAR DA VALA COM UM DUTO (m)	COMPRIMENTO LINEAR DA VALA COM DOIS DUTOS (m)
INV-12-1-N	18,43	24,72
INV-12-2-N	18,32	11,12
INV-12-1-S	17,54	10,89
INV-12-2-S	17,46	10,97
INV-15-1-N	23,37	15,14
INV-15-2-N	23,38	15,13
INV-15-1-S	22,59	14,60
INV-15-2-S	22,59	14,60

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 55 – Comprimento linear dos eletrodutos por trecho - cenário com inversor central

TIPO DE DELIMITAÇÃO	QUANTIDADE DE DELIMITAÇÃO	COMPRIMENTO LINEAR DE VALA COM UM DUTO X QTD. DE DELIMITAÇÕES (m)	COMPRIMENTO LINEAR DE VALA COM DOIS DUTOS X QTD. DE DELIMITAÇÕES (m)
INV-12-1-N	5	92,15	55,8
INV-12-2-N	6	109,92	66,72
INV-12-1-S	7	122,78	76,23
INV-12-2-S	6	104,76	65,82
INV-15-1-N	1	23,37	15,14
INV-15-2-N	1	23,38	15,13
INV-15-1-S	1	22,59	14,6
INV-15-2-S	1	22,59	14,6
TOTAL		521,54	324,04

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Na Tabela 56 foi calculada o comprimento total de dutos necessários para o encaminhamento do cabo solar considerando trechos das valas que contém um ou dois dutos.

Tabela 56 – Quantidade total de eletrodutos para o cabo FV - cenário com inversor central

TRECHO DA VALA	COMPRIMENTO DE DUTO DE 1.1/4" (m)
VALA COM UM DUTO	522
VALA COM DOIS DUTOS	648
TOTAL	1.170

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### b) Placas de PVC

O quantitativo das placas de PVC, assim como no cenário com inversor *string*, não se aplica as valas FV, somente as valas BT/CC. Para este cenário é considerado a mesma variação da quantidade de placas pela quantidade de circuitos contidos nas valas do cenário com inversor *strings*, no entanto devido a variação do comprimento linear das valas, obtém-se quantidade de placas nos dois cenários. Na Tabela 57 é vista a quantidade total de placas de PVC necessárias para o cenário com inversor central.

Tabela 57 – Placas de PVC para cabos BT/CC

VALAS/Nº DE CIRCUITOS	COMPRIMENTO LINEAR DAS VALAS (m)	Nº DE PLACAS / Nº DE CIRCUITOS NA VALA	QUANTIDADE DE PLACAS (m)
VALAS DE 1 CIRCUITO	524,97	1	577
VALAS DE 2 CIRCUITOS	332,71	2	732
VALAS DE 3 CIRCUITOS	191,16	2	421
VALAS DE 4 CIRCUITOS	500,18	3	1.651
TOTAL			3.381

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### c) Fitas Sinalizadoras

O quantitativo das fitas, assim como o das placas de PVC é afetado pela mudança do comprimento linear das valas entre os cenários, no entanto a metodologia para obter este valor é a mesma, pois para obter o comprimento total de fitas sinalizadoras para o cenário com inversor central é utilizado o comprimento linear das valas BT/CC. Na Tabela 58, tem-se o valor total em metros, de fitas necessárias para sinalizar as valas BT/CC.



Tabela 58 – Fita sinalizadora para cabos BT/CC

VALAS/Nº DE CIRCUITOS	COMPRIMENTO LINEAR DAS VALAS (m)	Nº DE PLACAS / Nº DE CIRCUITOS NA VALA	QUANTIDADE FITAS / VALA (m)
VALAS DE 1 CIRCUITO	524,97	1	577
VALAS DE 2 CIRCUITOS	332,71	2	732
VALAS DE 3 CIRCUITOS	191,16	3	631
VALAS DE 4 CIRCUITOS	500,18	4	2.201
TOTAL			4.141

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### d) Abraçadeiras

As abraçadeiras têm sua aplicação restrita aos cabos BT/CA e foram dimensionadas para permitir a fixação dos três condutores do trifólio. Elas são posicionadas com um espaçamento de 1,5 m entre si, considerando uma distância adequada para garantir o afastamento dos trifólios nas valas. A Tabela 59 apresenta a quantidade total de abraçadeiras necessárias para atender aos requisitos de projeto dos cabos BT/CA.

Tabela 59 – Abraçadeiras para cabos BT/CC

VALAS/Nº DE CIRCUITOS	COMPRIMENTO LINEAR DAS VALAS (m)	QUANTIDADE DE ABRAÇADEIRAS / VALA
VALAS DE 1 CIRCUITO	524,97	385
VALAS DE 2 CIRCUITOS	332,71	488
VALAS DE 3 CIRCUITOS	191,16	421
VALAS DE 4 CIRCUITOS	500,18	1.467
TOTAL		2.761

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para dimensionar o tipo de abraçadeira, assim como no dimensionamento dos eletrodutos, foi considerado o diâmetro externo do condutor de maior seção, que é o de 500 mm<sup>2</sup>, equivalente a 35,6 mm. Dado que a abraçadeira será utilizada para amarrar um bifólio, pode-se adotar a mesma abraçadeira utilizada no cenário com inversor *string* de 400 mm, a qual possui 114 mm de diâmetro de amarração e será suficiente para garantir que os bifólios estejam adequadamente amarrados.

A seguir tem-se a tabela resumo com todos os quantitativos referentes aos materiais elétricos utilizados para o cenário com inversor central.

Tabela 60 – Resumo do quantitativo do cenário com inversor central

#	ITEM	UNIDADE	QUANTIDADE
1	CABO (#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	m	8.177,71
2	CABO (#500mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	m	406,06
3	CABO (#6mm <sup>2</sup> ) CU 1,0kVca XLPE	m	44.374,25
4	ESCAVAÇÃO VALAS BT/CC	m <sup>3</sup>	1.277,15
5	ESCAVAÇÃO VALAS FV	m <sup>3</sup>	126,84
6	ELETRODUTO PEAD 4"	m	105,00
7	ELETRODUTO PEAD 1.1/4"	m	1.305,22
8	PLACA DE PVC	m	3.380,75
9	FITA SINALIZADORA	m	4.141,05
10	ABRAÇADEIRA PLASTICA 400 mm	un.	2.761,00

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

### 4.3 Precificação dos materiais elétricos e custos da rede de baixa tensão para cada cenário

Neste tópico, são abordados os custos associados aos materiais elétricos adotados para a rede de baixa tensão em uma usina fotovoltaica com topologia de inversor *string* e central, com base no quantitativo de materiais para ambas as topologias de planta. Observou-se que itens como cabos, fitas sinalizadoras, placas de PVC e abraçadeiras plásticas não estavam incluídos na tabela SEINFRA.

Portanto, foram utilizados os valores correspondentes a cada material conforme o orçamento obtido pela empresa construtora. Para os demais materiais, foram adotados os valores referentes a tabela SEINFRA, incluindo os custos com escavação de valas. Nos próximos tópicos, serão apresentados os custos associados a cada material, bem como o custo total da rede de baixa tensão para cada topologia de inversor.

#### 4.3.1 Custos da rede de baixa tensão do cenário com inversor *string*

Na Tabela 61, tem-se o preço e a unidade referente a cada tipo de material elétrico utilizado no cenário para o inversor *string*.

Tabela 61 – Precificação dos materiais elétricos - cenário com inversor *string*

#	ITEM	UNIDADE	PREÇO (R\$)
1	CABO (#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	m	31,28
2	CABO (#10mm <sup>2</sup> ) CU 1,0kVca XLPE	m	7,60
3	ESCAVAÇÃO VALAS BT/CA	m <sup>3</sup>	22,90
4	ESCAVAÇÃO VALAS FV	m <sup>3</sup>	22,90
5	ELETRODUTO PEAD 4"	m	13,18
6	ELETRODUTO PEAD 1.1/4"	m	4,10
7	PLACA DE PVC	m <sup>2</sup>	17,17
8	FITA SINALIZADORA	ROLO 300 m	7,05
9	ABRAÇADEIRA PLASTICA 400 mm	PAC. 100	20,42

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A partir dos preços de cada material, foi feito o levantamento dos custos total considerando os quantitativos dos materiais, conforme a Tabela 62.

Tabela 62 – Custo total da rede de baixa tensão para o cenário com inversor *string*

#	ITEM	UNIDADE	QUANTIDADE	PREÇO (R\$)	CUSTO (R\$)
1	CABO (#400mm <sup>2</sup> ) AL 0,6/1,0kVca XLPE	m	9.645,69	31,28	301.717,18
2	CABO (#10mm <sup>2</sup> ) CU 1,0kVca XLPE	m	42.000,76	7,60	319.205,80
3	ESCAVAÇÃO VALAS BT/CA	m <sup>3</sup>	1.700,51	22,90	38.941,66
4	ESCAVAÇÃO VALAS FV	m <sup>3</sup>	276,48	22,90	6.331,43
5	ELETRODUTO PEAD 4"	m	70,00	13,18	922,60
6	ELETRODUTO PEAD 1.1/4"	m	2.231,50	4,10	9.149,15
7	PLACA DE PVC	m <sup>2</sup>	187,00	17,17	3.210,79
8	FITA SINALIZADORA	ROLO 300 m	12,00	7,05	84,60
9	ABRAÇADEIRA PLASTICA 400 mm	PAC. 100	23,00	20,42	469,66
<b>TOTAL</b>					<b>R\$ 680.032,87</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### **4.3.1 Custos da rede de baixa tensão do cenário com inversor central**

Na Tabela 63, é sintetizado os valores com os custos dos materiais elétricos e da escavação das valas para o cenário com *layout* utilizando inversor central.

Tabela 63 – Precificação dos materiais elétricos - cenário com inversor central

#	ITEM	UNIDADE	PREÇO
1	CABO (#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	m	31,28
2	CABO (#500mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	m	39,78
3	CABO (#6mm <sup>2</sup> ) CU 1,0kVca XLPE	m	4,46
4	ESCAVAÇÃO VALAS BT/CC	m <sup>3</sup>	22,9
5	ESCAVAÇÃO VALAS FV	m <sup>3</sup>	22,9
6	ELETRODUTO PEAD 4"	m	13,18
7	ELETRODUTO PEAD 1.1/4"	m	4,1
8	PLACA DE PVC	m <sup>2</sup>	17,17
9	FITA SINALIZADORA	ROLO 300 m	7,05
10	ABRAÇADEIRA PLASTICA 400 mm	PAC. 100	20,42

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A seguir, tem-se o custo total da rede de baixa tensão do cenário com inversor central considerando o levantamento dos quantitativos e os preços dos materiais vistos na tabela anterior.

Tabela 64 – Custo total da rede de baixa tensão para o cenário com inversor central

#	ITEM	UNIDADE	QUANTIDADE	PREÇO	CUSTO (R\$)
1	CABO (#400mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	m	8.177,71	31,28	255.798,87
2	CABO (#500mm <sup>2</sup> ) AL 1,5/1,5kVcc XLPE	m	406,06	39,78	16.153,26
3	CABO (#6mm <sup>2</sup> ) CU 1,0kVca XLPE	m	44.374,25	4,46	197.909,13
4	ESCAVAÇÃO VALAS BT/CC	m <sup>3</sup>	1.277,15	22,90	29.246,80
5	ESCAVAÇÃO VALAS FV	m <sup>3</sup>	126,84	22,90	2.904,64
6	ELETRODUTO PEAD 4"	m	105,00	13,18	1.383,90
7	ELETRODUTO PEAD 1.1/4"	m	1.305,22	4,10	5.351,40
8	PLACA DE PVC	m <sup>2</sup>	226,00	17,17	3.880,42
9	FITA SINALIZADORA	ROLO 300 m	14,00	7,05	98,70
10	ABRAÇADEIRA PLASTICA 400 mm	PAC. 100	28,00	20,42	571,76
<b>TOTAL</b>					<b>R\$ 513.298,88</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### 4.4 Discussões

Com base nos resultados obtidos nos custos e quantitativos, destaca-se que os custos relacionados aos cabos foram os que mais impactaram no custo global da rede de baixa tensão. Embora os cabos BT/CA e BT/CC apresentarem o mesmo custo unitário quando comparados em seções nominais idênticas, e mesmo considerando o uso de cabos de seção nominal de 500 mm<sup>2</sup>, que são mais caros, no cenário com inversor central, o cenário com inversor *string* apresentou um custo maior para os cabos BT/CC. Essa observação destaca a importância de considerar não apenas o custo unitário, mas também o comprimento e as especificações dos cabos ao avaliar o impacto financeiro em diferentes topologias de plantas fotovoltaicas.

Essa disparidade nos custos dos cabos BT/CC entre os cenários com inversor *string* e inversor central é atribuída ao fato de que o quantitativo de cabos BT/CC no cenário com inversor *string* é aproximadamente 1,65 km maior, mesmo que este cenário conte com apenas 20 inversores *string*. Esse aumento decorre do fato de que, no cenário com inversor *strings*, os cabos BT/CA são constituídos por 3 fases, exigindo um cabo por fase. Em comparação, no cenário com inversor central são considerados apenas 2 cabos BT/CC, formando o bifólio, resultando em uma significativa redução na quantidade total de cabo necessária. Essa diferença de configuração impacta diretamente nos custos associados aos cabos em cada cenário.

Além das considerações anteriores, é crucial levar em conta que o tipo de linha impacta diretamente no volume da vala, pois como mencionado nos tópicos em que foram realizados os quantitativos, condutores em corrente alternada necessitam de um maior espaçamento nas valas devido as interferências eletromagnéticas quando são submetidos a pequenos espaçamentos entre circuitos distintos.

Portanto, observa-se que no cenário com inversor central os custos associados à escavação de valas para a rede BT foram inferiores. Essa diferença nos custos de escavação é um reflexo das especificidades de instalação e dos requisitos de espaçamento associados aos diferentes tipos de linhas adotados nos dois cenários.

Já para as escavações das valas FV, a redução se deve a maior quantidade de *strings* de módulos conectadas ao inversor *string* e devido a isso ocorreram limitações de espaço para o traçado da vala FV, havendo a necessidade da criação de valas exclusivas em que as *strings* ficaram bem distantes do inversor, o que afeta

também o quantitativo de dutos PEAD de 1.1/4" pois a sua utilização é feita nos trechos de valas FV.

## 5 CONCLUSÃO

A análise comparativa dos custos da rede de baixa tensão para esta usina revela que o cenário com inversor central apresenta um custo aproximadamente 25% menor em comparação ao cenário com inversor *string*. Assim, a adoção da topologia com inversor central torna a construção da usina economicamente mais viável em relação ao cenário com inversor *string*. No entanto, é importante lembrar que a definição da topologia de inversor para uma UFV não deve ser baseada apenas na escolha da tecnologia que torne a construção viavelmente econômica, mas também, devem ser analisadas as especificidades de cada inversor apontadas no capítulo três, pois as características de cada tipo de inversor influenciam na geração do sistema fotovoltaico, além de impactar nos serviços realizados devido a manutenção dos equipamentos, estes fatores estão diretamente associados a performance e as receitas do sistema.

Vale ressaltar que, para este estudo de caso, a opção escolhida para avançar para a fase de projeto executivo foi o cenário com inversor central, mas como dito anteriormente, esta escolha não foi baseada apenas considerando os custos com a rede elétrica de baixa tensão, mas também foram realizadas análises envolvendo a geração de energia elétrica, para cada topologia de inversor, que foram cruciais para a escolha desse cenário.

Com base nos resultados obtidos no capítulo anterior e nas conclusões relativas ao uso de inversores *string* ou central, destaca-se a extrema importância de realizar uma análise cuidadosa das diferentes topologias de planta na fase preliminar (projeto básico) de uma usina solar fotovoltaica.

Assim, os custos de construção da usina, como evidenciado, variam significativamente em função da escolha entre inversores *string* ou central. Para usinas de grande porte, esses custos podem ser determinantes e até mesmo inviabilizar a construção do empreendimento. Portanto, uma análise detalhada e criteriosa na fase inicial do projeto é crucial para garantir que o retorno financeiro da usina será vantajoso quando considerado os custos de construção e operação da usina.

Quanto às dificuldades para elaboração deste estudo, afirma-se que a compreensão das duas topologias de inversor é de fundamental importância para que seja possível justificar as diferenças de custos apresentadas pelas diferentes

topologias de inversores. Além disso, por se tratar de uma área de menor participação de empresas no mercado quando comparada a geração micro e mini distribuída, houve uma grande dificuldade em obter os preços dos materiais elétricos que são utilizados.

Sugere-se como temas futuros:

- a) Análise de Indicadores-Chaves de desempenho de uma usina solar fotovoltaica utilizando topologia de inversor *string* e central;
- b) Uma análise de viabilidade econômica da rede de média tensão aérea e subterrânea de uma usina solar fotovoltaica.



## REFERÊNCIAS

- AL., Ru-Min C. E. Evaluation of a Distributed Photovoltaic System in Grid Connected and Standalone Applications by Different MPPT Algorithms. **Energies**, 2018.
- ALAWADHI, Maryam *et al.* **Techno-Economic Analysis of String vs Central Inverter Fed on a Large-Scale PV Plant**. IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference 2022. Emirados Arabes. 2022.
- ALVES, Filipe; SIQUEIRA, Monica T.; BECERRA, Vicente. **Engenharia Moderna: Soluções para problemas da Sociedade e da Indústria 2**. Atena: Paraná. 2022.
- ANEEL. **Primeiro semestre de 2023 tem crescimento de 5,1 GW na matriz elétrica brasileira**, 05 jul. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/primeiro-semester-de-2023-tem-crescimento-de-5-1-gw-na-matriz-eletrica-brasileira>>. Acesso em: 23 ago. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro: RJ, p. 273. 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16274 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede - Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho**. Rio de Janeiro: RJ, p. 52. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16690 Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto**. Rio de Janeiro: RJ, p. 65. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16612 Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura - Requisitos de desempenho**. Rio de Janeiro: RJ, p. 35. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10899: Energia solar fotovoltaica - Terminologia**. Rio de Janeiro: RJ, p. 16. 2023.

BRASIL. **LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022**. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e. Brasília: DF. 2022.

BUENO, E. *et al* (org) **INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR**. INPE: 2017.

Caixa Combinadora Solar: Guia de Estudo. **TONGOU**. 2023. Disponível em: <<https://pt.elcb.net/solar-combiner-box-study-guide/>>. Acesso em: 15 out. 2023.

Cabos para instalações de energia solar fotovoltaica. **PRYSMIAN**. 2023. Disponível em: <<https://pt.prysmiangroup.com/catalogos-online/Cabos-para-instalacoes-de-energia-solar-fotovoltaica>>. Acesso em: 2023 out. 15.

COELHO, Roberto F. **Energia Solar Fotovoltaica: Geração, Conversão e Aplicações**. Ed. dos Autores. Florianópolis. 2022.

COLODETTE, José F. D. A. **USO DE MICRO-INVERSORES EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**. Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica. Na Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 60 f. 2019.

DELINE, C. Partially Shaded Operation of Multi-String Photovoltaic Systems. **Proceeding of IEEE Photovoltaic**. Hawaii. 2010.

DIMENSIONAMENTO DE CABOS E PROTEÇÕES EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. **Canal solar**. 2019. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/dimensionamento-de-cabos-e-protecao/>>. Acesso em: 18 set. 2023.

ECCEL, João V.; OVIEDO HAITO, Ricardo J. J. **MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA ESCAVAÇÃO E LANÇAMENTOS DE CABOS EM USINAS FOTOVOLTAICAS**. *In*: Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção. Londrina. 2019.

Estudo Estratégico Grandes Usinas Solares 2022. **GREENER**. 2022. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-grandes-usinas-solares->

2022/?doing\_wp\_cron=1700921672.6771490573883056640625>. Acesso em: 30 set. 2023.

FERREIRA, Thiago. O Básico Sobre Fios e Cabos Elétricos – Parte 2 – Baixa Tensão. **LINKEDIN**. 2020. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/o-b%C3%AAsico-sobre-fios-e-cabos-el%C3%A9tricos-parte-2-baixa-tens%C3%A3o-ferreira/?originalSubdomain=pt>>. Acesso em: 20 set. 2023.

FRANCO, Emerson. Sistemas de eletrificação Eletrocento ABB. **ABB**. 2012. Disponível em: <<https://new.abb.com/mining/pt/mineoptimize/sistemas-e-solucoes/mining-electrification/e-houses>>. Acesso em: 2023 out. 03.

GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL BATEU RECORDE EM 2022, APONTA CCEE. **CCEE**. 2023. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/geracao-de-energia-renovavel-bateu-recorde-em-2022-aponta-ccee#:~:text=A%20gera%C3%A7%C3%A3o%20solar%20centralizada%20teve%2C4%20mil%20MW%20m%C3%A9dios.>>. Acesso em: 26 ago. 2023.

GONZAGA, Vanessa. Energia solar na pequena produção rural: investimento com retorno certo. **Solar Brasil**. 2019. Disponível em: <<https://www.solarbrasil.com.br/blog/energia-solar-na-pequena-producao-rural-investimento-com-retorno-certo/>>. Acesso em: 14 set. 2023.

GRIGOLETTO, Danilo. **AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA DO USO DE DIFERENTES SEÇÕES DE CONDUTORES DE BAIXA TENSÃO EM USINA SOLAR FOTOVOLTAICA**. Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 73 f. 2022.

HENRIQUE, Rodolfo. Qual a melhor topologia para usinas fotovoltaicas. **RBS MAGAZINE**. 2022. Disponível em: <[https://issuu.com/rbsmagazine/docs/rbs\\_magazine\\_ed\\_46\\_low](https://issuu.com/rbsmagazine/docs/rbs_magazine_ed_46_low)>. Acesso em: 23 set. 2023.

INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION. **Utility-Scale Solar Photovoltaic**. IFC: 2015.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. **IEC 60287-2-1: Electric cables - Calculation of the current rating - Part 2-1: Thermal resistance - Calculation of the thermal resistance.** [S.l.], p. 47. 2023.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. **IEC 62738: Design guidelines and recommendations for photovoltaic power plants.** [S.l.], p. 47. 2023.

JORGE, Marcos D. A. Pesquisadores brasileiros estão em corrida tecnológica global para desenvolver nova célula fotovoltaica de alta eficiência. **JORNAL DA UNESP 2022.** Disponível em:

<<https://jornal.unesp.br/2022/03/30/pesquisadores-brasileiros-estao-em-corrída-tecnologica-global-para-desenvolver-nova-celula-fotovoltaica-de-alta-eficiencia/>>. Acesso em: 13 set. 2023.

KRÖGER-VODDE, A. *et al.* **Distributed vs. Central Inverters - A Comparison of Monitored PV Systems.** *In:* Proceedings of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition/5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Valencia, Espanha. 2010.

LOIOLA, Vanessa. Fabricantes de trackers veem demanda aquecida no mercado livre de energia. **Portal Solar.** 2023. Disponível em:

<<https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/mercado-livre/fabricantes-de-trackers-veem-demanda-aquecida-no-mercado-livre-de-energia>>. Acesso em: 2023 set. 23.

MÄKI, A.; VALKEALAHTI, S. **Operation of series-connected siliconbased photovoltaic modules under partial shading conditions.** Wiley online library, 2012. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.1138>>. Acesso em: 25 out. 2023.

MEYWIRTH, Phillip. Sistemas solares com layout centralizado e conceito de inversores descentralizados. **Canal solar.** 2023. Disponível em:

<<https://canalsolar.com.br/sistemas-solares-com-layout-centralizado-e-conceito-de-inversores-descentralizados/>>. Acesso em: 2023 out. 14.

MIRANDA, Stella. Inversor solar, o que é e para que serve?. **Canal Solar.** 2022. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/inversor-solar-o-que-e-e-pra>>



<<https://canalsolar.com.br/sistemas-solares-com-layout-centralizado-e-conceito-de-inversores-descentralizados/>>. Acesso em: 2023 out. 31.

SOUZA, Alisson B. **A VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**. Artigo acadêmico apresentado no curso de Engenharia Civil no Centro Universitário do Norte. [S.l.], 18 f. 2018.

VILALLVA, Marcelo G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. Ed. Érica. São Paulo. 2012.

VILLALVA, Marcello. Entenda os módulos fotovoltaicos bifaciais. **Canal Solar**. 2019. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/modulos-fotovoltaicos-bifaciais/>>. Acesso em: 14 set. 2023.

VILLAREJO, J. A *et al.* **Comparison of central vs distributed inverters: application to photovoltaic systems**. Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Polônia, 2011.

VU MINH PHAP, Le T. T. H. Comparison of Central Inverter and String Inverter for Solar Power Plant: Case. **Journal of Nuclear Engineering & Technology**. Vietnam. 14. 2019.

ZILLES, Roberto. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. Ed. Oficina de textos. 2012.