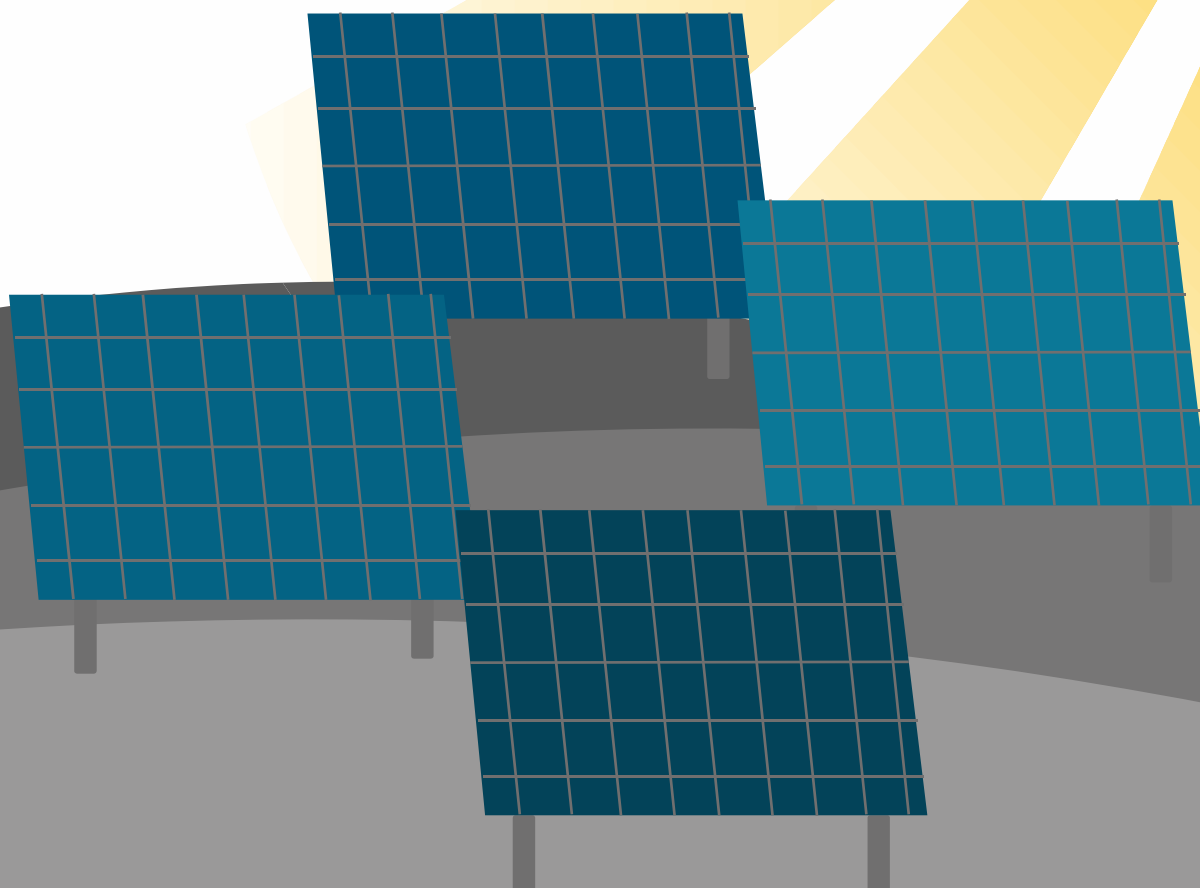


Universidade Federal de Viçosa - UFV
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - CCE
Departamento de Engenharia Elétrica - DEL



Estudo de Projeto E Viabilidade Para Execução De Fazenda Solar Com Carga Instalada De 2500 KWp.

ELT 554 - TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aluno Mayron de Souza Machado
ORIENTADOR: Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira

Viçosa, 23 de Março de 2022.

Mayron de Souza Machado

Estudo de Projeto E Viabilidade Para Execução De Fazenda Solar Com Carga Instalada De 2500 KWp

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa para a obtenção dos créditos referentes à disciplina ELT 554 do curso de Especialização em Sistemas Fotovoltaicos Isolados e Conectados à Rede Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira

Coorientador: Prof. MSc. João Marcos Soares Callegari

Viçosa, 23 de Março de 2022.

ATA DE APROVAÇÃO

Mayron de Souza Machado

Estudo de Projeto E Viabilidade Para Execução De Fazenda Solar Com Carga Instalada De 2500 KWp

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa para a obtenção dos créditos referentes à disciplina ELT 554 do curso de Especialização em Sistemas Fotovoltaicos Isolados e Conectados à Rede Elétrica.

Aprovada em 24 de Fevereiro de 2022.

Presidente e Orientador: Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira

Universidade Federal de Viçosa

Membro Titular: Prof. MSc. Rodrigo Cássio de Barros

Universidade Federal de Viçosa

Membro Titular: Prof. MSc. William Caires Silva Amorim

Universidade Federal de Viçosa

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho

A minha família pelo apoio incondicional que me dão em todos os meus sonhos e conquistas que tenho em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A minha família, pelo apoio de sempre. A todos os amigos e colegas de curso pela troca de experiências. Ao meus orientadores, Heverton Pereira e João Marcus Callegari, pela grande colaboração e aprendizado para conclusão desse projeto.

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo realizar o projeto e estudo de viabilidade para implantação de uma fazenda solar com potência instalada de 2,5MW, que será implantada na zona rural da cidade de Virgem da Lapa, MG.

O empreendimento é enquadrado no âmbito da minigeração distribuída, atendido em média tensão trifásica 13,8 kV/ 60 Hz. Baseado na irradiação solar local de 5,29 kWh/m²dia, o sistema solar fotovoltaico de 2500 kWp dimensionado conta com 4698 módulos fotovoltaicos de 545 Wp, 37 inversores de 60 kW e 01 inversor de 21 kW. A instalação dos módulos é feita no solo, ocupando uma área aproximada de 30000 m² e orientados com azimute de 16°. O projeto apresentou, no horizonte de 20 anos, uma taxa interna de retorno de 21,20% a.a. e pay-back simples de 5,05 anos.

Palavras-chave: Fazenda solar, Sistema solar fotovoltaico, Viabilidade econômica, Virgem da Lapa.

Lista de Figuras

Figura 1: Irradiação solar diária média mensal.	13
Figura 2: Localização Fazenda Solar, Sol da Lapa.	14
Figura 3: Local de instalação.	14
Figura 4: Fundação e Estrutura de Fixação dos Módulos.	21
Figura 5: Espaçamento entre módulos fotovoltaicos.	21
Figura 6: Topologia de subestação abrigada com potência instalada acima de 300 kVA. ...	22
Figura 7: Dimensões da subestação projetada.	23
Figura 8: Esquemático utilizado para dimensionamento do TC.	26
Figura 9: Detalhe do aterramento da subestação.	29
Figura 10: Resumo das contribuições da concessionária e da usina solar fotovoltaica (UFV) para as correntes de CC nas diversas barras.	32
Figura 11: Coordenograma de Proteção Fase.	36
Figura 12: Coordenograma de Proteção Neutro.	36
Figura 13: Custos estimados para implantação da usina.	38
Figura 14: Planta baixa da subestação.	40
Figura 15: Corte A-A.	41
Figura 16: Corte B-B.	42
Figura 17: Corte C-C.	43
Figura 18: Corte D-D.	43
Figura 19: Corte E-E.	44
Figura 20: Corte F-F.	45
Figura 21: Corte G-G.	45
Figura 22: Diagrama unifilar da UC após a instalação da usina solar fotovoltaica.	47

Lista de Tabelas

Tabela 1: Dados Elétricos em STC.....	15
Tabela 2: Dados Mecânicos do módulo fotovoltaico HiMO LR5-72HPH.	16
Tabela 3: Dados técnicos do inversor PHB21KT-MT.	16
Tabela 4: Dados técnicos do inversor PHB60KT-MT.	17
Tabela 5: Quantidade de inversores e placas que serão adotados no projeto.	17
Tabela 6: Proteção <i>stringbox</i> CC.	18
Tabela 7: Proteção ACBOX 01.....	18
Tabela 8: Proteção ACBOX 02.....	18
Tabela 9: Dimensionamento cabos CC.....	19
Tabela 10: Dimensionamento cabos CA entre os Inversores e ACBOX.....	19
Tabela 11: Dimensionamento cabos CA entre ACBOX e QGBT.	19
Tabela 12: Parâmetros do dimensionamento simplificado para obtenção de resistência de aterramento menor que 10 Ω	20
Tabela 13: Estimativa de materiais necessários para implantação da UFV.	20
Tabela 14: Dimensionamento dos equipamentos da subestação.	23
Tabela 15: Memorial de cálculo do transformador de corrente.	26
Tabela 16: Dimensionamento de TP de medição em 13,8 kV.....	27
Tabela 17: Quadro de carga da subestação para alimentação auxiliar.	27
Tabela 18: Quadro de carga da subestação para alimentação da proteção.....	27
Tabela 19: Especificação do disjuntor de MT.	28
Tabela 20: Dimensionamento de TCs de medição em 13,8 kV.	28
Tabela 21: Dimensionamento de TP de medição em 13,8 kV.....	29
Tabela 22: Valores base utilizados nos estudos de proteção.	30
Tabela 23: Nível de Curto Circuito fornecido pela CEMIG.	30
Tabela 24: Impedância na barra da SE.....	30
Tabela 25: Dados de impedância de sequência dos cabos da rede RDP da SE CEMIG Araçuaí até a barra de conexão do acessante. *Valores obtidos para uma temperatura de 90 °C.....	31
Tabela 26: Dados de impedância de sequência dos cabos de cobre utilizados na rede interna do acessante. *Valores obtidos para uma temperatura de 90 °C.	31
Tabela 27: Características elétricas do transformador a seco.	31
Tabela 28: Impedâncias equivalentes de sequência positiva e zero do sistema.	33
Tabela 29: Ajustes de religadores para coordenação, fornecidas pela concessionária.	33
Tabela 30: Definição das proteções e suas respectivas parametrizações de acordo com a norma ND 5.31.	34
Tabela 31: Produção Estimada x valor em reais.	37
Tabela 32: Custo para implantação da usina de 2500 kWp.	37
Tabela 33: Custos fixos mensais durante a operação.	38
Tabela 34: Fluxo de caixa.....	39
Tabela 35: Análise de viabilidade do projeto.	39

Lista de Abreviação

TMA	Taxa Mínima de Atratividade
VPL	Valor Presente Líquido
TP	Transformador de Potencial
TC	Transformado de Corrente
PVC	Policloreto de Vinila
EPR	Etileno Propileno
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos
STC	Standard Testing Conditions
MPPT	Maximum Power Point Tracking
TIR	Taxa Interna de Retorno
UFV	Usina Fotovoltaica

Lista de Símbolos

FC_0	Fluxo de caixa do período zero
FC_n	Fluxo de caixa no período n
SF_6	Hexafluoreto de enxofre
I_b	Corrente de base
W_{modulo}	Produção de energia do módulo

Sumário

1-	Análise do Local da Instalação.....	13
1.1	ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE ENERGIA.....	13
1.2	LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	13
1.3	ANÁLISE DO EFEITO DE SOMBREAMENTO E PERDAS.....	14
2-	Dimensionamento da Cabine Primária e Sistema Fotovoltaico.....	15
2.1	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	15
2.1.1	<i>DIMENSIONAMENTO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....</i>	<i>15</i>
2.1.2	<i>DIMENSIONAMENTO DOS INVERSORES.....</i>	<i>16</i>
2.1.3	<i>DIMENSIONAMENTO DA PROTEÇÃO.....</i>	<i>18</i>
2.1.4	<i>DIMENSIONAMENTO DOS CABOS C.C.....</i>	<i>18</i>
2.1.5	<i>DIMENSIONAMENTO DOS CABOS C.A.....</i>	<i>19</i>
2.1.6	<i>ATERRAMENTO DA UFV.....</i>	<i>19</i>
2.1.7	<i>ESTRUTURAS DE FIXAÇÃO.....</i>	<i>20</i>
2.2	DIMENSIONAMENTO DA CABINE PRIMÁRIA.....	21
2.2.1	<i>TOPOLOGIA ADOTADA.....</i>	<i>21</i>
2.2.2	<i>CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E ELÉTRICAS DA SUBESTAÇÃO.....</i>	<i>23</i>
2.2.3	<i>COMPONENTES DO SISTEMA DE PROTEÇÃO: DISJUNTOR, RELÉ SECUNDÁRIO, TRANSFORMADORES DE TENSÃO E CORRENTE.....</i>	<i>26</i>
2.2.4	<i>COMPONENTES DO SISTEMA DE MEDIÇÃO E TRANSFORMAÇÃO.....</i>	<i>28</i>
2.2.5	<i>ATERRAMENTO DA SUBESTAÇÃO.....</i>	<i>29</i>
2.3	ESTUDOS DE PROTEÇÃO.....	30
2.3.1	<i>NÍVEL DE CURTO-CIRCUITO FORNECIDO PELA CONCESSIONÁRIA.....</i>	<i>30</i>
2.3.2	<i>CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO.....</i>	<i>30</i>
2.3.3	<i>PARAMETRIZAÇÃO DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO.....</i>	<i>33</i>
2.3.4	<i>ESTUDO DE SELETIVIDADE E COORDENAÇÃO.....</i>	<i>35</i>
3-	Análise de Viabilidade Econômica.....	37
3.1	PRODUÇÃO ESTIMADA.....	37
3.2	ANÁLISE DE DESPESAS: MANUTENÇÃO, LIMPEZA, CONCESSIONÁRIA E SUBESTAÇÃO.....	37
3.3	DESPESAS FIXAS APÓS A IMPLANTAÇÃO DA USINA.....	38
3.4	ANÁLISE DA VIABILIDADE.....	38
4-	Projeto Elétrico.....	40
4.1	CORTES DA SUBESTAÇÃO.....	40
4.2	PROJETO ELÉTRICO: DIAGRAMA UNIFILAR.....	46
4.3	PROJETO ELÉTRICO: DIAGRAMA MULTIFILAR.....	48
5-	Referências Bibliográficas.....	49

6- Anexos 50

1- Análise do Local da Instalação

Este capítulo tem objetivo de (i) demonstrar a produção nominal diária e mensal do empreendimento; (ii) analisar a localização da usina solar fotovoltaica de 2500 kWp no município de Virgem da Lapa, MG; e (iii) identificar eventuais obstáculos, perdas por sombreamento e intrínsecas do sistema para instalação da UFV.

1.1 ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE ENERGIA

O local do empreendimento apresenta um bom índice médio de irradiação solar diária, sendo 5,29 kWh/m².dia, conforme pode ser visto na Figura 1.

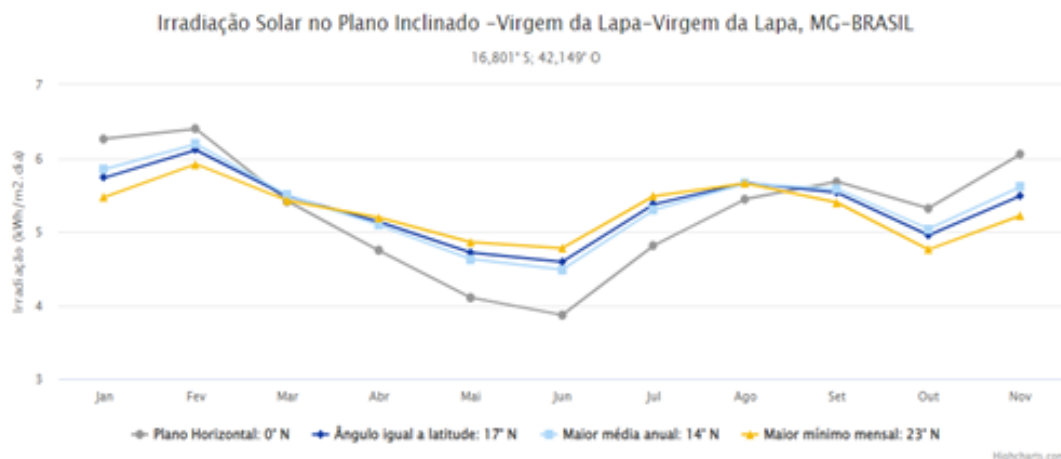


Figura 1: Irradiação solar diária média mensal.

O empreendimento terá uma produção nominal diária média de 12,098 kWh/dia e 362.940 kWh/mês, considerando uma eficiência do sistema de 91,5%. Esta estimativa inclui perdas por conta de sujidade superficial, reflexão, efeito joule e perda por descasamento dos módulos (do inglês, *mismatch*).

1.2 LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

A Fazenda Solar, Sol da Lapa, será instalada em uma área de 4 hectares na zona rural da cidade de Virgem da Lapa, MG. A Figura 2 apresenta o local de instalação do empreendimento, coordenadas -16.83278556144649°, -42.2073518104533°.



Figura 2: Localização Fazenda Solar, Sol da Lapa.

1.3 ANÁLISE DO EFEITO DE SOMBREAMENTO E PERDAS

Devido ao relevo e vegetação local, os efeitos de sombreamento e perdas nos módulos solares são desprezíveis. A Figura 3 apresenta o relevo e vegetação do local de instalação.



Figura 3: Local de instalação.

2- Dimensionamento da Cabine Primária e Sistema Fotovoltaico

Este capítulo tem objetivo de apresentar todo o dimensionamento do projeto fotovoltaico e levantamento de materiais para o empreendimento proposto.

2.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

2.1.1 DIMENSIONAMENTO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

O sistema fotovoltaico terá potência instalada prevista de 2500 kWp, para atingir a potência desejada, serão utilizados 4698 módulos fotovoltaicos de 545 Wp, totalizando carga instalada de 2560,41 KWp.

Neste projeto são adotados módulos fotovoltaicos de 545 Wp da marca LONGI, modelo HiMO LR5-72HPH. A Tabela 1 apresenta as características elétricas do módulo adotado nas condições de teste padrão (do inglês standard test conditions – STC) [3].

Tabela 1: Dados Elétricos em STC.

Electrical Characteristics	STC : AM1.5 1000W/m² 25°C					<small>Test uncertainty for Pmax: ±3%</small>
Power Class	525	530	535	540	545	545
Maximum Power (Pmax/W)	525	530	535	540	545	545
Open Circuit Voltage (Voc/V)	49.05	49.20	49.35	49.50	49.65	49.65
Short Circuit Current (Isc/A)	13.65	13.71	13.78	13.85	13.92	13.92
Voltage at Maximum Power (Vmp/V)	41.20	41.35	41.50	41.65	41.80	41.80
Current at Maximum Power (Imp/A)	12.75	12.82	12.90	12.97	13.04	13.04
Module Efficiency(%)	20.5	20.7	20.9	21.1	21.3	21.3

A Tabela 2 apresenta os dados mecânicos do módulo adotado.

Tabela 2: Dados Mecânicos do módulo fotovoltaico HiMO LR5-72HPH.

Mechanical Parameters	
Cell Orientation	144 (6×24)
Junction Box	IP68, three diodes
Output Cable	4mm ² , positive 400 / negative 200mm length can be customized
Glass	Single glass, 3.2mm coated tempered glass
Frame	Anodized aluminum alloy frame
Weight	27.2kg
Dimension	2256×1133×35mm
Packaging	31pcs per pallet / 155pcs per 20' GP / 620pcs per 40' HC

Serão adotados 4.698 módulos fotovoltaicos nesse empreendimento.

2.1.2 DIMENSIONAMENTO DOS INVERSORES

Para o desenvolvimento do projeto serão adotados dois modelos de inversores. O primeiro é o modelo trifásico PHB21KT-MT da marca PHB de 21 kW (380/220V) [4]. A Tabela 3 apresenta os dados técnicos do inversor PHB60KT-MT [5]. Neste projeto serão utilizados 37 inversores de 60 kW e 01 inversor de 21 kW.

Tabela 3: Dados técnicos do inversor PHB21KT-MT.

Dados da Entrada CC	
Modelo	PHB21KT-DT
Max. Tensão CC [V]	1100
Faixa de Operação SPMP [V]	200~950
Tensão CC de Partida [V]	180
Corrente CC Máxima [A]	25/25
Número de Strings / MPPT	4/2
Conector CC	MC4
String Box Integrada	Interruptor/ Seccionador CC (IEC60947-1 e IEC60947-3), DPS CC classe II (EN50539-11)
Dados da Saída CA	
Potência CA Nominal [W]	21000
Max. Corrente CA [A]	31,9
Saída Nominal CA	380/220Vca; 60Hz
Faixa de Operação CA	176~242Vca; 57,5~62Hz
THD	<3%
Fator de Potência	Unitário (0.8 Capacitivo / 0.8 Indutivo)
Conexão CA	Trifásico (3F+N+PE) ou (3F+PE)
Eficiência	
Max. Eficiência	98,4%
Eficiência SPMP	>99,9%

O segundo inversor adotado será o modelo trifásico PHB60KT-MT da marca PHB de 60 kW (380/220V). A Tabela 4 apresenta os dados técnicos do inversor PHB60KT-MT.

Ambos modelos de inversores são capazes de atender os 8 níveis de tensões do módulo 3 do Prodist. Estão devidamente homologados junto ao INMETRO e contam com a certificação na ANATEL dos sistemas de monitoramento Wi-Fi. Além disso, atendem as normas ABNT-NBR-16149, ABNTNBR-16150 e ABNT-NBR-IEC-62116.

A Tabela 5 apresenta o número de inversores de cada modelo demandados neste projeto, juntamente com a quantidade de módulos fotovoltaicos conectados a cada um dos inversores. Tais valores foram obtidos através das Tabelas 1, 3 e 4, onde foi comparada a máxima tensão que cada inversor suporta, pela quantidade de módulos fotovoltaicos que podem ser conectados nos mesmos de modo a não extrapolar esse valor.

Tabela 4: Dados técnicos do inversor PHB60KT-MT.

Dados da Entrada CC		
	PHB35K-MT	PHB60K-MT
Max. Tensão CC [V]	800	1000
Faixa de Operação SPMP [V]	200~650	200~850
Tensão CC de Partida [V]	200	200
Corrente CC Máxima [A]	30/30/30/30	30/30/30/30
Número de Strings / MPPT	12/4	12/4
Conector CC	MC4	
String Box CC Integrado	Interruptor/ Seccionador CC (IEC60947-1 e IEC60947-3) DPS CC classe II (EN50539-11) Fusível gPV 15A	
Dados da Saída CA		
Potência CA Nominal [W]	35000	60000
Max. Corrente CA [A]	96	
Saída Nominal CA	220/127Vca; 60Hz	380/220Vca; 60Hz
Faixa de Operação CA	101,6~139,7Vca; 57,5~62Hz	176~242Vca; 57,5~62Hz
THD	<3%	
Fator de Potência	Unitário (0.8 Capacitivo. / 0.8 Indutivo)	
Conexão CA	Trifásico (3F+N+T) ou (3F+T)	
Eficiência		
Max. Eficiência	98,8%	
Eficiência SPMP	>99,9%	

Tabela 5: Quantidade de inversores e placas que serão adotados no projeto.

QUANTIDADE DE INVERSORES	MODELO DO INVERSOR	QUANTIDADE DE PLACAS CONECTADAS POR INVERSOR
1	PHB21KT-MT	44
37	PHB60KT-MT	127

2.1.3 DIMENSIONAMENTO DA PROTEÇÃO

Através das especificações técnica dos módulos fotovoltaicos e inversores, foram dimensionadas as proteções conforme Tabelas 6, 7 e 8.

Tabela 6: Proteção *stringbox* CC.

STRINGBOXES (Quantidades por inversores) – Total de Inversores 38				
Denominação	Descrição	Especificações	Qtd.	Observações
Fusíveis	Fusíveis CC embutido	25A/1000Vcc	22	Embutido à <i>Stringbox</i>
Seccionadora	Seccionadora	32A/1000Vcc	11	Embutido à <i>Stringbox</i>
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos	20/40kA/1100 Vcc	33	Embutido à <i>Stringbox</i>

Tabela 7: Proteção ACBOX 01.

ACBOX (Quantidades por unidade) – Total de unidades 01				
Denominação	Descrição	Especificações	Quantidade	Observações
Disjuntor	Disjuntor CA acoplado ao ACBOX	125A/1000Vcc	01	Embutido aos ACBOX
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos	20/40KA/240/400 AC	04	Embutido aos ACBOX
Disjuntor	Disjuntor CA acoplado ao ACBOX	40A/1000Vcc	01	Embutido aos ACBOX

Tabela 8: Proteção ACBOX 02.

ACBOX (Quantidades por unidade) – Total de unidades 18				
Denominação	Descrição	Especificações	Quantidade	Observações
Disjuntor	Disjuntor CA acoplado ao ACBOX	125A/1000Vcc	01	Embutido aos ACBOX
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos	20/40KA/240/400 AC	04	Embutido aos ACBOX

2.1.4 DIMENSIONAMENTO DOS CABOS C.C.

Através das especificações técnica dos módulos fotovoltaicos e inversores, foram dimensionados os cabos para os circuitos CC conforme prescrição técnica da ABNT NBR 16612 e 16690. A Tabela 9 apresenta o dimensionamento dos cabos CC.

Tabela 9: Dimensionamento cabos CC.

DESCRIÇÃO	Conexão entre <i>strings</i> e módulos FV
ESPECIFICAÇÕES	1x4mm ² (0,9/1,8 kV)
CONDUTOR	Cobre Estanhado
ISOLAMENTO	XLPO
ENCAMISAMENTO	XLPO
OBSERVAÇÃO	CC+(Vermelho) e CC-(Preto)

2.1.5 DIMENSIONAMENTO DOS CABOS C.A.

A Tabela 10 apresenta o dimensionamento para os cabos CA, que farão a conexão entre os inversores e ACBOX. A Tabela 11 apresenta os cabos CA que farão a conexão entre a ACBOX e o Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT). Os cabos foram dimensionados de conforme prescrição técnica da ABNT NBR 5410 [6].

Tabela 10: Dimensionamento cabos CA entre os Inversores e ACBOX.

DESCRIÇÃO	Conexão entre Inversores e ACBOX
ESPECIFICAÇÕES	1x3#70
CONDUTOR	Cobre
ISOLAMENTO	XLPE
ENCAMISAMENTO	PVC
OBSERVAÇÃO	CA (Preto)

Tabela 11: Dimensionamento cabos CA entre ACBOX e QGBT.

DESCRIÇÃO	Conexão entre ACBOX e QGBT
ESPECIFICAÇÕES	1x3#120
CONDUTOR	Cobre
ISOLAMENTO	XLPE
ENCAMISAMENTO	PVC
OBSERVAÇÃO	CA (Preto)

2.1.6 ATERRAMENTO DA UFV

Tipicamente, para um aterramento eficiente, busca-se uma resistência à terra inferior a 10 Ω [7]. A Tabela 8 apresenta os parâmetros utilizados para um dimensionamento simplificado da malha de aterramento da usina fotovoltaica. Deve estar claro que todas as partes condutivas do perfilamento e bandejamento estão devidamente ligadas à terra, assim como as molduras dos módulos. Para tal, um condutor de aterramento de seção mínima de 6 mm² de cobre é utilizado, conforme previsto na ABNT NBR 16690.

Tabela 12: Parâmetros do dimensionamento simplificado para obtenção de resistência de aterramento menor que 10 Ω .

MEIO FÍSICO	Argila
RESISTIVIDADE	1000 Ω m
HASTE DE ATERRAMENTO	3mx5/8"
RESISTÊNCIA DA HASTE	315 Ω
QUANTIDADE TOTAL DE HASTES	50
CABO	COBRE NÚ 50mm ²

2.1.7 ESTRUTURAS DE FIXAÇÃO

Os módulos fotovoltaicos serão dispostos em perfis fixados no solo, voltados para o Norte. O ângulo de instalação dos módulos, em relação à superfície, será de 16° (igual à latitude do local). Perfis e suportes são de alumínio liga 6063-T5 anodizado fosco e periféricos em aço Inox 304 para garantir maior resistência à corrosão. A Tabela 13 apresenta uma estimativa de materiais necessários para implantação da UFV, no que diz respeito às estruturas de fixação e aterramento. A estimativa de materiais foi realizada através da plataforma do integrador da PHB Solar [3].

Tabela 13: Estimativa de materiais necessários para implantação da UFV.

Material	Qtd.
TAMPA DE PROTEÇÃO PERFIL VIGA	216 un
TAMPA DE PROTEÇÃO PERFIL TRAVESSA	1512 un
TAMPA DE PROTEÇÃO PERFIL TRAVESSA	216 un
GRAMPO DE ATERRAMENTO	108 un
CLIP DE AÇO P/ ATERRAMENTO ESTRUTURA - MÓDULOS	9288 un
GRAMPO INTERMEDIÁRIO 35MM EM ALUMÍNIO	9288 un
SUORTE DE ALUMINIO TIPO H 100MM	1515 un
KIT SUORTE DE ALUMINIO TIPO AG4	756 un
GRAMPO DE ALUMINIO P/ TRILHO TIPO KS	6048 un
BASE FRONTAL DE ALUMINIO 120MM	756 un
BASE TRASEIRA DE ALUMINIO 160MM	756 un
PERFIL DE ALUMINIO SOLO-VIGA ANODIZADO P/ MODULOS FV (4,50)	216 un
EMENDA DE PERFIL DE ALUMINIO SOLO-VIGA ANODIZADO P/ MODULOS FV (0,4M)	2808 un
PERFIL DE ALUMINIO SOLO-VIGA ANODIZADO P/ MODULOS FV (3,65)	2700 un
PERFIL DE ALUMINIO SOLO-TRAVESSA ANODIZADO P/ MODULOS FV (3,80M) PC 756	756 un
22 - 2405000173 - PARAFUSO AUTOBROCANTE 1/4 PC 16848	16848 un
23 - 2450003305 - CHUMBADOR M10X100MM DE ACO INOX TIPO AF COM PRISIONEIRO PC 6048	6048 un
24 - 5207000202 - PASTA ANTIGRIPANTE C/ ALTO TEOR DE GRAFITE 30G PC 98	98 un

25 - 6407031500 – CAV. P/ ESTRUTURA SOLO 16° CJ 756

746 un

A Figura 4 apresenta como será feito a estrutura de fixação e o espaçamento de cada fileira de módulos. A Figura 5 apresenta os fatores utilizados para o dimensionamento da distância entre os módulos, sendo L , largura do módulo fotovoltaico, D , distância entre os módulos fotovoltaicos, Z , altura da de fixação, α , inclinação do módulo fotovoltaico com relação ao solo.

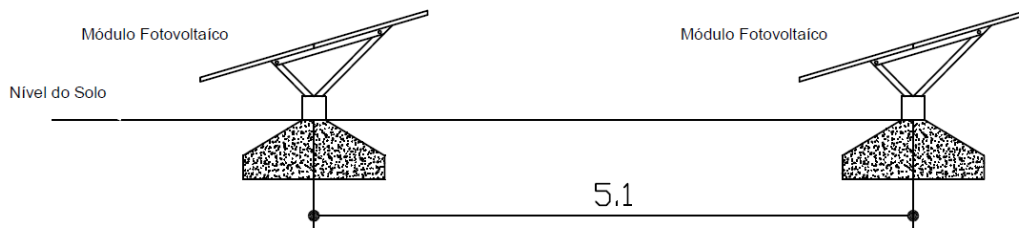


Figura 4: Fundação e Estrutura de Fixação dos Módulos.

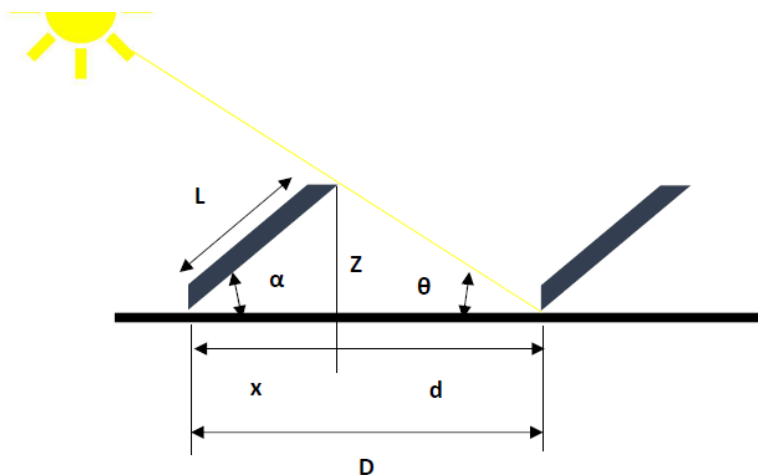


Figura 5: Espaçamento entre módulos fotovoltaicos.

2.2 DIMENSIONAMENTO DA CABINE PRIMÁRIA

A cabine primária é dimensionada para uma potência de 3000 kW. Como material de suporte para o dimensionamento, as NDs 5.3 e 5.31 da CEMIG são utilizadas [1] [2].

2.2.1 TOPOLOGIA ADOTADA

A Figura 6 apresenta a topologia de cabine primária abrigada para geração distribuída solar fotovoltaica deste projeto. Como características principais, nota-se proteção e medição em média tensão. O emprego de religador trifásico no ponto de derivação da rede de MT da concessionária é demandado pela CEMIG, para esta faixa de potência. O disjuntor de proteção MT é

passivo à gás SF6, cujos comandos de trip são provenientes de um relé de proteção [1].

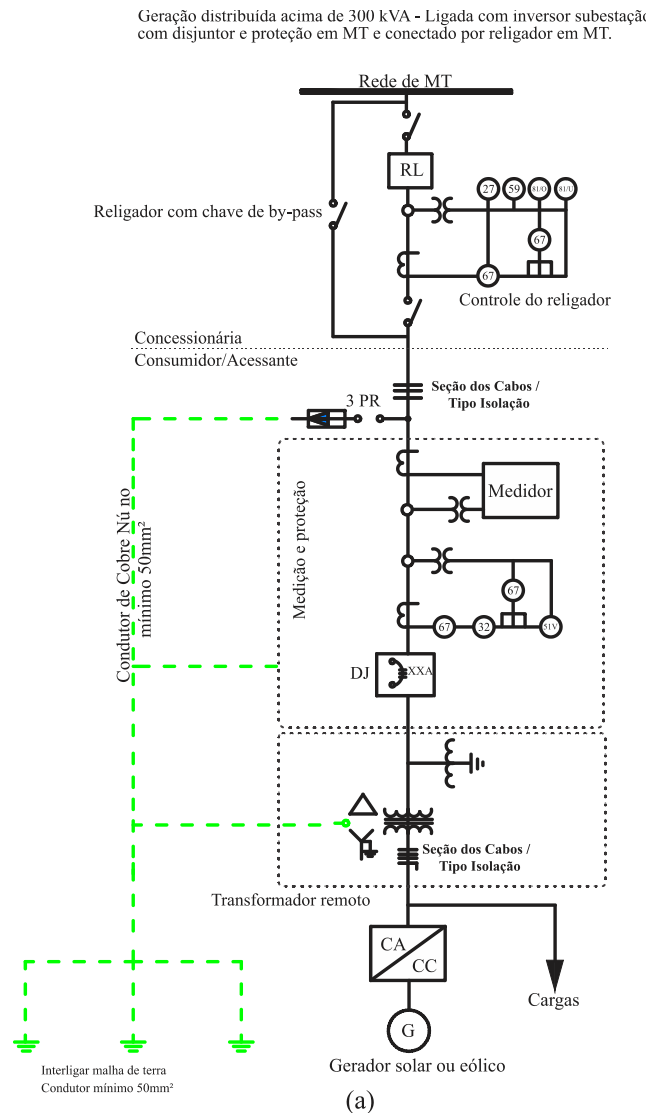


Figura 6: Topologia de subestação abrigada com potência instalada acima de 300 kVA.

Os sinais de tensão e corrente lidos pelo relé são condicionados por meios de transformadores de corrente (TCs) e potencial (TPs). Exige-se três transformadores de corrente (um por fase) e três transformadores de potencial para implementação das proteções direcionais e de sincronismo. Dois transformadores de potencial exclusivos para o relé de proteção e para alimentação das cargas da subestação também são previstos[1].

Por fim, exige-se somente proteções direcionais de corrente e potência. Proteções de sincronismo estão embarcadas nos inversores [2].

2.2.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E ELÉTRICAS DA SUBESTAÇÃO

A Figura 7 apresenta as dimensões projetadas para a subestação em alvenaria, entrada de fornecimento subterrâneo 13,8 kV. A largura do cubículo de medição é mínima de 1,6 metros e o comprimento de 2 metros. O espaçamento de 0,4 metros de ambos os lados do cavalete de medição é importante de ser seguido, para evitar transtornos de instalação.

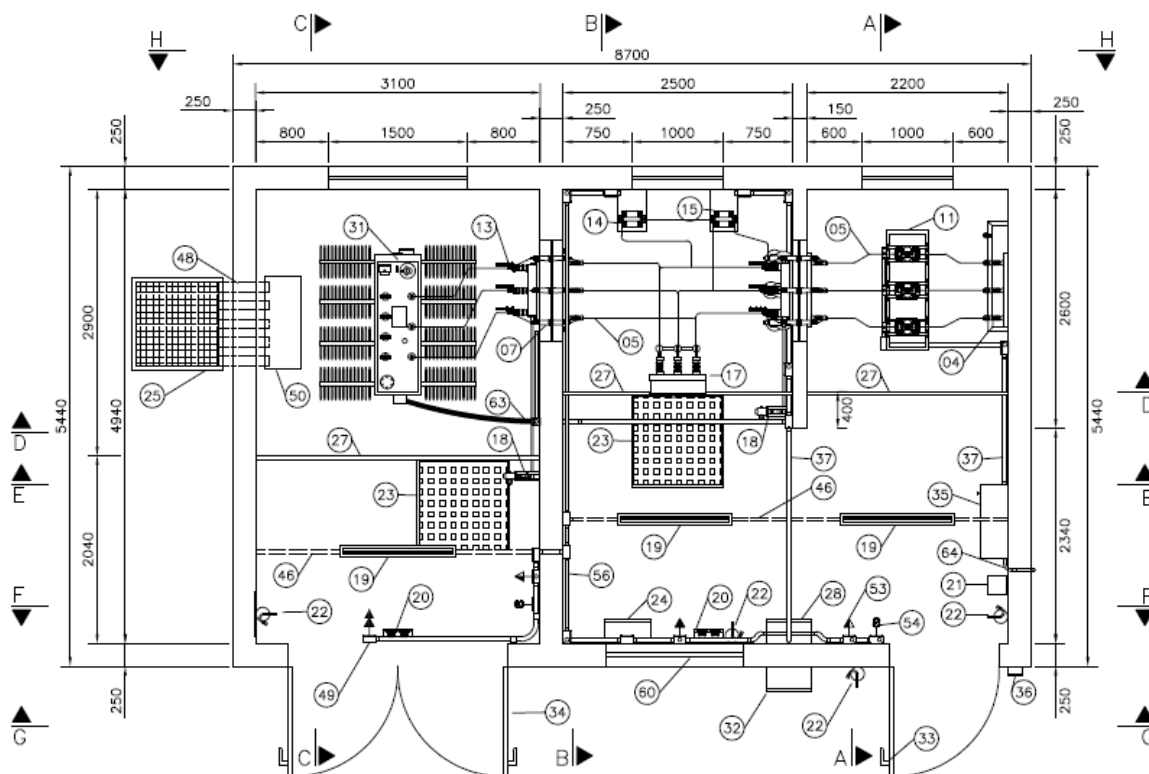


Figura 7: Dimensões da subestação projetada.

O cubículo de proteção possui largura de 2,5 m e o comprimento de 2 metros. Por outro lado, o tamanho do transformador define o tamanho do cubículo de transformação. O comprimento de 2,9 metros do cubículo de transformação, acomoda o transformador de 3 MVA de potência. Por fim, um vão livre de 2 m para boa circulação de pessoal é projetado. A Tabela 14 apresenta os equipamentos demonstrados na Figura 7.

Tabela 14: Dimensionamento dos equipamentos da subestação.

ITEM	DESCRIÇÃO
1	Eletroduto Galvanizado, imersão a quente, $\Phi 110\text{mm}$.
2	Cabo de cobre isolado, EPR 105°, 50mm ² , 15KV.
3	Para raio polimérico Vn=12KV, 10KA, sistema neutro aterrado.
4	Suporte para fixação das muflas.

5	Vergalhão de cobre maciço, $\Phi 3/8''$.
6	Isolado de Pedestal, 15KV.
7	Bucha de passagem interno/interno, 15KV com tirante de $5/8''$.
8	Chapa suporte para fixação de bucha de passagem.
9	Transformado de corrente 15KV, a ser fornecido pela CEMIG.
10	Transformado de potencial 15KV, a ser fornecido pela CEMIG.
11	Suporte para Transformadores de medição.
12	Chave seccionadora tripolar, comando simultâneo, abertura sob carga, 400 A, 15KV sem base fusível.
13	Chave seccionadora tripolar, comando simultâneo, abertura sob carga, 400 A, 15KV com base fusível.
14	Transformado de potencial, 13,8/0,22 - 0,11,1000VA, para serviços auxiliares.
15	Transformado de potencial, 13,8/0,22, 1000VA, alimentação do relé.
16	Transformador de corrente para proteção relação 50:5A, 10B100, 15KV.
17	Disjuntor a vácuo, 15KV, 630A, capacidade de interrupção de 350MVA motorizado, com bobina de abertura e fechamento.
18	Punho de acionamento da chave seccionadora.
19	Iluminação interna, luminária comercial de emergência, 2x40W, hermética
20	Sistema de iluminação de emergência, luminária led, 36W, hermética com autonomia mínima de 4 horas.
21	Caixa para luva de borracha 15KV, com proteção de raspas.
22	Extintor tipo CO ₂ , capacidade mínima 6kg.
23	Tapete de Borracha, classe 15KV, 1000x1000mm.
24	Quadro para alimentação das cargas dos serviços auxiliares da subestação.
25	Caixa de passagem de saída.
26	Janela de ventilação, tipo veneziana, com armação de cantoneira e tela de arame galvanizado 18 BWG, com malha de 13mm.
27	Grade de proteção.
28	Relé de proteção secundária, com no-break de 1000VA e TRIP capacitivo.
29	Terminação para cabo 50 mm ² , 15KV, uso externo.
30	Terminação para cabo 50 mm ² , 15KV, uso interno.
31	Transformador a óleo, 3000KVA, 13800/380V, primário em delta e secundário em estrela, tipo Dyn1, com 3 TAP's no mínimo (13800V, 13200V, 12600V).
32	Painel de acionamento remoto do disjuntor.
33	Porta tipo veneziana, 2100x1200mm.

34	Porta tipo veneziana, 2100x1200mm (duas folhas).
35	Caixa padrão para instalação de medidores.
36	Caixa para chaves da subestação de uso exclusivo da concessionária, selada.
37	Eletroduto galvanizado, 1 ½".
38	"Haste de terra tipo copperweld, recoberta com cobre, alta camada de deposição, 254µm, diâmetro 5/8" e comprimento de 2,4m.
39	Conexão em solda exotérmica.
40	Poste da concessionária.
41	Caixa de passagem com tampa de ferro fundido.
42	Eletroduto de PVC Rígido 4".
43	Cabo de cobre nú, 50mm ² sob o solo (aterramento).
44	Cabo de cobre nú, 50mm ² sobre o solo (equipotencialização das partes metálicas).
45	Massa de calafetar.
46	Perfilado 38x38.
47	Cabo de cobre nú 70mm ² .
48	Kanaflex 110mm.
49	Tomada auxiliar 2P+T padrão brasileiro 220V.
50	Canaleta 500x400x100mm
51	Fita de aço inoxidável.
52	Eletroleito 800x100mm Aba externa.
53	Tomada auxiliar 2P+T padrão brasileiro 220V (H=1200mm).
54	Interruptor (H=1200mm).
55	Exaustor para ventilação.
56	Eletroduto galvanizado 1".
57	Cabo de cobre nú 50mm ² .
58	Eletroduto de PVC rígido Ø 20mm.
59	Reservatório sistema de contenção de líquido isolante (capacidade 1100l).
60	Janela de iluminação natural.
61	Chave seccionadora fusível, classe 15KV.
62	Transformador de potencial, 13,8*1,73/0,115, 1000VA, para sinal da proteção.
63	Duto flexível 1".
64	Eletroduto galvanizado 20mm para circuito de antena.

2.2.3 COMPONENTES DO SISTEMA DE PROTEÇÃO: DISJUNTOR, RELÉ SECUNDÁRIO, TRANSFORMADORES DE TENSÃO E CORRENTE

O transformador de corrente é projetado conforme ABNT NBR 6856. A Figura 8 apresenta o esquemático do TC, com as impedâncias consideradas nos cálculos: impedância do secundário do TC Z_{tc} , impedância do cabo Z_{cabo} e impedância do relé $Z_{relé}$.

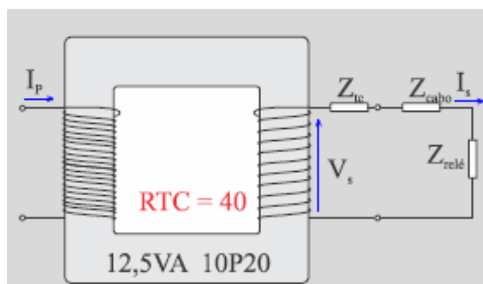


Figura 8: Esquemático utilizado para dimensionamento do TC.

Os critérios de sensibilidade e saturação são levados em consideração no projeto do TC. Neste caso, o $RTC = 40$ e TC 12,5VA 10P20 classe de exatidão 10% e fator de multiplicidade de corrente nominal igual a 20 são utilizados para atender ambos os critérios. O detalhamento e valores dos cálculos são mostrados na Tabela 15.

Tabela 15: Memorial de cálculo do transformador de corrente.

Descrição	Equação	Valores calculados
Corrente mínima para sensibilização do relé	$I_{pick-up,n}$	20A
Corrente máxima para sensibilização do relé sem causar saturação	$I_{cc,3f}$	561 A
Critério de sensibilidade: Corrente primária do TC deve ser menor ou igual a $10 \times I_{pick-up,n}$	$I_{p,tc} \leq 10 \times I_{pick-up,n}$	$I_{p,tc} = 200 \text{ A}$
Critério de saturação: tensão induzida no secundário do TC $V_{s,tc}$ não deve saturar, isto é, deve ser menor que a máxima tensão secundária induzida do relé escolhido $V_{s,max}$. Escolha do TC 45VA 10P30.	$V_{s,tc} \leq V_{s,max}$	$Z_{cabo} = 0,188\Omega$ $Z_{relé} = 0,06\Omega$ $Z_{tc} = 0,2 \times 0,45 + j0,2 \times 0,218 \Omega$ $RTC = 40$ $V_{s,max} = 25,56 < 7,35 \text{ V}$ $V_{s,tc} = 50 \text{ V}$

Com relação ao dimensionamento dos TPs de proteção, a Tabela 16 resume as principais especificações do equipamento projetado.

Tabela 16: Dimensionamento de TP de medição em 13,8 kV.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Relação de transformação	RTV	70:1
Grupo (fase-terra)	-	2
Especificação	-	0,3P75
Tensão primária-secundária	$V_p: V_s$	13,8k/ $\sqrt{3}$: 115 V

No dimensionamento de TPs para proteção, deve-se atentar principalmente à potência nominal ou carga nominal do equipamento (para garantir a classe de exatidão). Por outro lado, para TPs de alimentação da proteção e/ou emergência, pode-se projetá-lo atendendo os critérios da potência térmica do transformador. As Tabelas 17 e 18 apresentam as demandas da carga da subestação e da proteção, exigindo dois TPs com potência térmica de 1500 VA.

Tabela 17: Quadro de carga da subestação para alimentação auxiliar.

Carga	Qtde.	Potência individual			Potência total		FD	Demanda	
		kW	FP	kVA	kW	kVA		kW	kVA
Lâmpada fluorescente 2x40W	4	0,08	0,85	0,09	0,32	0,38	1	0,32	0,38
Lâmpada emergência	2	0,1	0,85	0,12	0,2	0,24	0,25	0,05	0,06
Tomada	4	0,21	0,85	0,25	0,85	1	0,5	0,43	0,5
Demanda total em kVA									0,94

Tabela 18: Quadro de carga da subestação para alimentação da proteção.

Carga	Qtde.	Potência individual			Potência total		FD	Demanda	
		kW	FP	kVA	kW	kVA		kW	kVA
Lâmpada disjuntor ON	1	0,003	0,85	0,003	0,003	0,003	0,5	0,001	0,002
Lâmpada disjuntor OFF	1	0,003	0,85	0,003	0,003	0,003	0,5	0,001	0,002
Lâmpada mola carregada	1	0,003	0,85	0,003	0,003	0,003	1	0,003	0,003
Motor carregamento mola	1	0,6	0,85	0,7	0,6	0,7	1	0,6	0,7
Bobinas de fechamento e abertura	2	0,085	0,85	0,1	0,17	0,2	1	0,17	0,2
Cargas no no-break	1	0,085	0,85	0,1	0,085	0,85	1	0,085	0,85
Carga relé	1	0,005	0,85	0,006	0,005	0,006	1	0,085	0,85
Demanda total em kVA									1,013

Finalmente, as especificações do disjuntor de MT são mostradas na Tabela 19, modelo VBWC630.

Tabela 19: Especificação do disjuntor de MT.

Parâmetro	Valor
Tensão máxima de operação	17,5 kV
Tensão nominal de operação	13,8 kV
Corrente máxima de interrupção	25 kA
Tecnologia de interrupção	À vácuo
Corrente nominal	630 A
Vida útil (ciclos de manobra)	20.000
Tempo de fechamento	≤ 60 ms
Tempo de abertura	≤ 40 ms
Tensão nominal de impulso	95 kV
Massa	55 kg
Tensão nominal de alimentação auxiliar	24~30 Vcc 110~220 Vca

2.2.4 COMPONENTES DO SISTEMA DE MEDIÇÃO E TRANSFORMAÇÃO

Transformadores de corrente de medição são utilizados para fins de medição das correntes em um sistema de média tensão. A concessionária quem instala estes dispositivos. São exigidas características de boa precisão (ex.: 0,3%-0,6% de erro de medição) e baixa corrente de saturação (4 vezes a corrente nominal) [1].

O dimensionamento do TC de medição pode ser feito em função do fator térmico e demanda da instalação conforme Tabela 20. Para a demanda de 2500 kVA, o transformador de corrente com fator térmico unitário de RTC igual a 40 atende as especificações de projeto.

Tabela 20: Dimensionamento de TCs de medição em 13,8 kV.

Transformador de corrente primário-secundário	Demanda	
	FT* = 1	FT* = 1,5
5-5	Até 100 kVA	Até 100 kVA
10-5	De 100 a 200 kVA	De 100 a 300 kVA
15-5	De 150 a 300 kVA	De 150 a 400 kVA
20-5	De 200 a 400 kVA	De 200 a 600 kVA
25-5	De 250 a 500 kVA	De 250 a 750 kVA
30-5	De 300 a 600 kVA	De 300 a 900 kVA
40-5	De 400 a 800 kVA	De 400 a 1200 kVA
50-5	De 500 a 1000 kVA	De 500 a 1500 kVA
75-5	De 750 a 1500 kVA	De 750 a 2250 kVA
100-5	De 1000 a 2000 kVA	De 1000 a 3000 kVA
150-5	De 1500 a 3000 kVA	De 1500 a 4500 kVA

200-5	De 2000 a 4000 kVA	De 2000 a 6000 kVA
300-5	De 3000 a 6000 kVA	De 3000 a 9000 kVA
400-5	De 4000 a 8000 kVA	De 4000 a 12000 kVA
*Fator térmico nominal		

No dimensionamento de TPs para medição sob fornecimento de 13,8kV, considera-se a Tabela 21.

Tabela 21: Dimensionamento de TP de medição em 13,8 kV.

Relação de transformação	Medição
70:1	A três elementos

2.2.5 ATERRAMENTO DA SUBESTAÇÃO

De acordo com a ND 5.3 da Cemig, subestação maior ou igual a 500 kVA devem possuir 12 eletrodos de aterramento, interligados por condutor de cobre nu, rígido, seção 50 mm². A Figura 9 apresenta como ficará o aterramento da subestação projetada.

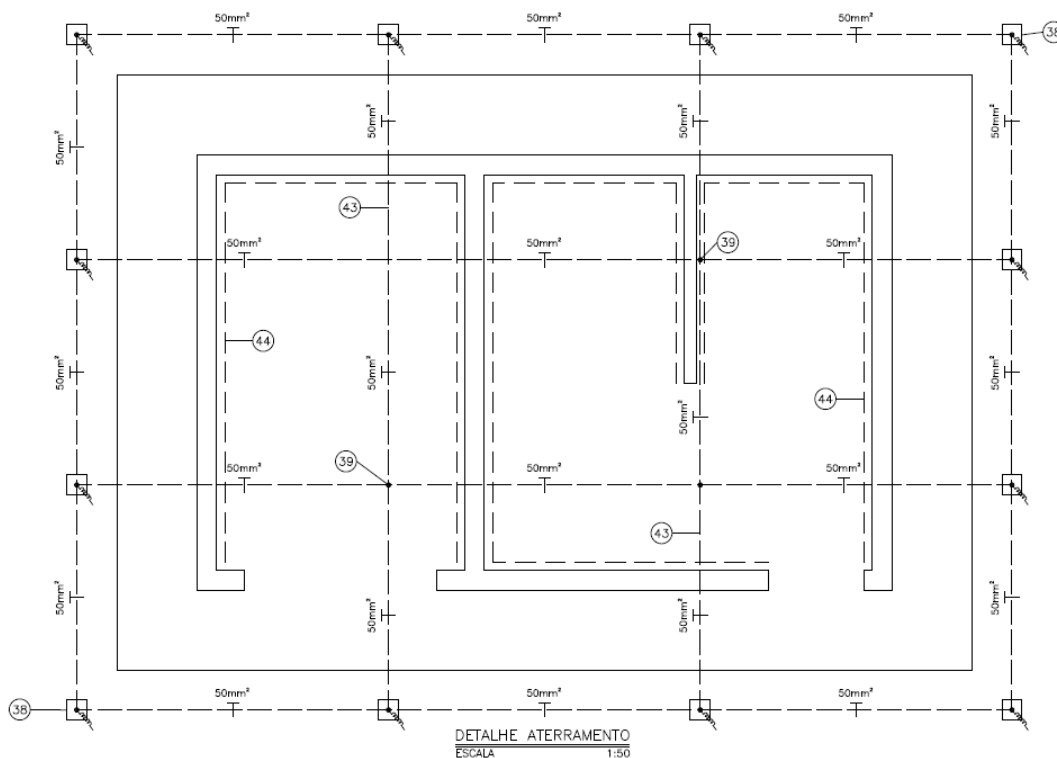


Figura 9: Detalhe do aterramento da subestação.

Por fim, são previstos "rabichos" de 500 mm em vários pontos para prover o aterramento de carcaças de equipamentos, ferragens, telas e como reserva para eventual necessidade de novos pontos de aterramento.

2.3 ESTUDOS DE PROTEÇÃO

Os valores base utilizados para os cálculos de curto circuito estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Valores base utilizados nos estudos de proteção.

Grandezas	Símbolo	Valor
Potência aparente de base	S_b	100 MVA
Tensão primária de base	V_b	13,8 kV

Baseado na Tabela 22, a corrente de base (sistema pu) é definida como:

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}V_b} = \frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3} 13,8 \text{ kV}} = 4183,7 \text{ A.} \quad (1)$$

2.3.1 NÍVEL DE CURTO-CIRCUITO FORNECIDO PELA CONCESSIONÁRIA

A Tabela 23 apresenta o nível de curto circuito que será adotado para elaboração do projeto.

Tabela 23: Nível de Curto Circuito fornecido pela CEMIG.

Corrente de curto-circuito	Sequência + [A]	Sequência - [A]	Sequência 0 [A]
Falta fase-fase (L-L)	$1866\angle -144,8^\circ$	$1866\angle 35,2^\circ$	$0\angle 0^\circ$
Falta fase-terra (L-G)	$1371,1\angle -146,2^\circ$	$1371,1\angle -146,2^\circ$	$1371,1\angle -146,2^\circ$
Falta fase-fase-terra (2L-G)	$2624,9\angle -145,7^\circ$	$1104,9\angle 37,3^\circ$	$1522,6\angle 32,1^\circ$
Falta trifásica (3L)	$3724,1\angle -144,8^\circ$	$0\angle 0^\circ$	$0\angle 0^\circ$

A Tabela 24 apresenta as impedâncias de curto circuito fornecido pela concessionária de sequência positiva (+), sequência negativa (-) e sequência zero (0).

Tabela 24: Impedância na barra da SE.

Impedância equivalente da barra da SE Araçuaí	Sequência + [Ω]	Sequência - [Ω]	Sequência 0 [Ω]
	$Z_{eq}^+ = 0,18758 + j2,04182$	$Z_{eq}^- = 0,18758 + j2,04182$	$Z_{eq}^0 = 0 + j1,48164$

2.3.2 CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Para os cálculos de curto-circuito, a resistência e reatância de seqüências dos cabos de alumínio das redes de distribuição compactas da concessionária são modeladas conforme Tabela 25.

Tabela 25: Dados de impedância de sequência dos cabos da rede RDP da SE CEMIG Araçuaí até a barra de conexão do acessante. *Valores obtidos para uma temperatura de 90 °C.

Seção [mm ²]	Sequência zero* - Z^0	Sequência pos. e neg.* - $Z^+ = Z^-$
50	2,245 + j2,5991 Ω/km	0,445 + j0,1127 Ω/km
150	1,9502 + j2,4843 Ω/km	0,152 + j0,1073 Ω/km
OBS.: Temperatura ambiente considerada de 30°C		

As impedâncias de sequência dos cabos de cobre da instalação do acessante, utilizadas no cálculo de curto-circuito, são mostradas na Tabela 26.

Tabela 26: Dados de impedância de sequência dos cabos de cobre utilizados na rede interna do acessante. *Valores obtidos para uma temperatura de 90 °C.

Seção [mm ²]	Sequência zero* - Z^0	Sequência pos. e neg.* - $Z^+ = Z^-$
25	2,822 + j1,8222 Ω/km	0,9482 + j0,1924 Ω/km
50	2,3323 + j1,7047 Ω/km	0,4748 + j0,1748 Ω/km
OBS.: Temperatura ambiente considerada de 30°C.		

Para definição de alguns parâmetros da proteção, é necessário definir as características do transformador de potência instalado, cujas informações estão apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27: Características elétricas do transformador a seco.

Característica dos transformadores	Valor
Potência aparente [kVA]	3000
Tensão primária [V]	13800
Tensão secundária [V]	380
Impedância [%]	6,0 %
Classe material isolante	ONAN
Grupo de ligação	Dyn1
Frequência [Hz]	60
X/R	4,65

A Figura 10 apresenta a tabela resumo das contribuições da CEMIG e da usina solar fotovoltaica (UFV) para as correntes de CC nas diversas barras. O diagrama de impedâncias é mostrado na Figura 10 para consulta.

Contribuição concessionária:

BARRAS DO SISTEMA	I _{cc} 3F [A]	I _{cc} FT [A]
P1	3724,1<-144,8°	1371,1<-146,2°
P2	3885,76<-84,75°	4227,92<-86,20°
P3	1680,75<-54,67°	340,62<-50,06°
P4	1674,57<-87,38°	339,47<-49,99°
P5	1673,34<-87,39°	339,24<-49,99°
S1	43546,36<-87,91°	56056,70<-63,09°
S2	35281,99<-56,70°	27095,78<-54,02°

Contribuição acessante:

BARRAS DO SISTEMA	I _{cc} 3F [A]	I _{cc} FT [A]
P1		
P2	198,76<-83,82°	216,26<-85,28°
P3	209,29<-87,35°	42,42<-82,73°
P4	209,33<-87,38°	42,43<-82,88°
P5	209,33<-87,39°	42,44<-82,91°
S1	8017,36<-87,91°	10320,68<-89,68°
S2	8257,30<-90°	6341,42<-87,32°

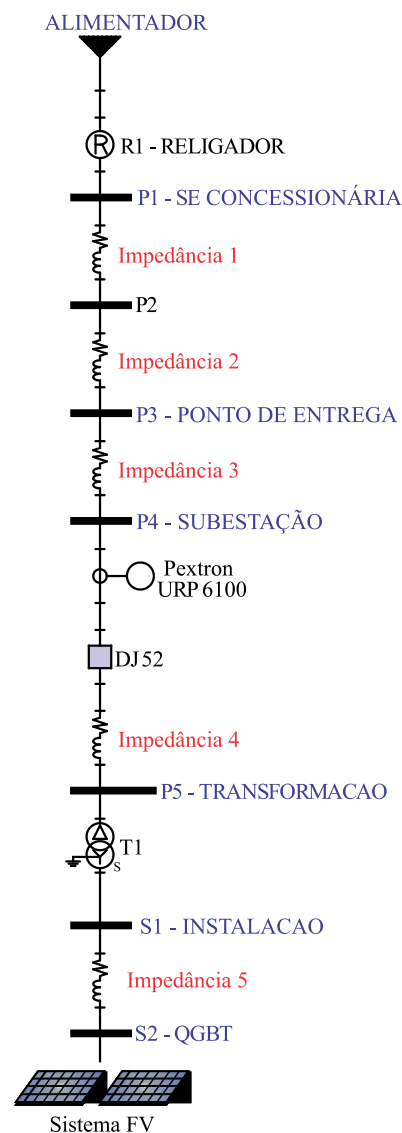


Figura 10: Resumo das contribuições da concessionária e da usina solar fotovoltaica (UFV) para as correntes de CC nas diversas barras

Nos cálculos de curto-circuito apresentados na Figura 10: Resumo das contribuições da concessionária e da usina solar fotovoltaica (UFV) para as correntes de CC nas diversas barras

, as seguintes premissas foram adotadas:

- As impedâncias de sequência foram obtidas através das Tabelas 23 e 24. A impedância do transformador foi obtida conforme Tabela 27. A Tabela 28 apresenta as impedâncias equivalentes de sequência positiva e zero do sistema, referenciadas à Figura 9.
- Assume-se que a corrente de curto-circuito dos geradores conectados via inversor é de 2 vezes o valor da corrente nominal do inversor;

- Testes em inversores trifásicos comerciais mostraram que a corrente pode atingir até duas vezes a corrente nominal por até 10 ciclos.

Tabela 28: Impedâncias equivalentes de sequência positiva e zero do sistema.

Referência na Figura 15	Comprimento [km]	Impedância eq. de sequência positiva [Ω]	Impedância eq. sequência zero [Ω]
Impedância 1	0	$0,1876 + j2,0418$	$0 + j1,4816$
Impedância 2	17	$2,5534 + j1,8258$	$33,153 + j42,233$
Impedância 3	0,05	$0,0223 + j0,0056$	$0,1123 + j0,13$
Impedância 4	0,01	$0,0045 + j0,0011$	$0,0225 + j0,026$
Impedância 5	0,01	$0,001 + j0,0008$	$0,0101 + j0,0076$

Portanto, de acordo com estas informações, os estudos de curto-circuito consideram a contribuição de corrente de uma UFV limitada em 2 pu com duração de até 10 ciclos (167 ms). Além disso, a corrente nominal da UFV para um fator de potência de 0,92 é de 4128,65 A.

2.3.3 PARAMETRIZAÇÃO DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO

A Tabela 29 apresenta as características das curvas de proteção de fase e neutro do religador para coordenação com a proteção do acessante.

Tabela 29: Ajustes de religadores para coordenação, fornecidas pela concessionária.

Ajuste de fase		Ajuste de neutro	
Pick-up	1200 A	Pick-up	60 A
Curva	IEC VI (Muito inverso)	Curva	TD (Tempo definido)
Dial	0,1	Tempo	8 s
T. adicional	-	T. adicional	-

A Tabela 30 apresenta a configuração para conexão do gerador fotovoltaico com potência nominal de 2500 kW_p, instalados em consumidores atendidos através de subestação de entrada abrigada. As funções de proteção exigidas pela ND 5.31 para este acessante são:

- Função 32(1) e (2) - Direcional de potência (atuação quando a injeção de potência ultrapassa 105% da potência nominal da UFV por 15s; atuação quando a absorção de potência ultrapassa 105% da potência demandada da instalação por 15 s);
- Funções 67(1) e (2), 67N(1) e (2) – Direcional de corrente de fase e neutro.

Além disso, as proteções serão parametrizadas no relé de proteção PEXTRON URP 6100, instalado em cubículo de proteção abrigado. A Tabela 25 apresenta um resumo das proteções implementadas no relé Pextron URP 6100 e suas respectivas parametrizações/ajustes conforme ND 5.31.

Conforme mostrado anteriormente, três TPs, conectados em estrela $13.800/\sqrt{3} - 115V (70:1)$ e três TCs 40:5A são utilizados para adequar os sinais primários aos níveis requeridos pelo relé.

Tabela 30: Definição das proteções e suas respectivas parametrizações de acordo com a norma ND 5.31.

Código ANSI	Descrição	Parâmetro	Ajuste	Referência
32 (1)	Direcional de Potência (Sentido CEMIG)	Potência Ativa	2500 kW	Página ND 5.31 (170/171)
		Tempo	15 s	
32 (2)	Direcional de potência (sentido acessante)	Potência Ativa	2500 kW	Página ND 5.31 (172/173)
		Tempo	15 s	
67 (1)	Direcional de sobrecorrente de fase (sentido conc.)	Pickup (A)	1649,28	Página ND 5.31 (172/173)
		Curva	EI	
		Dial	0,2	
		Tempo Adicional	-	
		Instantâneo	-	
67 (2)	Direcional de sobrecorrente de fase (sentido acessante)	Pickup (A)	1649,28 A	Página ND 5.31 (172/173)
		Curva	EI	
		Dial	0,1	
		Instantâneo	1570,75A	
		Tempo Adicional	-	
67N (1)	Sobrecorrente de neutro	Pickup (A)	40 A	Página ND 5.31 (175)
		Curva	Tempo definido	
		Dial	-	
		Tempo Adicional	6 s	
		Instantâneo	-	
		Ângulo	110°	
67N (2)	Direcional de Sobrecorrente de neutro	Pickup (A)	40 A	Página ND 5.31 (175)
		Curva	Tempo definido	
		Dial	-	
		Tempo Adicional	6 s	
		Instantâneo	316,29A	
		Ângulo	-	

2.3.4 ESTUDO DE SELETIVIDADE E COORDENAÇÃO

As Figuras 11 e 12 apresentam os coordenograma de proteção fase e neutro, respectivamente, em papel formatado bi-log tempo \times corrente, onde se pode verificar a coordenação e seletividade da proteção dimensionada para qualquer valor de corrente. As correntes estão referidas ao primário. Além disso, os seguintes pontos de operação podem ser encontrados nos gráficos:

- Correntes ANSI do transformador;
- Correntes de curto-circuito trifásico ($I_{cc,3f}$) e fase-terra ($I_{cc,ft}$) fornecidos pela CEMIG;
- Corrente de magnetização dos transformadores (I_{mag});
- Curva temporizada IEC muito inversa de fase, do religador;
- Curva temporizada IEC extremamente inversa de fase 67(1), sem unidade instantânea, do relé Pextron URP6100;
- Curva temporizada IEC extremamente inversa de fase 67(2), com unidade instantânea, do relé Pextron URP6100;
- Curva tempo definido de neutro 67N(1), sem unidade instantânea, do relé Pextron URP6100;
- Curva tempo definido de neutro 67N(1), com unidade instantânea, do relé Pextron URP6100.

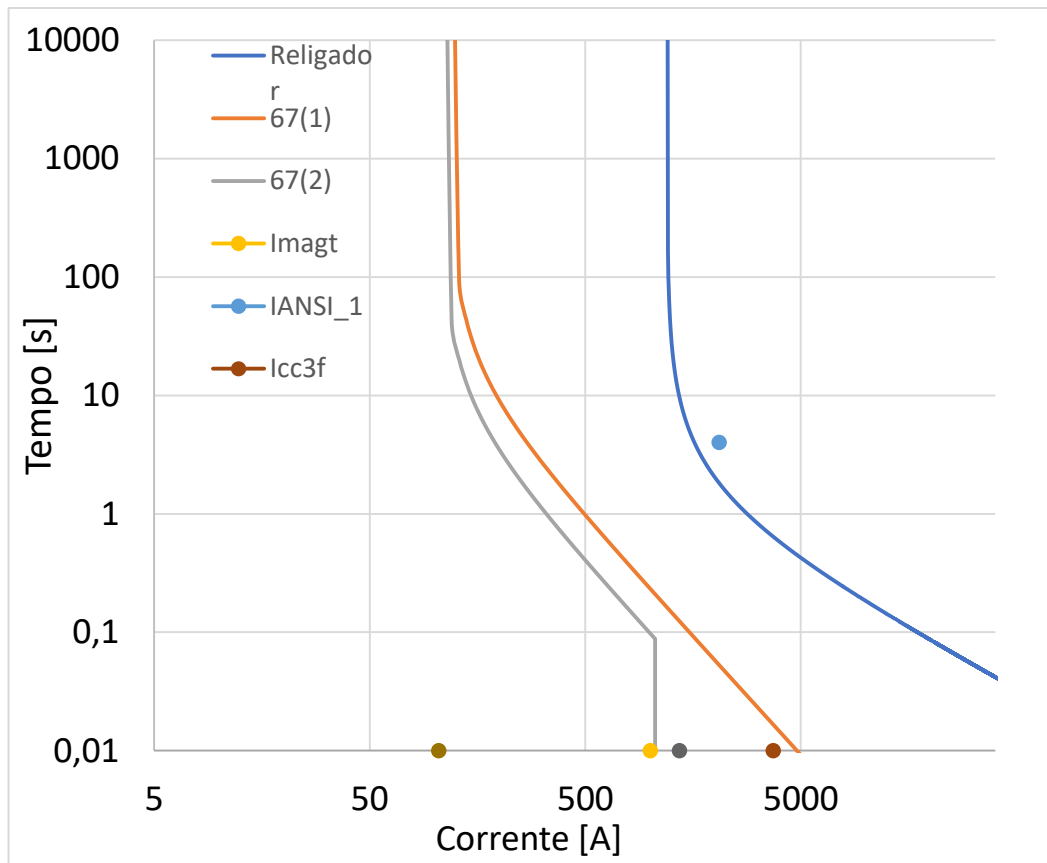


Figura 11: Coordenograma de Proteção Fase.

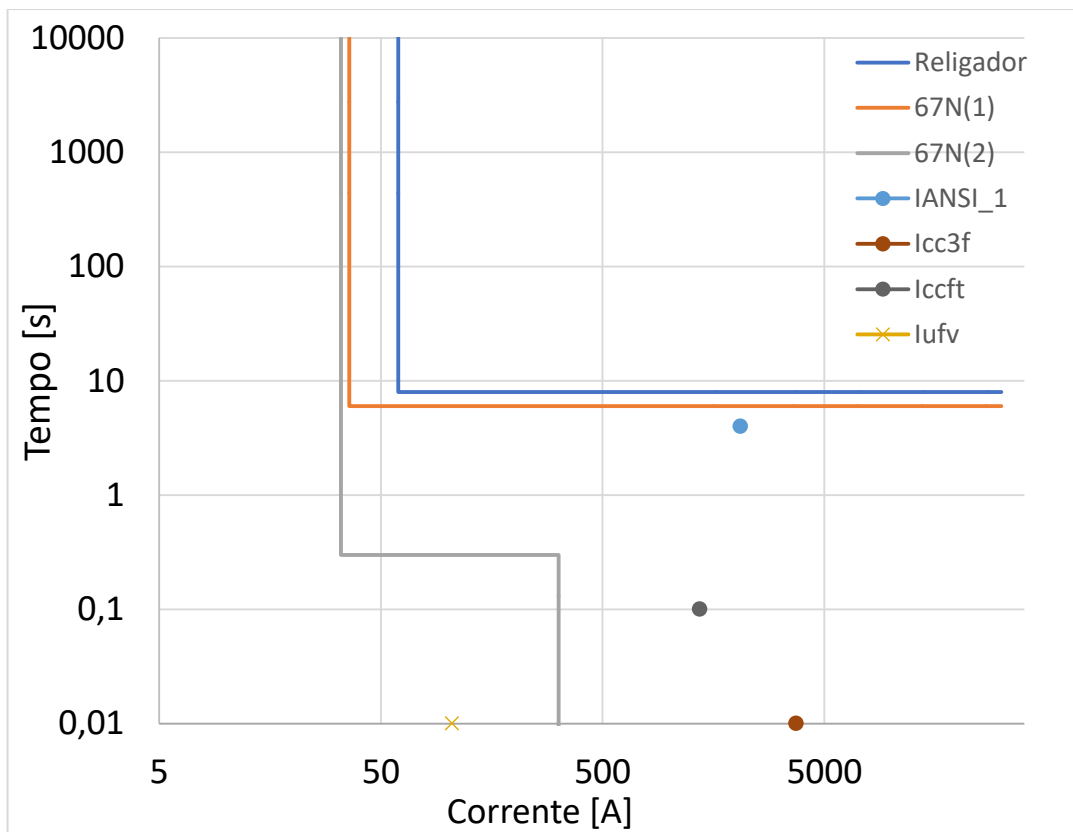


Figura 12: Coordenograma de Proteção Neutro.

3- Análise de Viabilidade Econômica

Este capítulo tem como objetivo avaliar a produção estimada da usina solar fotovoltaica pelo seu custo de implantação e manutenção.

3.1 PRODUÇÃO ESTIMADA

A Tabela 31 apresenta a produção estimada da usina solar fotovoltaica projetada e a respectiva renda esperada considerando a venda do kWh por R\$0,85 na modalidade de geração compartilhada.

Tabela 31: Produção Estimada x valor em reais.

PRODUÇÃO MÉDIA kWh	VALOR EM R\$
12.098/dia	R\$10.283,00
362.940/mês	R\$308.500,00
4.415.770/ano	R\$3.753.400,00

3.2 ANÁLISE DE DESPESAS: MANUTENÇÃO, LIMPEZA, CONCESSIONÁRIA E SUBESTAÇÃO.

A Tabela 32 apresenta os custos estimados para a implantação da usina de 2500 KWp, onde 62% dos custos são relativos ao kit fotovoltaico e cabos, conforme pode ser visto na Figura 13.

Tabela 32: Custo para implantação da usina de 2500 KWp.

ITEM	VALOR
Kit fotovoltaico para usina de 2,5MWp(infraestrutura de solo, módulos fotovoltaicos, inversores e cabos CC)	R\$ 7.938.955,38
Reforço de Rede Cemig (valor estimado de acordo com o mapa de disponibilidade CEMIG [8])	R\$4.000.000,00
Subestação	R\$424.400,00
Aquisição do terreno	R\$60.000,00
Terraplanagem e fechamento Perimetral	R\$50.000,00
Diversos	R\$50.000,00
Execução da obra	R\$300.000,00
TOTAL	R\$ 12.823.355,38

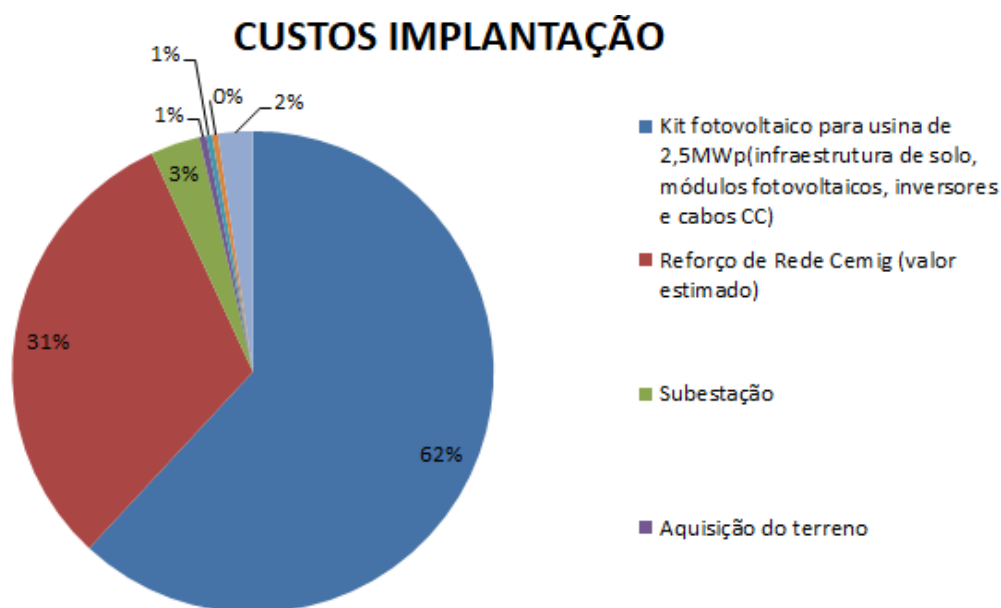


Figura 13: Custos estimados para implantação da usina.

3.3 DESPESAS FIXAS APÓS A IMPLANTAÇÃO DA USINA

A Tabela 33 apresenta os custos fixos que a usina terá durante sua operação. O custo de disponibilidade é relativo à demanda contratada, na qual a tarifa considerada foi de R\$0,85 por kW.

Tabela 33: Custos fixos mensais durante a operação.

ITEM	VALOR
Manutenção mensal	R\$12.000,00
Impostos mensais (ISS)	R\$46.275,00
Custo disponibilidade Cemig mensal	R\$48.476,22
Total	R\$106.751,22

3.4 ANÁLISE DA VIABILIDADE

A Tabela 35 apresenta as análises de viabilidade estudadas para o presente projeto. Apesar do elevado investimento, a taxa interna de retorno (TIR) de 21,20% e *pay-back* descontado de 5,05 anos mostram um empreendimento atrativo e viável do ponto de vista financeiro. A Figura 18 apresenta o fluxo de caixa.

Tabela 34: Fluxo de caixa.

Fluxo de Caixa	Saldo Acumulado	Fluxo Descont.	Saldo Descontado	Ano
-R\$ 10.790.609	-R\$ 10.790.609	-R\$ 10.790.609	-R\$ 10.790.609	0
R\$ 2.170.372	-R\$ 8.620.237	R\$ 2.067.021	-R\$ 8.723.588	1
R\$ 2.317.022	-R\$ 6.303.214	R\$ 2.101.608	-R\$ 6.621.980	2
R\$ 2.473.278	-R\$ 3.829.936	R\$ 2.136.511	-R\$ 4.485.469	3
R\$ 2.639.760	-R\$ 1.190.176	R\$ 2.171.737	-R\$ 2.313.733	4
R\$ 2.817.125	R\$ 1.626.949	R\$ 2.207.291	-R\$ 106.441	5
R\$ 3.006.075	R\$ 4.633.023	R\$ 2.243.179	R\$ 2.136.738	6
R\$ 3.207.353	R\$ 7.840.376	R\$ 2.279.406	R\$ 4.416.144	7
R\$ 3.421.750	R\$ 11.262.127	R\$ 2.315.975	R\$ 6.732.119	8
R\$ 3.650.109	R\$ 14.912.235	R\$ 2.352.893	R\$ 9.085.012	9
R\$ 3.893.322	R\$ 18.805.557	R\$ 2.390.162	R\$ 11.475.173	10
R\$ 4.152.338	R\$ 22.957.895	R\$ 2.427.786	R\$ 13.902.960	11
R\$ 4.428.169	R\$ 27.386.064	R\$ 2.465.770	R\$ 16.368.729	12
R\$ 4.721.885	R\$ 32.107.949	R\$ 2.504.117	R\$ 18.872.846	13
R\$ 5.034.628	R\$ 37.142.577	R\$ 2.542.829	R\$ 21.415.675	14
R\$ 5.367.607	R\$ 42.510.183	R\$ 2.581.911	R\$ 23.997.586	15
R\$ 5.722.107	R\$ 48.232.290	R\$ 2.621.363	R\$ 26.618.949	16
R\$ 6.099.495	R\$ 54.331.785	R\$ 2.661.189	R\$ 29.280.138	17
R\$ 6.501.219	R\$ 60.833.004	R\$ 2.701.391	R\$ 31.981.529	18
R\$ 6.928.820	R\$ 67.761.824	R\$ 2.741.970	R\$ 34.723.498	19
R\$ 7.383.933	R\$ 75.145.757	R\$ 2.782.927	R\$ 37.506.425	20

Tabela 35: Análise de viabilidade do projeto.

VPL	R\$ 8.270.213,00
TIR	21,20%
PAYBACK SIMPLES	4,42 anos
PAYBACK DESCONTADO	5,05 anos

4- Projeto Elétrico

A usina solar fotovoltaica será implantada na zona rural da cidade de Virgem da Lapa, MG. Este capítulo objetiva mostrar alguns aspectos do projeto elétrico desenvolvido: cortes da subestação e diagrama unifilar.

4.1 CORTES DA SUBESTAÇÃO

A Figura 14 apresenta a planta baixa da subestação, enquanto as Figuras 15 a 21 apresentam os cortes da subestação projetada para atender a usina solar fotovoltaica. As respectivas numerações nestas figuras estão discriminadas no projeto anexado neste documento. A subestação é dimensionada conferindo as distâncias mínimas para um bom arrefecimento e conforme prescrições da ND 5.3 e 5.31. Maiores informações sobre a disposição dos equipamentos podem ser encontradas nestas normas.

O atendimento é subterrâneo, em 13,8 kV. As terminações são do tipo enfaixada, na qual deriva-se barramentos tipo vergalhão 3/8" até os dispositivos de medição da concessionária. Estruturas de fixação mecânica dos vergalhões são previstas, conforme mostrado nas Figuras 18 a 25. Buchas de passagem do tipo interna-interna são utilizadas entre os cubículos de medição e proteção. Grades até o teto para proteção do operador e chave seccionadora sem base fusível são previstas nos cubículos de medição e proteção. No cubículo de transformação, chave seccionadora com base fusível é utilizada para proteção de retaguarda do transformador.

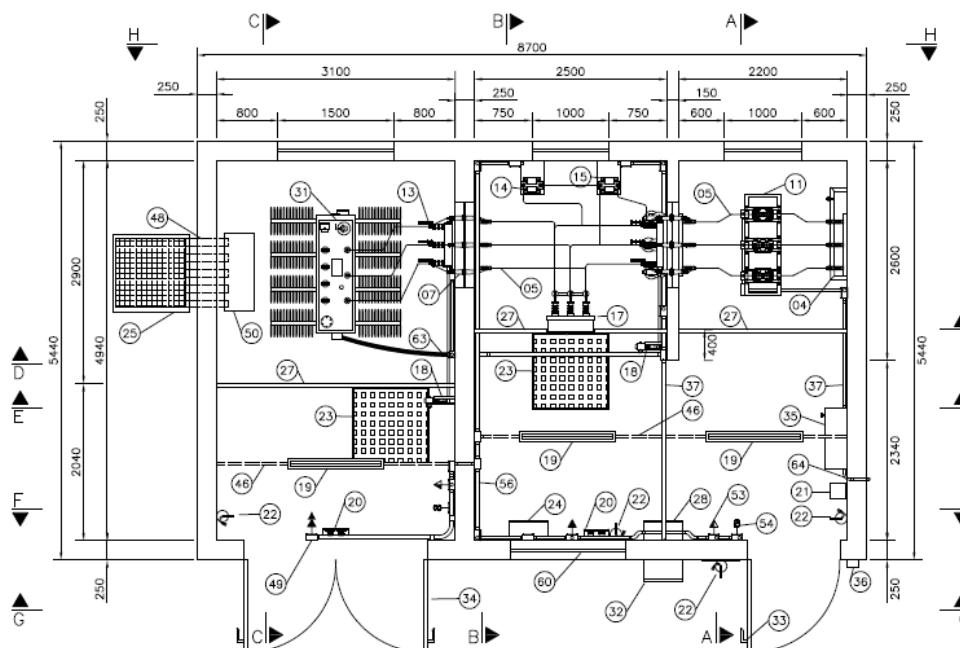
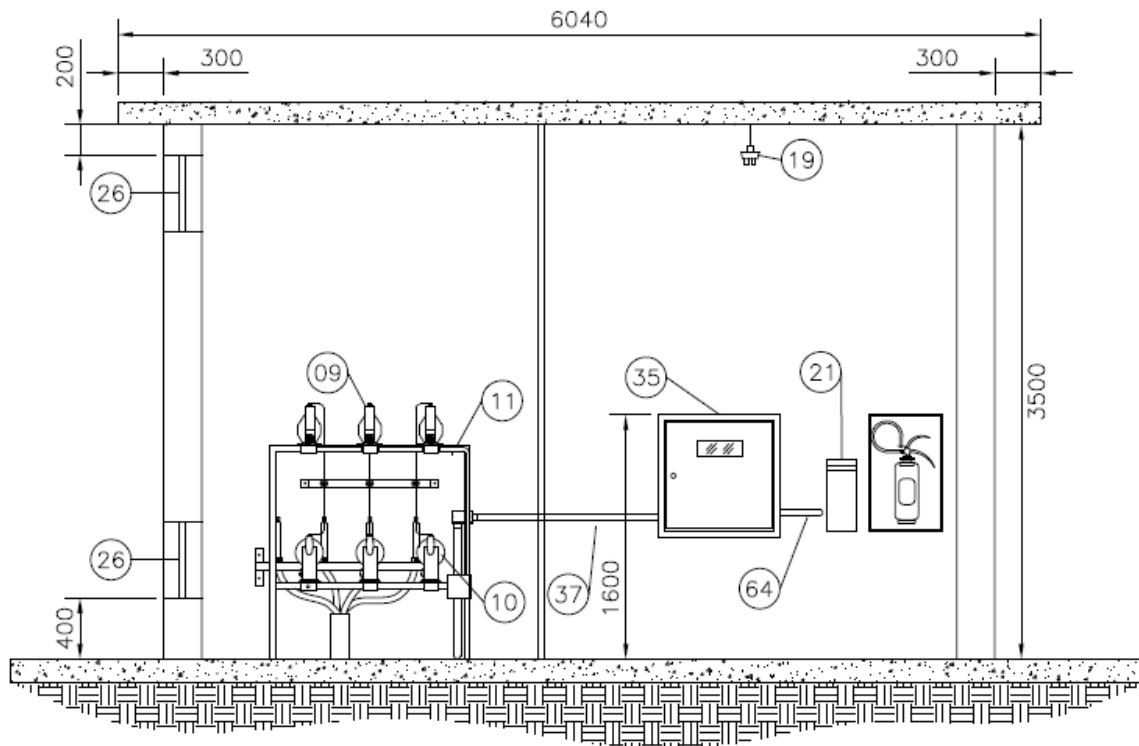


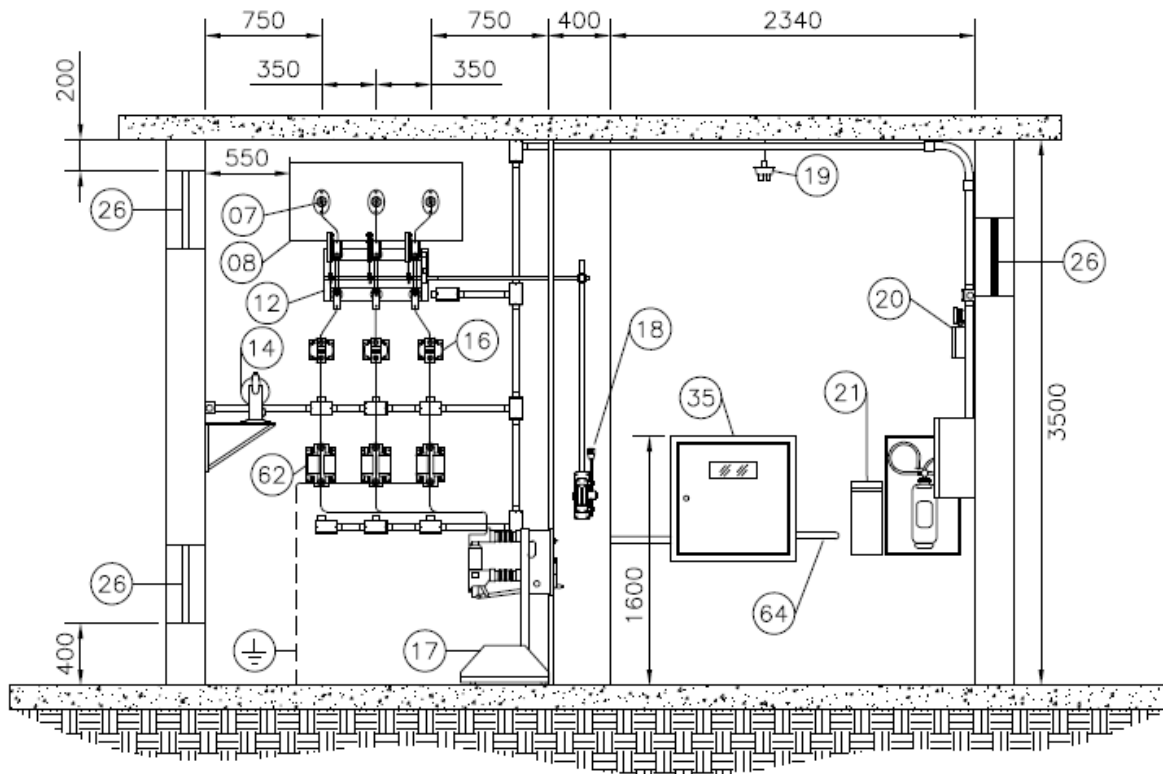
Figura 14: Planta baixa da subestação.



CORTE A-A

Figura 15: Corte A-A.

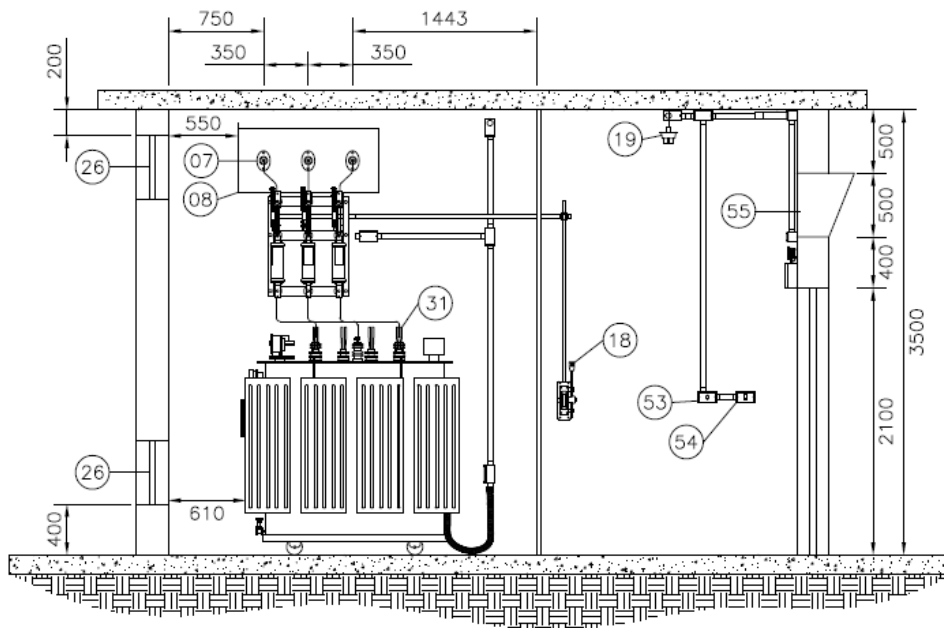
No corte A-A, Figura 15, temos os seguintes componentes da subestação, (09) Transformado de corrente 15KV, a ser fornecido pela CEMIG, (10) Transformado de potencial 15KV, a ser fornecido pela CEMIG, (11) Suporte para Transformadores de medição, (19) Iluminação interna, luminária comercial de emergência, 2x40W, hermética, (21) Caixa para luva de borracha 15KV, com proteção de raspas, (26) Janela de ventilação, tipo veneziana, com armação de cantoneira e tela de arame galvanizado 18 BWG, com malha de 13mm, (35) Caixa padrão para instalação de medidores, (64) Eletroduto galvanizado 20mm para circuito de antena.



CORTE B-B

Figura 16: Corte B-B.

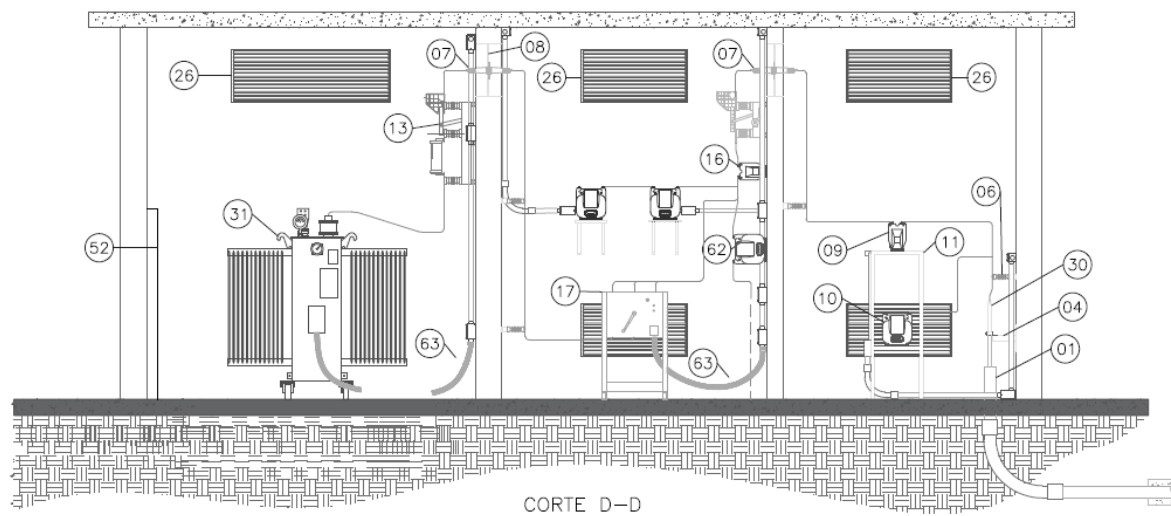
No corte B-B, Figura 16, temos os seguintes componentes da subestação, (07) Bucha de passagem interno/interno, 15KV com tirante de 5/8", (08) Chapa suporte para fixação de bucha de passagem, (12) Chave seccionadora tripolar, comando simultâneo, abertura sob carga, 400 A, 15KV sem base fusível, (14) Transformado de potencial, 13,8/0,22 - 0,11,1000VA, para serviços auxiliares, (16) Transformador de corrente para proteção relação 50:5A, 10B100, 15KV, (17) Disjuntor a vácuo,15KV,630A, capacidade de interrupção de 350MVA motorizado, com bobina de abertura e fechamento, (18) Punho de acionamento da chave seccionadora, (19) Iluminação interna, luminária comercial de emergência, 2x40W, hermética, (20) Sistema de iluminação de emergência, luminária led, 36W, hermética com autonomia mínima de 4 horas, (21) Caixa para luva de borracha 15KV, com proteção de raspas, (26) Janela de ventilação, tipo veneziana, com armação de cantoneira e tela de arame galvanizado 18 BWG, com malha de 13mm, (35) Caixa padrão para instalação de medidores, (62) Transformador de potencial, 13,8*1,73/0,115, 1000VA, para sinal da proteção, (64) Eletroduto galvanizado 20mm para circuito de antena.



CORTE C-C

Figura 17: Corte C-C.

No corte C-C, Figura 17, temos os seguintes componentes da subestação, (07) Bucha de passagem interno/interno, 15KV com tirante de 5/8", (08) Chapa suporte para fixação de bucha de passagem, (18) Punho de acionamento da chave seccionadora, (19) Iluminação interna, luminária comercial de emergência, 2x40W, hermética, (26) Janela de ventilação, tipo veneziana, com armação de cantoneira e tela de arame galvanizado 18 BWG, com malha de 13mm, (31) Transformador a óleo, 3000KVA, 13800/380V, primário em delta e secundário em estrela, tipo Dyn1, com 3 TAP's no mínimo (13800V, 13200V, 12600V), (53) Tomada auxiliar 2P+T padrão brasileiro 220V (H=1200mm), (54) Interruptor (H=1200mm).



CORTE D-D

Figura 18: Corte D-D.

No corte D-D, Figura 18, temos os seguintes componentes da subestação, (01) Eletroduto Galvanizado, imersão a quente, $\Phi 110\text{mm}$, (04) Suporte para fixação das muflas, (05) Vergalhão de cobre maciço, $\Phi 3/8''$, (07) Bucha de passagem interno/interno, 15KV com tirante de $5/8''$, (08) Chapa suporte para fixação de bucha de passagem, (18) Punho de acionamento da chave seccionadora, (09) Transformado de corrente 15KV, a ser fornecido pela CEMIG, (10) Transformado de potencial 15KV, a ser fornecido pela CEMIG, (11) Suporte para Transformadores de medição, (13) Chave seccionadora tripolar, comando simultâneo, abertura sob carga, 400 A, 15KV com base fusível, (16) Transformador de corrente para proteção relação 50:5A, 10B100, 15KV, (17) Disjuntor a vácuo, 15KV, 630A, capacidade de interrupção de 350MVA motorizado, com bobina de abertura e fechamento, (26) (26) Janela de ventilação, tipo veneziana, com armação de cantoneira e tela de arame galvanizado 18 BWG, com malha de 13mm, (31) Transformador a óleo, 3000KVA, 13800/380V, primário em delta e secundário em estrela, tipo Dyn1, com 3 TAP's no mínimo (13800V, 13200V, 12600V), (52) Eletroleito 800x100mm Aba externa, (62) Transformador de potencial, $13,8*1,73/0,115$, 1000VA, para sinal da proteção, (63) Duto flexível 1".

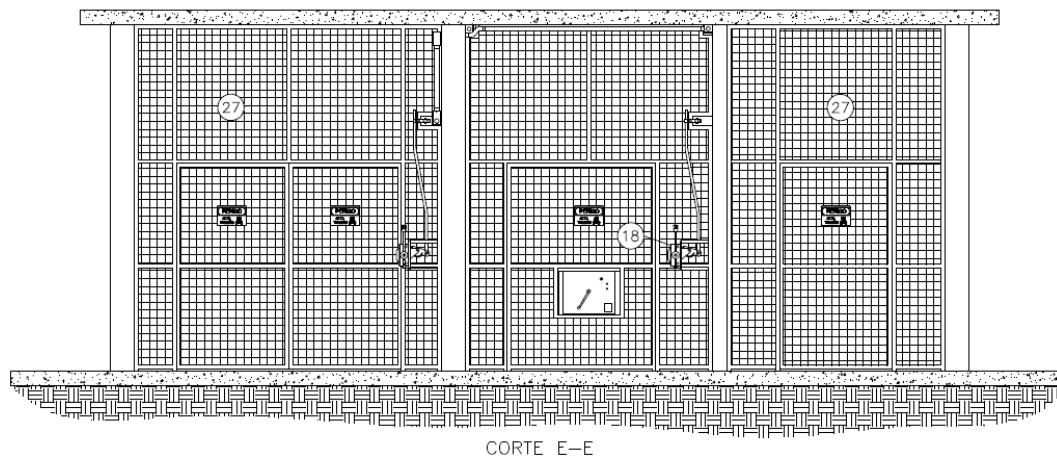


Figura 19: Corte E-E.

No corte E-E, Figura 19, temos os seguintes componentes da subestação, (18) Punho de acionamento da chave seccionadora, (27) Grade de proteção.

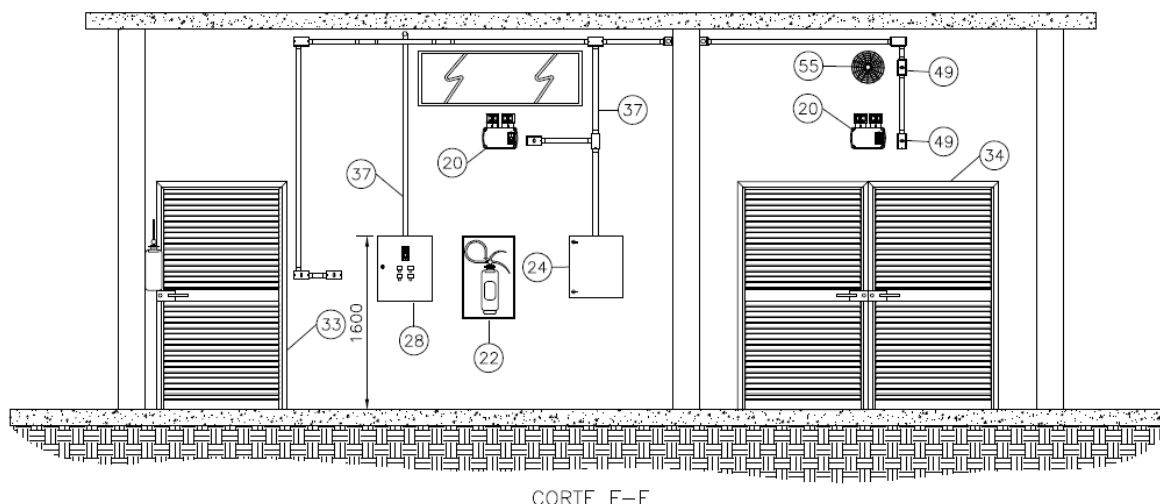


Figura 20: Corte F-F.

No corte F-F, Figura 20, temos os seguintes componentes da subestação, (20) Sistema de iluminação de emergência, luminária led, 36W, hermética com autonomia mínima de 4 horas, (22) Extintor tipo CO₂, capacidade mínima 6kg, (24) Quadro para alimentação das cargas dos serviços auxiliares da subestação, (28) Relé de proteção secundária, com no-break de 1000VA e TRIP capacitivo, (33) Porta tipo veneziana, 2100x1200mm, (34) Porta tipo veneziana, 2100x1200mm (duas folhas), (37) Eletroduto galvanizado, 1 ½", (49) Tomada auxiliar 2P+T padrão brasileiro 220V, (55) Exaustor para ventilação.

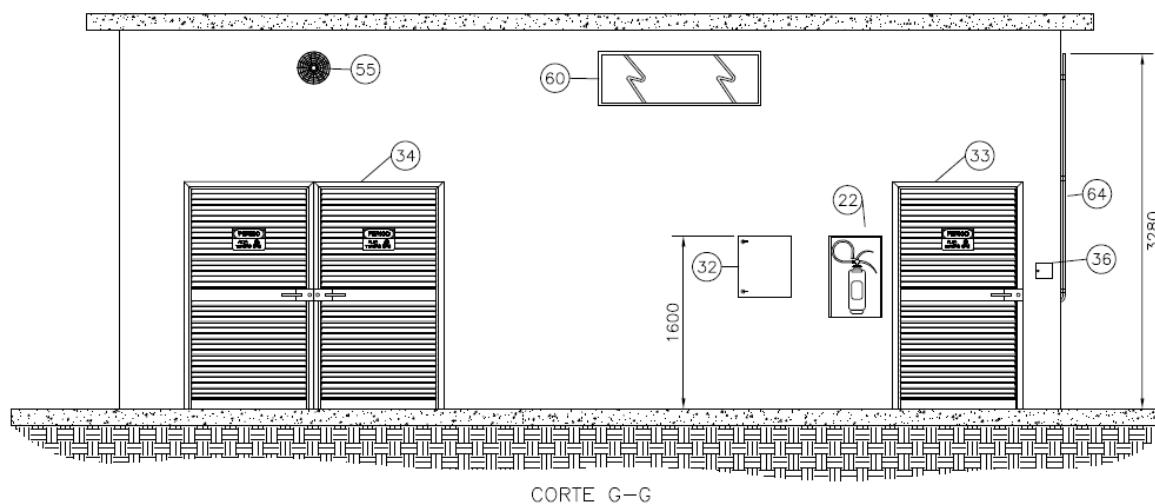


Figura 21: Corte G-G.

No corte F-F, Figura 21, temos os seguintes componentes da subestação, (22) Extintor tipo CO₂, capacidade mínima 6kg (33) Porta tipo veneziana, 2100x1200mm, (34) Porta tipo veneziana, 2100x1200mm (duas folhas), (36) Caixa para chaves da subestação de uso exclusivo da concessionária, selada,

(55) Exaustor para ventilação, (60) Janela de iluminação natural, (64) Eletroduto galvanizado 20mm para circuito de antena.

4.2 PROJETO ELÉTRICO: DIAGRAMA UNIFILAR

Com o objetivo de simplificar e generalizar o entendimento dos projetos elétricos fotovoltaicos, símbolos gráficos são utilizados para representar os diversos componentes destes sistemas. Toda planta elétrica deve conter: margem, conforme norma; etiqueta com todas as identificações do proprietário e informações básicas; legenda com a simbologia e especificação técnica; esquema unifilar ou multifilar, quando aplicável; detalhes de montagem, quando necessário; e especificação dos componentes elétricos.

A Figura 22 apresenta o digrama unifilar da instalação elétrica trifásica (3F) com tensão fase-fase (ou de linha) de 380 V eficaz.

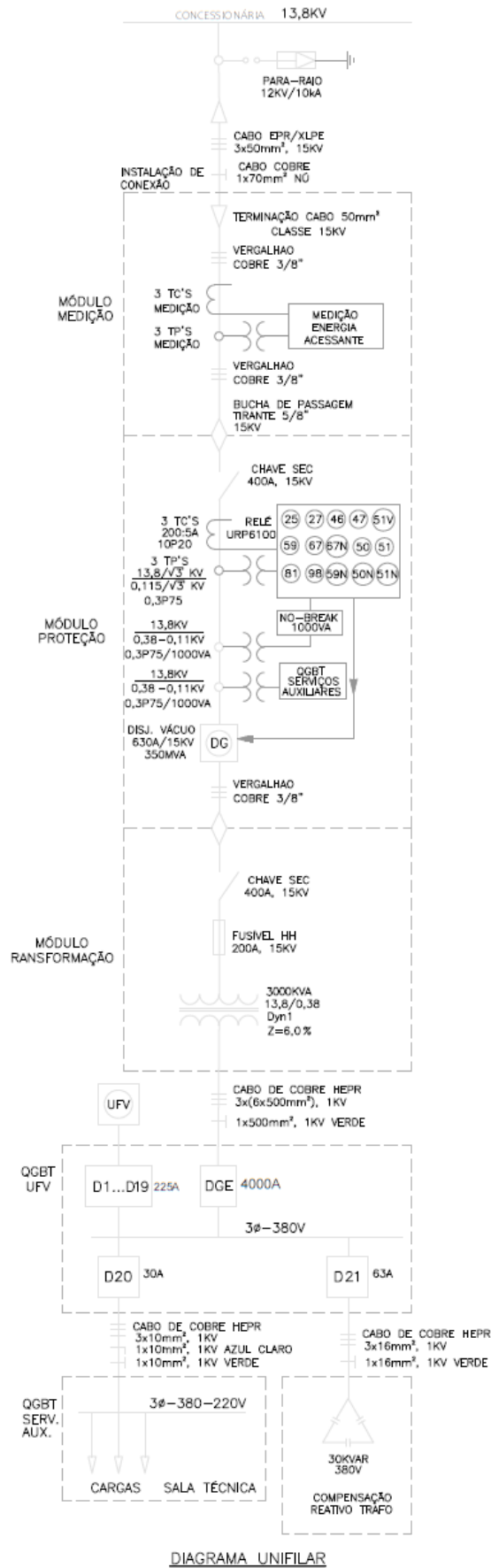


Figura 22: Diagrama unifilar da UC após a instalação da usina solar fotovoltaica.

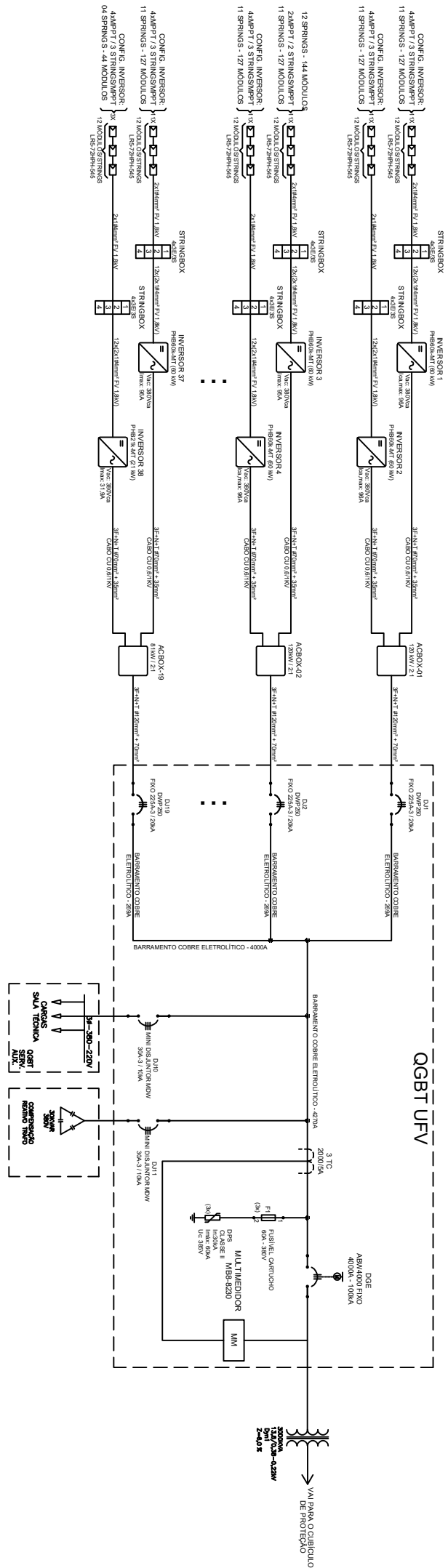
4.3 PROJETO ELÉTRICO: DIAGRAMA MULTIFILAR

O Anexo 01 apresenta o diagrama multifilar da UC, com enfoque nas ligações elétricas entre os componentes da usina solar fotovoltaica. Este diagrama traduz fielmente as conexões efetuadas no ato da instalação física do sistema.

5- Referências Bibliográficas

- [1] CEMIG. ND 5.3. Fornecimento de Energia Eletrica em Média Tensão, Rede de Distribuição Aérea ou Subterrânea. Available: https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/07/nd5_3_000001p.pdf. [Acesso em 01 02 2022].
- [2] CEMIG. ND 5.31. Requisitos Para Conexão de Acessantes Produtores de Energia Elétrica ao Sistema de Distribuição da Cemig D. Available: <https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/08/ND.5.31.pdf>. [Acesso em 01 02 2022].
- [3] PHB. [Online]. Available: <https://www.energiasolarphb.com.br/produto/modulo-longi-lr5-72hph-545m/>.
- [4] PHB. [Online]. Available: <https://www.energiasolarphb.com.br/produto/inversor-phb21kt-dt/>.
- [5] PHB. [Online]. Available: <https://www.energiasolarphb.com.br/produto/inversor-phb60kt-dt/>.
- [6] ABNT.NBR5410.Instalações Elétrica de Baixa Tensão Available: <https://docente.ifrn.edu.br/jeangaldino/disciplinas/2015.1/instalacoes-eletricas/nbr-5410>. [Acesso em 01 02 2022].
- [7] ABNT.NBR5419.Proteção De Estruturas Contra Descargas Atmosféricas. Available: <https://gsea.com.br/normasabnt/ABNT%205419%20-%20PARA%20RAIOS.pdf>. [Acesso em 01 02 2022].
- [8] CEMIG. [Online]. Available: <https://geo.cemig.com.br/mca/Secure/Authorize?ReturnUrl=%2Fmca>

6- Anexos



Anexo 1 : Diagrama Multifilar.



Coordenadoria de
Educação Aberta e a Distância