

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA - EST
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

ALEX SANDER LEOCÁDIO DIAS

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE CONTROLE AUTOMÁTICO DE TENSÃO
PARA MITIGAR AS PERDAS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
USINAS FOTOVOLTAICAS DE MINIGERAÇÃO CONECTADAS AO SISTEMA
DE DISTRIBUIÇÃO EM MÉDIA TENSÃO**

**Manaus -AM
2023**

ALEX SANDER LEOCÁDIO DIAS

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE CONTROLE AUTOMÁTICO DE TENSÃO
PARA MITIGAR AS PERDAS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
USINAS FOTOVOLTAICAS DE MINIGERAÇÃO CONECTADAS AO SISTEMA
DE DISTRIBUIÇÃO EM MÉDIA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de
graduação em Engenharia Elétrica II
apresentado à Coordenação de Engenharia
Elétrica da EST/UEA, para obtenção do
título acadêmico de bacharel em Engenharia
Elétrica.

**Orientador: Prof. Dr. Israel Gondres
Torné.**

**Manaus -AM
2023**

Universidade do Estado do Amazonas – UEA
Escola Superior de Tecnologia - EST

Reitor:

André Luiz Nunes Zogahib

Vice-Reitor:

Kátia do Nascimento Coureiro

Diretora da Escola Superior de Tecnologia:

Ingrid Sammyne Gadelha Figueiredo

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica:

Jozias Parente de Oliveira

Banca Avaliadora composta por:

Prof. Israel Gondres Torné, Dr. (Orientador)

Prof. Fábio de Sousa Cardoso, Dr.

Prof. Edry Antonio Garcia Cisneros, Dr.

Data da defesa: 28/09/2023.

CIP – Catalogação na Publicação

Dias, Alex Sander Leocádio

Aplicação da técnica de controle automático de tensão para mitigar as perdas de produção de energia elétrica em usinas fotovoltaicas de minigeração conectadas ao sistema de distribuição de média tensão / Alex Sander Leocádio Dias; [orientado por] Israel Gondres Torné, Dr. – Manaus: 2023. 72 p.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade do Estado do Amazonas, 2023.

1. Minigeração. 2. Rede de Distribuição. 3. Regulador de Tensão. I. Torné, Israel Gondres.

ALEX SANDER LEOCÁDIO DIAS

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE CONTROLE AUTOMÁTICO DE TENSÃO PARA MITIGAR AS PERDAS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM USINAS FOTOVOLTAICAS DE MINIGERAÇÃO CONECTADAS AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EM MÉDIA TENSÃO

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Nota obtida: 10 (dez pontos)

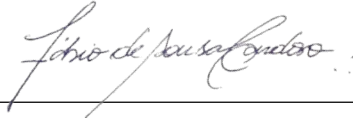
Aprovada em 28/09/2023.

Área de concentração: Energia Renováveis

BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof. Israel Gondres Torné, Dr.



Avaliador: Prof. Fábio de Sousa Cardoso, Dr.



Avaliador: Prof. Edry Antonio Garcia Cisneros, Dr.

Manaus 2023

Dedicatória:

Dedico este trabalho aos meus pais Antônio Dias Ribeiro e Odinéia Leocádio Gama (in memoriam) pelo amor e dedicação.

À minha amada esposa Nathally Jacy C. Coelho Dias pelo amor, carinho e pela paciência por todas as horas subtraídas de nosso casamento durante a elaboração desta obra.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pelo privilégio de viver e ser um homem livre, dotado de valores morais e éticos, os quais adquiri ao longo da vida e dos anos dedicados aos estudos.

Ao professor Dr. Israel Gondres Torné, pela orientação, competência, cobrança à realização dessa monografia.

A coordenação e todo o corpo de Docentes do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas - UEA pela habilidade e capacidade que grandemente contribuíram na minha formação.

Aos meus Pais, em especial a Odinéia Leocádio Gama (*in Memoriam*).

A minha linda esposa Nathally Jacy Costa Coelho Dias por todo o apoio nas etapas da vida e no decorrer da pesquisa.

Aos meus UEAmigos: Sandro, João, Victor por sempre me ajudarem no decorrer do curso.

RESUMO

O Brasil está imerso em um cenário de crescente consumo de energia elétrica, porém com capacidades de investimentos no parque de geração de energia escassas, além de questões de ordem ambientais delicadas que acompanham tais investimentos. Contudo está experimentando uma crescente utilização de geração distribuída - GD, em especial a de natureza solar fotovoltaica, seja pelo consumidor que passou a gerar sua própria energia ou as organizações que passaram adotar este modelo de geração para reduzir o custo de seus processos produtivos atrelado ao uso de energia elétrica, em ambos os casos, beneficiados com os incentivos fiscais e econômicos do governo. Porém toda essa mudança de paradigma na forma de gerar energia elétrica demanda estudos dos impactos que este tipo de geração está suscetível, tendo em vista a precariedade do sistema de distribuição primário rural de algumas distribuidoras de energia elétrica, sejam elas de capital privado, misto ou estatal. Assim neste contexto, este trabalho apresenta um estudo de caso do emprego da técnica de controle automático da tensão – CAT em um alimentador rural, no qual foi instalada uma usina fotovoltaica – UFV para minigeração, operando na modalidade de compensação remota nos termos do sistema de compensação de energia elétrica - SCEE adotado e homologado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, de tal modo a mitigar os efeitos nocivos das violações de tensão crítica ou precária no ponto de conexão do acessante.

Palavras-chave: *Minigeração, Rede de distribuição, Regulador de tensão, Sistemas Fotovoltaicos.*

ABSTRACT

Brazil is immersed in a scenario of increasing consumption of electricity, but with scarce investment capacity in the power generation park, in addition to delicate environmental issues that accompany such investments. However, it is experiencing a growing use of distributed generation - DG, especially that of a photovoltaic solar nature, whether by the consumer who started to generate their own energy or the organizations that started to adopt this generation model to reduce the cost of their production processes linked to the use of electric energy, in both cases, benefiting from the government's fiscal and economic incentives. However, all this paradigm shift in the way of generating electricity requires studies of the impacts that this type of generation is susceptible to, in view of the precariousness of the rural primary distribution system of some electricity distributors, whether they are private, mixed or state capital. Thus, in this context, this work presents a case study of the use of the automatic voltage control technique - CAT in a rural feeder, in which a photovoltaic plant - UFV for mini-generation was installed, operating in the remote compensation mode under the terms of the electricity compensation system - SCEE adopted and approved by the National Electric Energy Agency - ANEEL, in such a way as to mitigate the harmful effects of critical or precarious voltage violations at the connection point of the user.

Keywords: *Minigeneration, Distribution Network, Voltage Regulators, Photovoltaic Systems.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Evolução da Utilização da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil.....	17
Figura 2- Diagrama unifilar genérico de um sistema de distribuição de energia.....	23
Figura 3- Diagrama em bloco de uma rede de distribuição de média tensão.....	24
Figura 4- Diagrama em bloco de trafo de distribuição.....	25
Figura 5- Equivalente em Π para uma rede de distribuição curta.....	26
Figura 6- Diagrama Reduzido da Conexão Delta – Estrela aterrada em GD.....	27
Figura 7- Diagrama de modelo condensado da carga monofásica resistiva.....	29
Figura 8- Diagrama de modelo condensado da carga monofásica indutiva.....	29
Figura 9- Diagrama Elétrico de um SE de Barra Simples.....	32
Figura 10- Diagrama Elétrico de um SE Barra Principal e Transferência.....	32
Figura 11- Esquema Elétrico Genérico de Linha de Distribuição.....	33
Figura 12- Banco de capacitores em SE.....	34
Figura 13- Regulador <i>autobooster</i> como elevador.....	35
Figura 14- Regulador <i>autobooster</i> como abaixador.....	35
Figura 15- Esquemático do Regulador de Tensão Autotransformador de 32 Degraus.....	36
Figura 16- Fluxograma de Controle da Tensão no Regulador.....	37
Figura 17- Diagrama Elétrico de Conexão de Banco Regulador em Configuração Estrela Aterrada.....	38
Figura 18- Diagrama Elétrico do Circuito Compensador de Queda na Linha.....	40
Figura 19- Esquema do Circuito LDC com Banco de Regulador em conexão Estrela Aterrada	40
Figura 20- Mapa de Irradiação Media Global do Brasil.....	42
Figura 21- Circuito Equivalente de Uma Célula Fotovoltaica.....	42
Figura 22- Curva I-V para módulos fotovoltaicos.....	43
Figura 23- Usina Solar Fotovoltaica de Minigeração de 1625,4 kWp - RICAL.....	46
Figura 24- Diagrama Unifilar do BOS da UFV - RICAL.....	49
Figura 25- Relé Pextron URP 6000.....	54
Figura 26- Interface de Parametrização do Relé Pextron URP 6000.....	54

Figura 27- Medição de paramentos elétricos da barra de paralelismo dos inversores	55
Figura 28- Analisador de Energia RM960PQ	56
Figura 29- Curva de Geração da UFV-RICAL	57
Figura 30- Regulador de Tensão -RT Instalado do PIT 34 L1	59
Figura 31- Curva de Geração da UFV RICAL após Instalação do RT	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Reprodução da Tabela 1.1-Pontos de conexão em Tensão Nominal maior a 1kV e inferior a 69 kV	18
Tabela 2 – Corrente de Curto Circuito no Ponto de Conexão	47
Tabela 3 – Impedância de Curto Circuito (PU) no Ponto de Conexão	48
Tabela 4 – Parâmetros do Relé da Concessionária a Montante do Ponto de Conexão.....	48
Tabela 5 – Perfil de tensão do barramento 02 da SE de acoplamento da UFV-RICAL.....	56
Tabela 6 – Injeção de Potencia Ativa no alimentador PIT 34 L1.....	58
Tabela 7 – Classificação do Nível de Carga do Alimentador PIT 34 L1.....	59
Tabela 8 – Corrente de Carga do Alimentador PIT 34 L1	60
Tabela 9 – Parâmetros de Configuração do Relé 90 do Banco Regulador.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT** - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AC** – Corrente Alternada
- ANEEL** - Agência Nacional de Energia Elétrica
- APE** - Auto Produtor de Energia
- AT** – Alta Tensão
- BT** – Baixa Tensão
- CAA** – Cabo de Alumínio de Alma de Aço
- CAT** - Controle Automático de Tensão
- DC** – Corrente direta
- DEC** – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
- DIC** – Duração Individual de Interrupção por Unidade Consumidora
- DMIC** – Duração Média de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
- DNAEE** - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
- DRC** – Duração Relativa de Transgressão de Tensão Crítica
- DRP** – Duração Relativa de Transgressão de Tensão Precária
- EBP** - Esquema Básico de Proteção
- FEC** – Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
- FIC** – Frequência Individual de Interrupção por Unidade Consumidora
- GD** - Geração Distribuída
- GFV** – Gerador Fotovoltaico
- IEEE** - *Institute of Electrical and Electronic Engineers*
- LD** - Linha de Distribuição
- LDC** - *Line Drop Compensator*
- LT**- Linha de Transmissão
- PCH** - Pequenas Centrais Hidroelétricas
- PIE** - Produtor Independente de Energia
- PRODIST** - Procedimento de Distribuição
- PROINFA** - Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica

RN - Resolução Normativa

SCEE - Sistema de Compensação de Energia Elétrica

SDBT - Sistema de Distribuição em Baixa Tensão

SDMT - Sistema de Distribuição de Média Tensão

SEP – Sistema Elétrico de Potência

TP – Transformador de Potencial

TUSD - Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

TUST - Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão

UC - Unidade Consumidora

UFV - Usina Fotovoltaica

UHE - Usina Hidroelétrica

VTCD - Variação de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA.....	18
1.2	DELIMITAÇÃO E EXPECTATIVA DA PESQUISA	19
1.3	OBJETIVOS	19
1.3.1	Objetivo Geral.....	19
1.3.2	Objetivos Específicos.....	20
1.4	METODOLOGIA	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	REGULAÇÃO APLICADA A GD FOTOVOLTAICA NO BRASIL.....	21
2.2	SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIO COM USINAS FOTOVOLTAICAS	22
2.2.1	Rede de Distribuição de Média Tensão	23
2.2.2	Transformador de Distribuição	24
2.2.3	Acoplamento de UFV por Transformador	26
2.2.3.1	Configuração Delta do lado da Concessionária e Estrela Aterrada do Lado da Usina	27
2.2.4	Características das Cargas.....	28
2.3	QUALIDADE DA ENERGIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	29
2.3.1	Indicadores de Qualidade da Energia: Continuidade dos Serviços	30
2.3.2	Indicadores de Qualidade da Energia: Produto	31
2.4	SUBESTAÇÕES DE ENERGIA	31
2.5	COMPENSAÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA - SDMT....	33
2.5.1	Banco de Capacitores.....	34
2.5.2	Regulador de Tensão.....	34
2.5.2.1	Configuração <i>Autobooster</i>	35
2.5.2.2	Configuração autotransformador com 32 degraus	36
2.5.2.3	Relé de Controle de tensão.....	37
2.5.2.4	Banco de Reguladores de Tensão com Conexão Estrela Aterrada.....	37
2.6	CONTROLE AUTOMÁTICO DE TENSÃO - CAT.....	38
2.6.1	Tempo Definido	38
2.6.2	Reta de Carga.....	38
2.6.3	Tensão Definida	39
2.6.4	Compensação por Queda na Linha - LDC	39
2.6.4.1	Ajuste de LDC em Banco de Reguladores de Tensão com Conexão Estrela Aterrada.....	40
2.7	DIMENSIONAMENTO DE GERADOR FOTOVOLTAICO - GFV	41
2.7.1	Célula Fotovoltaica e Módulos fotovoltaicos.....	42
2.7.2	Gerador Fotovoltaico	43

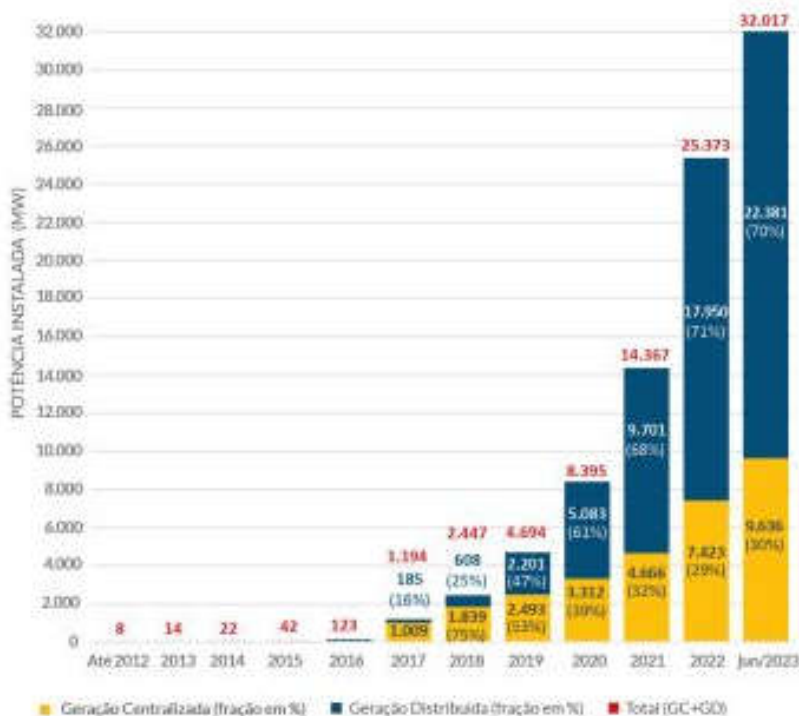
2.7.2.1 A influência da Temperatura Sobre os Arranjos Fotovoltaicos.....	44
3 ESTUDO DE CASO DA IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO PROPOSTA.....	45
3.1 A USINA SOLAR FOTOVOLTAICA DE MINIGERAÇÃO	45
3.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MEDIA TENSÃO ACESSADO PELA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA DE MINIGERAÇÃO.....	46
3.2.1 Parâmetros de Curto Circuito no Ponto de Conexão.....	47
3.2.2 Parâmetros do Equipamento de Proteção a Montante da UFV	48
3.3 ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE DA UFV-RICAL	48
3.3.1 Corrente Nominal dos Transformadores da Subestação de Acoplamento da UFV.....	49
3.3.1.1 Corrente Nominal dos Transformadores da UFV- RICAL	50
3.3.1.2 Corrente Magnetização dos Transformadores da UFV- RICAL.....	50
3.3.1.3 Ponto ANSI dos Transformadores da UFV- RICAL	51
3.3.1.4 Corrente Demandada Pela UFV- RICAL.....	51
3.3.2 Ajuste no Relé da UFV- Rical	52
3.3.2.1 Ajuste de Proteção de Sobrecorrente - ANSI 50/51	52
3.3.2.2 Ajuste de Proteção Direcional de Corrente - ANSI 67.....	53
3.3.3 Parametrização do Relé Microprocessado PEXTRON URP 6000	53
3.3.3.1 Interface de Parametrização do Relé Pextron URP 6000	54
3.4 MEDIÇÃO AMOSTRAL NA BARRA DE GERAÇÃO DA UFV-RICAL	55
3.5 DIMENSIONAMENTO DO BANCO REGULADOR.....	57
3.5.1 Determinação do kVA do Banco Regulador.....	58
3.6 CONFIGURAÇÃO E OPERAÇÃO DO BANCO REGULADOR	59
3.7 CORREÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO	60
3.7.1 Determinação da Tensão no Ponto de Conexão da UFV pelo Relé 90	62
3.7.1.1 Memorial de Cálculo da Tensão no Ponto de Conexão.....	62
3.8 RESULTADOS OBSERVADOS	64
4 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXOS.....	69
ANEXO – I.....	69
ANEXO II	70
ANEXO III.....	71
ANEXO – IV.....	72

1 INTRODUÇÃO

No Brasil a eletricidade começou a ser empregada no ano de 1883, tendo como marco inicial a entrada em operação da usina hidroelétrica – UHE de Ribeirão do Inferno, cuja produção era destinada a uma mineradora e era interligada a esta por uma linha de transmissão - LT com dois quilômetros de extensão, portanto a maior existente na época. Porém com o decreto 41019 de fevereiro de 1957 do Código de Águas, regulamentava os serviços de energia elétrica, posteriormente em 1978, através do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE foi promulgada a portaria nº 047 que versava sobre os níveis de tensão de fornecimento, estabelecendo limites de variações do valor nominal de tensão. Entretanto, somente com a criação da ANEEL em 1996 houve de fato um avanço na fiscalização do setor de energia. Esta última editou os pilares da qualidade da energia elétrica no país, merecendo o devido destaque as Resoluções Normativas - RN 024, a qual estabelecia os critérios da qualidade de energia fornecida sob o ponto de vista da continuidade e a RN 505 que estabelecia os critérios para a qualidade da energia fornecida sob a ótica de produto. Ainda se mantendo mesma linha de evolução em 2009 através da Resolução Normativa 395 que criou o PRODIST (Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), revogando as RN 024 e 505, porém não os seus efeitos, inclusive fazem parte de seus módulos, em especial o módulo 8 – Qualidade da Energia do PRODIST.

Com a publicação da RN 482 em 2012 e posteriormente aperfeiçoada pela RN 687 em 2015, ocorreu um salto de utilização de microgeração e minigeração solar fotovoltaica, outro fator propulsor da GD no Brasil é o forte apelo mundial pela utilização de energia de natureza renovável, algo muito bem-visto em acordos firmados pelo Brasil em âmbito internacional. Todo esse cenário se traduz em um percentual de 92,7% de toda a geração distribuída em 2022 ser de natureza fotovoltaica e conforme a Figura 1, mais de 32 GW instalados e operando, sendo aproximadamente 9,6 de geração centralizada (ABSOLAR, 2023).

Figura 1- Evolução da Utilização da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil



Fonte: ABSOLAR, 2023 (adaptada).

A evolução do modo de gerar energia elétrica sofreu severas mudanças, tanto que a ANEEL editou mediante RN 956 de 2021 o PRODIST, incorporando ao seu teor as resoluções anteriores, revogando-as e alinhando a legislação vigente com a RN 1000 do mesmo ano a qual atualiza as regras de prestação de serviços de fornecimento e distribuição de energia elétrica. Todavia o foco deste trabalho reside na qualidade de produto, em especial ao nível de tensão de fornecimento no ponto de entrega do acessante, para tanto ainda são válidas as regras previstas na RN 505 e englobadas no PRODIST tanto para tensão de conexão, quanto para a tensão de fornecimento, assim a tabela 1 demonstra os limites impostos no PRODIST, expresso em p.u. para consumidores atendidos em tensão superior a 1kV e inferior a 69 kV, compreendendo portanto o nível de tensão de conexão da subestação de acoplamento do UFV do acessante alvo deste trabalho.

Tabela 1 - Reprodução da Tabela 1.1-Pontos de conexão em Tensão Nominal maior a 1kV e inferior a 69 kV

Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL \leq 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: PRODIST módulo 8: Qualidade da energia elétrica.

A ceulema da criticidade de todo o sistema elétrico, seja de distribuidora pública ou privada, caso particular da Energisa Rondônia citado neste trabalho, é o subsistema de distribuição, pois nesta parte do sistema que ocorrem as maiores dificuldades em atender aos indicadores que o poder concedente estipula, uma vez que é neste último que se manifestam o maiores volumes de perdas técnicas ou não técnicas, de desligamentos, quer de origem programada ou não programada, violação dos níveis de tensão, seja precário ou crítico, frequência e outras perturbações de menores impactos, algumas ainda nem mesmo tendo regulação específica, caso das variações de curta duração – VTCD (PROCEDIMENTO DE DISTRIBUIÇÃO PRODIST, ANEEL 2021).

A abordagem do trabalho aqui exposto é a utilização da técnica do controle automático de tensão (CAT) em alimentador rural, com uso de banco de reguladores, sensibilizados por relés, alocados em proximidade do ponto de conexão das usinas fotovoltaicas de minigeração, com o intuito de melhorar ou manter o perfil de tensão dentro dos limites impostos pela ANEEL, conforme preconiza o PRODIST, além de sensível, mas não menos importante melhora da produtividade das UFVs para fins de compensação remota do consumo de energia elétrica.

1.1 JUSTIFICATIVA

É fato que as variações do valor nominal de tensão em regime permanente nas barras de subestações e ao longo das linhas de transmissão - LT's e linhas de distribuição - LD's está muito relacionado com o fluxo de potência reativa que circula no sistema elétrico, o qual diminui as capacidades das linhas e onera severamente as operações, tornado-as perigosas para estabilidade do sistema elétrico, além de elevar as perdas por efeito Joule (KUNDUR, 1994).

Entretanto, os atuais modelos de previsão de crescimento energético adotados pelos projetistas dos setores de planejamento e expansão do sistema de distribuição de energia, sempre se posicionam em uma linha tênue entre os limites expostos para as variações de tensão preconizadas pela ANEEL e o volume de investimento necessário na malha elétrica. Logo é imposta às concessionárias de energia uma busca pelo método de controle de tensão mais robusto e técnico economicamente viável para suas malhas elétricas (PINTO, 1985).

Com esse contexto é possível se afirmar que o presente trabalho se justifica, pois versa sobre uma solução técnica, relativamente barata e bastante eficaz, quando aplicada em sistemas elétricos de distribuição primária com grandes extensões e com cargas distribuídas irregularmente ao longo do alimentador de média tensão, caso do alimentador no qual a UFV alvo deste estudo foi conectada, pois contribui com informações relevantes para melhoria do perfil de tensão em alimentadores de distribuição rural, além da redução ou adiamento de investimento em estruturas e recondutoramento da rede, que em última instancia otimiza os recursos do sistema elétrico de potência praticado pela concessionária.

1.2 DELIMITAÇÃO E EXPECTATIVA DA PESQUISA

O trabalho está limitado a uma abordagem sobre utilização do controle automático de tensão - CAT em sistemas de distribuição primária, em especial a alimentadores rurais, através de banco de reguladores para corrigir a queda de tensão em alimentadores de 34,5 kV e mitigar as perdas de produção por saídas intempestivas dos inversores de uma UFVs de minigeração distribuída de 1,602 MWp.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Aplicar a técnica de controle automático de tensão com uso de banco de reguladores, em configuração de compensação de queda na linha – LDC, sensibilizados por relés digitais, para acoplamento constante da usina fotovoltaica de minigeração distribuída, mitigando as perdas de produção por saídas intempestivas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Conhecer as técnicas de utilização de banco regulador aplicados em alimentadores de distribuição em tensão primária para melhoria do perfil do nível de tensão;
- b) Disseminar a utilização de técnicas automáticas de correção da tensão em redes de distribuição primária em tensão de 34,5 kV, por meio de reguladores de tensão controlados e acionados por relés digitais, visando melhor utilização do potencial de geração das usinas fotovoltaicas de minigeração plugadas em alimentadores rurais;
- c) Melhorar a produtividade de usinas fotovoltaicas conectadas em alimentadores de distribuição primária com quedas de tensão acentuada, afastando a necessidade de grandes investimentos e obras, portanto, prolongando a vida útil das redes de distribuição de energia elétrica;

1.4 METODOLOGIA

Em conformidade com FURASTÉ (2012), a pesquisa neste trabalho se limita a ser descritiva, não cabendo qualquer tipo de intervenção do autor. Para uma melhor organização estrutural o presente trabalho está dividido em quatro fases:

- a) A primeira fase fica compreendida pela pesquisa bibliográfica para a coleta de dados sobre assuntos correlatos ao tema, cujas bases são oriundas de trabalhos e citações coletadas em livros técnicos que tratam do sistema elétrico, consulta em acervos da concessionária Energisa Rondônia, publicações correlatas de profissionais das áreas de distribuição de energia em revistas especializadas, bases de dados do IEEE, além de fichamento de normas nacionais (ABNT), internacionais (IEEE) e da concessionária Energisa Rondônia (ENU) que direta ou indiretamente tratam sobre o tema proposto;
- b) A segunda fase pela escolha de uma usina solar fotovoltaica de minigeração que atendesse ao cenário proposto no presente trabalho, ou seja, que precisasse da compensação de tensão (melhoria no perfil de tensão) e afetada por perda de produção na geração de energia para SCEE;
- c) A terceira fase pela medição da curva do perfil de tensão no ponto de conexão da UFV em conformidade com o que preconiza a técnica do PRODIST (RN

956,2021), visando à concepção de um histograma que retratasse a realidade do sistema elétrico e fomentasse de dados a escolha da configuração e dimensionamento do banco de reguladores a ser implementado;

- d) Na quarta fase é descrito o dimensionamento do banco é como foi a implementação, seguindo as técnicas e orientações amplamente aplicadas as configurações e manobras de bancos reguladores de tensão, e novamente é colhido o comportamento do sistema frente a inserção do banco regulador, sendo possível apurar a melhoria do perfil da tensão e o maior tempo de conexão da UFV de minigeração distribuída.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 REGULAÇÃO APLICADA A GD FOTOVOLTAICA NO BRASIL

O novo modelo aplicado ao setor elétrico brasileiro teve suas primeiras diretrizes com promulgação da lei 9.427 de 1996 a qual é criada a ANEEL e deu providencia as regras de entrada, tarifas e estruturas do mercado de energia elétrica, introduziu a competição no segmento de geração e comercialização de energia elétrica, ou seja, abertura ao capital privado nas prestações dos serviços de geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica, garantia do livre acesso aos sistemas de energia elétrica, bem como os mecanismos de regulação do mercado cativo (PIRES, 2000). Foi também neste período que surgiu duas entidades no setor elétrico o autoprodutor de energia - APE e o produtor independente de energia – PIE, com a promulgação do decreto 2003, sendo assegurado o seu irrestrito acesso aos sistemas de transmissão e distribuição. Mesmo com todo o incentivo dado pela força de lei ainda foi pouco atrativo a entrada de capital privado no setor de energia elétrica nacional, tanto que o governo gerou o Programa de Incentivos as Fontes Alternativas de Energia Elétrica- PROINFA, sendo assim alavancada a participação dos PIE's com produção por biomassa, pequenas centrais hidroelétricas – PCH, parques eólicos e solares.

A ANEEL lançou em 2012 a RN 482, dando segurança jurídica para acesso as gerações distribuídas e definindo as regras para o sistema de compensação de energia elétrica, posteriormente foi aperfeiçoada pela RN 687 de 2015, definindo os limites de microgeração distribuída e minigeração distribuída, a qual será amplamente aplicada neste trabalho, além de

estender os prazos de validade dos créditos de geração do SCEE por 60 meses (ANEEL, 2012 e 2015).

Simultaneamente a ANEEL publicou a RN 481 o qual versava sobre um incentivo de 80% na tarifa de uso do sistema de transmissão - TUST e sobre a tarifa de uso do sistema de distribuição - TUSD, limitados a potência instalada de até 30 MWp, desde que entrando em operação até dezembro de 2017, sendo o teor desde desconto válido por 10 anos, ao final deste ocorreria redução para 50% o mesmo aplicado aos empreendimentos conectados após dezembro de 2017.

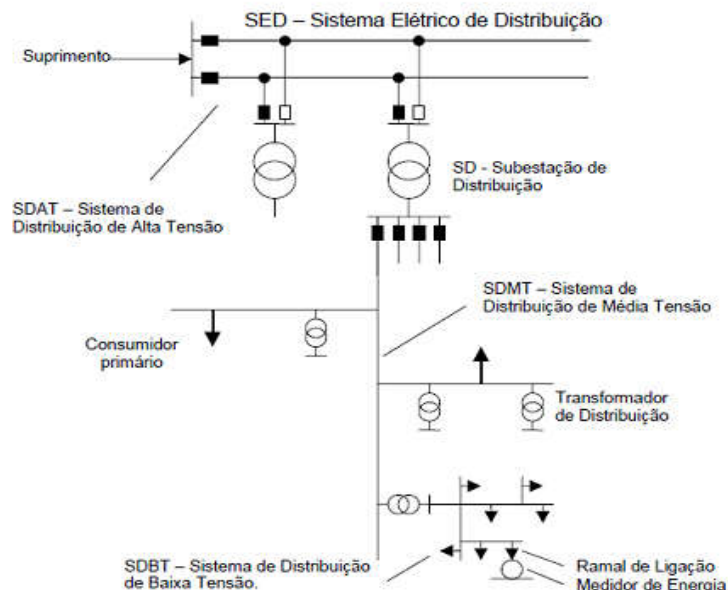
O PRODIST é dividido em 08 módulos, sendo o módulo 02 e o 08 os que serão usados como instrumentos norteadores neste trabalho, por tratarem de regulação específica quanto aos parâmetros de tensão no regime permanente, algo que deve ser pensado e concebido desde o projeto de expansão de sistemas elétricos de distribuição de energia (PRODIST 02, 2021), como observado do ponto de vista da qualidade da energia (PRODIST 08, 2021).

2.2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIO COM USINAS FOTOVOLTAICAS

O modelo de distribuição trifásica em perímetros urbanos é adotado a nível mundial e fortemente presente nas cidades brasileiras, sendo a justificativa do seu emprego a utilização de estruturas mais baratas e condutores mais leves, além de propiciar o atendimento de uma gama expressivamente maior de unidades consumidoras que o modelo monofásico, este tipicamente empregado em áreas rurais das cidades (GUSSOW, 1985). Já CREDER (1991) defende que a distribuição trifásica é a parte do sistema elétrico de potência, portanto um subsistema, empregado dentro dos centros de consumo e utilização, a exemplo de loteamentos urbanos, bairros e indústrias.

A Figura 2 ilustra um diagrama genérico de subsistema de distribuição, o qual pode ser dividido em sistema de distribuição primários de média tensão – SDMT, no qual os níveis de tensão de distribuição são normalmente maiores que 1kV e sistemas de distribuição secundários de baixa tensão – SDBT, onde os níveis de tensão de distribuição são inferiores a 1kV (ABNT-NBR 5410). Em Pimenteiras do Oeste, cidade onde a UFV alvo do estudo está instalada, a concessionária por questões técnicas adota a tensão de 34,5 kV na distribuição primária rural, já na distribuição secundária é empregada a tensão de 220V entre fases do subsistema e 127V quando as instalações estão entre fase e neutro, desde que em área urbana e 380 V entre fases e 220V fase e neutro para zona rural.

Figura 2- Diagrama unifilar genérico de um sistema de distribuição de energia.



Fonte: Adaptada de ROBBA et.al., 2000.

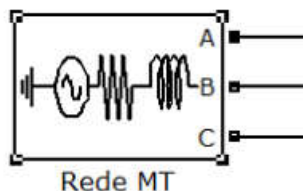
Do ponto de vista da GD, os sistemas de distribuição primária adotados pela maioria das concessionárias não foram planejados para receber fluxo reverso, ou seja, seu funcionamento é fundamentalmente radial, partindo das subestações e chegando as unidades consumidoras – UC por meio de linhas de distribuição primárias – LD, comumente chamados alimentadores primários. Com a entrada de usinas solares fotovoltaicas, tanto de minigeração como de microgeração, em operação, o fluxo de potência antes unidirecional, experimenta agora a bidirecionalidade, demandando cuidados da equipe de planejamento de redes, em especial ao atendimento do perfil de tensão a longo do alimentador primário, suscetível a maior ou menor afundamento de tensão frente a consumo de energia pelas diversas cargas instaladas ao longo do mesmo.

2.2.1 Rede de Distribuição de Média Tensão

A partir das barras das subestações se inicia as redes de distribuição primárias, denominadas alimentadores primários, pelas quais é escoada toda a energia para as unidades consumidoras finais, normalmente configurados em sistema delta isolado, sustentados em estruturas mecânicas do tipo N ou M, quando compostas por redes elétricas de cabos nus ou

sustentadas em estruturas do tipo CE, quando compostas por cabos isolados ou protegidos-*spacer cable* (NDEE01 – Eletrobrás Distribuidora de Energia SA). A Figura 3 apresenta um diagrama em bloco com parâmetros concentrados de uma rede de média tensão, onde está agregado em um único bloco o gerador trifásico, as resistências (R) e reatâncias (XI) características.

Figura 3- Diagrama em bloco de uma rede de distribuição de média tensão.



Fonte: Adaptada de Matlab/Simulink.

A equação (1) determina o valor de impedância (Z) da rede, a qual depende da tensão do sistema e da potência de curto circuito da rede.

$$Z_{rede} = \frac{Vn^2 \times a}{P_{cc}} \quad A$$

equação (1)

Onde:

Z_{rede} = Impedancia da rede de média tensão;

Vn^2 = Tensão nominal da rede;

P_{cc} = Potencia de curto circuito;

a = fator de correção que normalmente assume o valor 1,1;

2.2.2 Transformador de Distribuição

O transformador é uma máquina elétrica que utiliza os fenômenos eletromagnéticos para seu funcionamento, geralmente empregado para o transporte de energia a longas distâncias com baixa perda. Normalmente é constituído por dois núcleos magnéticos e estes formados por chapas metálicas isoladas uma das outras, sendo comum serem envoltas por enrolamentos denominados primário e secundário, de tal sorte que ao se aplicar uma tensão

alternada nos terminais do primário, ocorre uma circulação de corrente que magnetiza os núcleos gerando no entreferro fluxo magnético alternado, o qual por fim é convertido em tensão alternada no secundário. A equação (2) e equação (3) expressam as principais relações de entre tensão, corrente e números de espiras que compõem o modelo ideal de transformador (MAMEDE FILHO, 2005).

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{A equação (12)}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{A equação (13)}$$

Sendo:

V1=Tensão no enrolamento primário;

V2= Tensão no enrolamento secundário;

N1= Quantidade de espiras de primário;

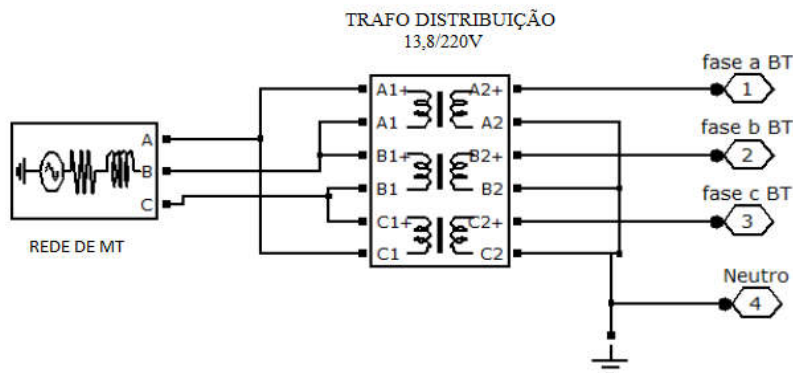
N2= Quantidade de espiras de secundário;

I1=Corrente de primário;

I2=Corrente de secundário.

Do ponto de vista construtivo os transformadores trifásicos possuem enrolamento isolado de maneira uniforme, os quais são imersos em óleo mineral e hermeticamente fechados, tendo como vantagem um menor custo se comparado a mesma potência nominal com um a seco, além de apresentar um ruído menor. A Figura 4 apresenta um diagrama com parâmetros concentrados de um transformador de distribuição.

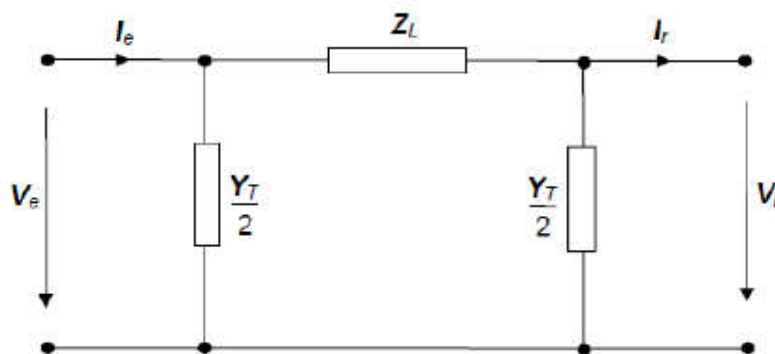
Figura 4- Diagrama em bloco de trafo de distribuição.



Fonte: Adaptada de Matlab/Simulink.

A representação da mesma rede em parâmetros concentrados se faz pelo modelo equivalente em Π , conforme a Figura 5, onde a impedância longitudinal (Z_L) é composta pela resistência e reatância do cabo (equação (4)), já a admitância transversal Y_T considera a sua capacitância (equação (5)). Para o estudo foi desconsiderado o efeito Kelvin na resistência, tendo em vista que não há redes com cabos de bitola acima de 500mm^2 , onde tais efeitos são mais notórios e quase em sua totalidade as redes são compostas por cabos de alumínio.

Figura 5- Equivalente em Π para uma rede de distribuição curta.



Fonte: Adaptada de A.S.L.Dias, 2016.

$$Z_{\text{rede}} = R + j\omega L \quad \text{A equação (14)}$$

Sendo:

Z_{rede} =Resistência do cabo;

$j\omega L$ = Reatância indutiva do cabo;

$$Y_T = j\omega C \quad \text{A equação (15)}$$

Sendo:

Y_T =Admitância transversal;

$j\omega C$ = Reatância capacitiva do cabo;

2.2.3 Acoplamento de UFV por Transformador

A conexão de acoplamento de usinas fotovoltaicas em sistemas de média tensão se faz por meio de transformadores de elevação, os quais fazem o acoplamento do nível de tensão de baixa, geralmente menor que 1 kV, faixa de operação da maioria dos inversores comerciais, com o nível de tensão das redes de distribuição primária, na faixa de tensão superior a 1kV e menor que 69 kV. Existe ainda a possibilidade de conexão em Alta tensão, nível maior que 69 kV, porém não será abordado neste trabalho.

Quanto a configuração de conexão dos transformadores empregados em GD as mais comuns são:

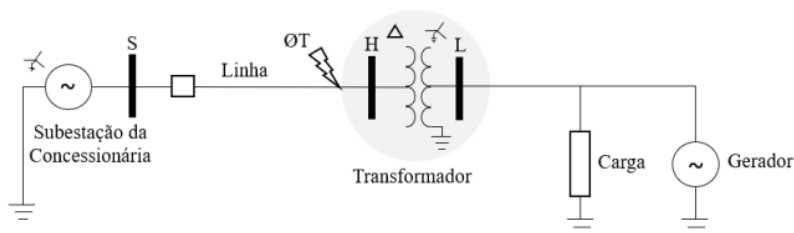
- a) Delta do lado da concessionária e estrela aterrada do lado da usina;
- b) Estrela aterrada, tanto do lado da concessionária como da usina;
- c) Estrela aterrada do lado da concessionária e delta do lado da usina;

Não existindo qualquer apontamento para melhor conexão, pois todas demandam esquemas básicos de proteção - EBP que apresentam maiores ou menores vantagens se comparados entre si. Contudo, neste trabalho, será explanado com maiores detalhes a configuração delta do lado da concessionária e estrela aterrada do lado da usina, a qual foi implementado no projeto do estudo de caso sobre o qual é fundamentado este estudo.

2.2.3.1 Configuração Delta do lado da Concessionária e Estrela Aterrada do Lado da Usina

A configuração em delta para redes de distribuição primária tem a vantagem de não necessitar de um neutro, portanto, representa um economia em projetos de redes longas em especial os alimentadores rurais. Para os EBP a ausência de aterramento do lado delta se configura como um circuito aberto para correntes de sequencia zero e desequilíbrios. Na presença de uma falta do lato delta a subestação da concessionária será a fonte de sequencia zero, para tal normalmente se emprega um transformador de aterramento conectado na barra de saída dos alimentadores para fornecer a referencia de corrente e sensibilizar a proteção da concessionária. A figura 6 demonstra o esquema básico.

Figura 6- Diagrama Reduzido da Conexão Delta – Estrela aterrada em GD.



Fonte: CAMINHA,1977 (adaptada).

A principal desvantagem deste tipo de conexão são as sobretensões durante as faltas e a impossibilidade da proteção de retaguarda por sinal de tensão.

2.2.4 Características das Cargas

As cargas elétricas podem ser caracterizadas pela potência ativa ou reativa que consomem quando submetidas na tensão de operação, para FERNANDES (2010) existe quatro grupos de cargas: Motores, iluminação, aquecimento ou refrigeração e aparelhos eletrônicos e normalmente uma unidade consumidora pode ter todas, porém sempre ocorre o prevaecimento de uma delas ao longo da curva de carga diária, mensal ou anual. Considerando o parâmetro corrente constante a potência absorvida da rede é dada pela (equação (6)), admitindo-se que a corrente em situação nominal é dada pela (equação (7)), portanto a carga solicita de maneira linear potência ativa e reativa do sistema conforme demonstra a (equação (8)).

$$S_{carga} = P_{carga} + jQ_{carga} = V_{carga} \times I_{carga}^* \quad \text{A equação (16)}$$

Sendo:

S_{carga} =Potência aparente da carga;

P_{carga} =Potência ativa da carga;

jQ_{carga} =Potência reativa da carga;

V_{carga} =Tensão nominal na carga;

I_{carga}^* =Corrente complexa na carga;

$$I_{carga}^* = I_{carga} \times e^{j\varphi_{carga}} \quad \text{A equação (17)}$$

$$P_{carga} = V_{carga} \times I_{carga} \times \cos \varphi_{carga}$$

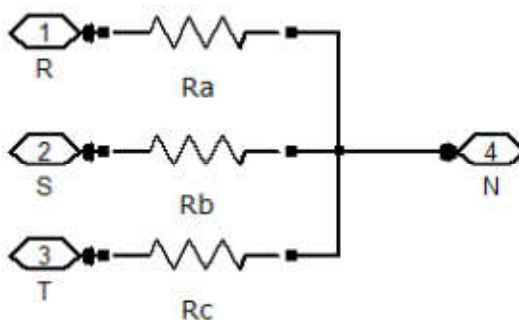
A equação (18)

$$Q_{carga} = V_{carga} \times I_{carga} \times \sin \varphi_{carga}$$

Embora o comportamento das cargas no subsistema de distribuição seja dinâmico, é possível traçar um perfil de consumo e consequentemente classificar em indústria, comércio, serviços e residencial.

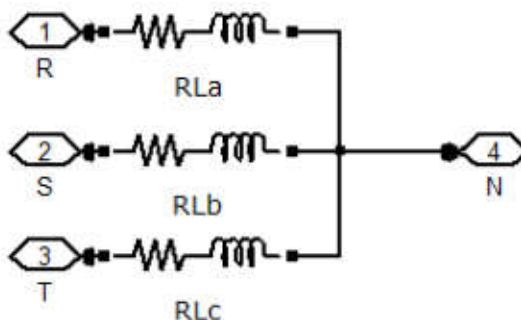
O modelo de parâmetros concentrados adotado neste trabalho para cargas monofásicas de natureza resistiva é demonstrado na Figura 7, já para cargas monofásicas de natureza indutiva o modelo fica demonstrado na Figura 8.

Figura 7- Diagrama de modelo condensado da carga monofásica resistiva



Fonte: Adaptada de Matlab/Simulink.

Figura 8- Diagrama de modelo condensado da carga monofásica indutiva.



Fonte: Adaptada de Matlab/Simulink.

2.3 QUALIDADE DA ENERGIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

A qualidade da energia distribuída é observada de maneira permanente em todas as etapas do sistema elétrico de potência - SEP e nos pontos de entrega, por amostragens de unidades consumidoras no universo total de consumidores dentro da área de concessão de cada concessionária. A tratativa da qualidade é observada pela ANEEL por meio de indicadores de qualidade de serviço, os quais estão ligados com a existência ou não de tensão

adequada no ponto de entrega, indicadores de produto, estes definidos pelos níveis de tensão e deformidade do sinal e indicadores de restaurabilidade, o qual verifica o desempenho da capacidade que a concessionária tem em restabelecer o sistema frente a um evento programado ou não.

2.3.1 Indicadores de Qualidade da Energia: Continuidade dos Serviços

No setor de planejamento das concessionárias são observados os indicadores de qualidade coletivos e individuais, sendo os coletivos repassados aos órgãos reguladores para medir o desempenho da concessionária, já os individuais são utilizados na gestão de investimento pelas empresas.

O indicador de duração equivalente de interrupção por unidade consumidora - DEC é o índice que observa o quanto tempo que em média cada consumidor ficou sem energia, devendo ser informado independente da natureza da falha que o causou (PRODIST ANEEL,2021). O DEC é obtido pela equação (9).

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i) \times T(i)}{Cs} \quad \text{A equação (19)}$$

Onde:

i = número de interrupções, de 1 a n ;

$T(i)$ = tempo de duração de cada interrupção;

$Ca(i)$ = número de consumidores do conjunto considerado, atingidos nas interrupções;

Cs = número total de consumidores do conjunto considerado.

O indicador de frequência de interrupção por unidade consumidora - FEC é o índice que observa a quantidade de interrupções que em média cada cliente do conjunto elétrico sofreu. A equação (10) exprime o seu valor.

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i)}{Cs} \quad \text{A equação (110)}$$

Onde:

$Ca(i)$ = número de consumidores do conjunto considerado, atingidos na interrupções;

C_s = número total de consumidores do conjunto considerado.

Existem ainda os indicadores individuais como: DIC, FIC e DMIC, todos observando a continuidade do serviço em cada unidade consumidora do sistema.

2.3.2 Indicadores de Qualidade da Energia: Produto

O PRODIST – módulo 08 (2021) aborda a energia elétrica como produto (conformidade do nível de tensão), o qual para observar o cumprimento dos limites de conformidade na tensão entregue aos consumidores observa o atendimento de dois indicadores individuais de níveis de tensão: Duração Relativa de Transgressão de Tensão Precária - DRP, cujo cálculo é dado pela equação (11) e o indicador de Duração Relativa de Transgressão de Tensão Crítica - DRC, o qual é definido pela equação (12).

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \times 100[\%] \quad \text{A equação (11)}$$

$$DRC = \frac{nlp}{1008} \times 100[\%] \quad \text{A equação (112)}$$

Onde:

nlp = número de leitura válidas em tensão precária;

nlc = número de leituras válidas em tensão crítica;

1008 = número de leituras válidas.

2.4 SUBESTAÇÕES DE ENERGIA

Para PRAZERES (2008), trata-se de um conjunto de máquinas, aparelhos, equipamentos e circuitos cuja função é adequar os parâmetros de tensão e corrente das linhas em que estão conectadas, a níveis economicamente viáveis e tecnicamente distribuir esta potência aos centros consumidores.

Classificam-se quanto a função em:

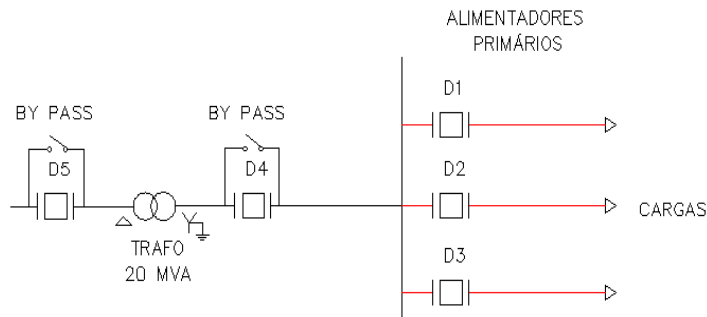
- a) Elevadoras, normalmente localizadas próximas aos centros de geração de energia (usinas hidroelétricas, eólicas ou termelétricas);

- b) Abaixadoras, ficam próximas aos centros consumidores e são empregadas para reduzir as tensões de transmissão para níveis mais baixos sub transmissão, evitando assim os ruídos de radio interferências;
- c) Seccionadoras, aplicadas em manobras em linhas de transmissão;
- d) Conversoras, aplicadas em conversão de energias em regime DC em regime AC;
- e) Distribuição, aplicadas em sistemas de distribuição primário, tensão maior que 2kV, e secundário, valores de 220 a 760V. No caso particular deste trabalho o enfoque será em subestações cujo a tensão primária de distribuição esteja na faixa de 34,5 kV.

Já quanto ao tipo de barramento são classificadas como:

- a) Barra continua simples: possuem somente um barramento de alta tensão (AT) ou de baixa tensão (BT) conforme demonstra a Figura 9, geralmente utilizadas em sistemas de pequeno porte, o qual é alvo deste trabalho.

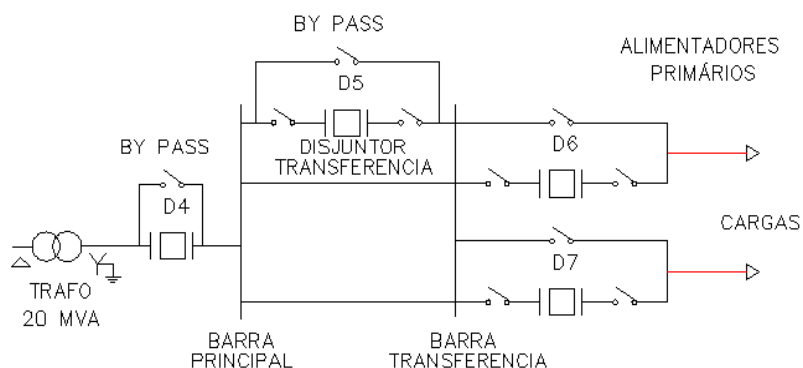
Figura 9- Diagrama Elétrico de um SE de Barra Simples



Fonte: O Autor, 2023

- b) Barra seccionada principal e transferência: possuem duas barras, sendo uma principal para funcionamento normal e outro de transferência para manutenções sob falha parcial. Detalhes na Figura 10.

Figura 10- Diagrama Elétrico de um SE Barra Principal e Transferência



Fonte: autor, 2023 (adaptada).

2.5 COMPENSAÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA - SMT

Para o PRODIST – MOD2, item 2.7.2 “Quando ocorrer a ultrapassagem dos limites de tensão de atendimento das unidades consumidoras, a correção do nível de tensão deverá ser na própria subestação ou nas linhas e redes de distribuição”.

Entretanto, com o crescimento desordenado e não planejado das cidades, quer por meio de invasões (favelas) ou por loteamentos públicos privados, concorrem à obsolescência do sistema de distribuição de energia, gerando violações dos níveis de atendimento em regime permanente preconizados pelo PRODIST – MOD 8, solicitando das equipes de planejamento dos sistemas elétricos das concessionárias ações para correção dos níveis de tensão de atendimento.

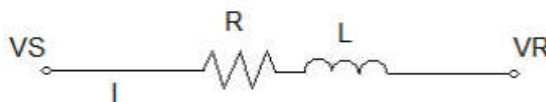
A caracterização dos perfis de cargas horário nos sistemas elétricos de distribuição em quase sua totalidade obedece as seguintes oscilações de demandas energéticas ativas e reativas para seu suprimento adequado:

- a) Carga leve compreendido das 00:00 as 08:00;
- b) Carga médias compreendido 08:00 as 18:00 e de 21:00 as 24:00;
- c) Carga Pesadas 18:00 as 21:00, o horário de ponta na maioria dos sistemas.

A rigor, as técnicas empregadas para compensar nível de tensão em sistemas elétricos de distribuição primária vão desde a regulação de tensão nas barras das subestações, uso de capacitores em configuração *shunt* e série, ajustes dos tapes dos transformadores de distribuição, além da análise da impedância da rede no ponto mais crítico do sistema e o uso

de banco de regulares. A Figura 11 demonstra em parâmetros reduzidos o comportamento de uma linha de distribuição primária.

Figura 11- Esquema Elétrico Genérico de Linha de Distribuição



Fonte: Robba et al. (2000) adaptada.

2.5.1 Banco de Capacitores

Os bancos de capacitores podem ser encarados como uma fonte de energia reativa aos sistemas onde são empregados, normalmente são ligados em derivação em subsistemas de distribuição de energia conforme a figura 12, essencialmente visando:

- a) Liberar mais potência ativa dos geradores;
- b) Corrigir o fator de potência do subsistema de distribuição;
- c) Reduzir perdas técnicas pela redução da reatância e resistências das linhas de distribuição (perdas por efeito Joule);
- d) Melhoria no perfil de tensão nas barras de potência das subestações de energia e a regulação de tensão em todo sistema elétrico;

Comercialmente podem ser encontrados com potências na ordem de 300 a 1200 kVAr e dependendo do nível de investimentos e tecnologias empregadas podem ser encontrados nas instalações das seguintes maneiras: fixo, semiautomáticos e automáticos (MAMEDE FILHO, 2005).

Figura 12- Banco de capacitores em SE



Fonte: Catálogo de produtos ESE indústrias (2016, adaptada).

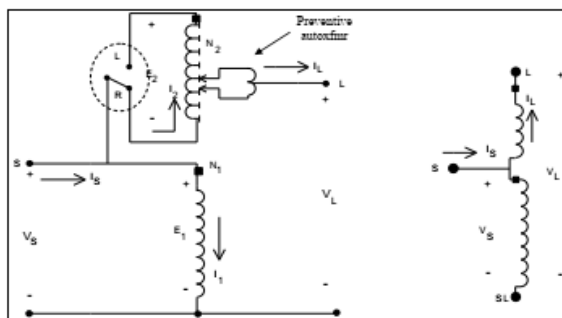
2.5.2 Regulador de Tensão

Os reguladores de tensão empregados em sistema de distribuição de energia elétrica se apresentam na configuração *autobooster* ou autotransformador com 32 degraus de tensão.

2.5.2.1 Configuração *Autobooster*

São reguladores de tensão monofásicos equipados com 04 tapes de 1,55 a 2,5% de correção da tensão de entrada, ou seja, a capacidade de corrigir de 6% a 10% a tensão de entrada. Podem ser utilizados em modo elevador de tensão ou rebaixador, porém nunca operando com os dois modos ao mesmo tempo. A parametrização para elevar a tensão é concebida mudando a posição de uma chave para a indicação “R”, ou seja, modo *raise* (elevação em inglês), conforme a figura 13.

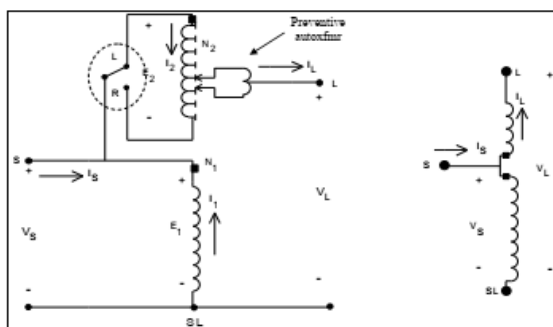
Figura 13- Regulador *autobooster* como elevador



Fonte: Catálogo ITB, 2008 (adaptada).

A configuração da figura 14 é como abaixador de tensão, para tanto a chave deve estar na posição “L”, ou seja, *low* (baixo em inglês).

Figura 14- Regulador *autobooster* como abaixador



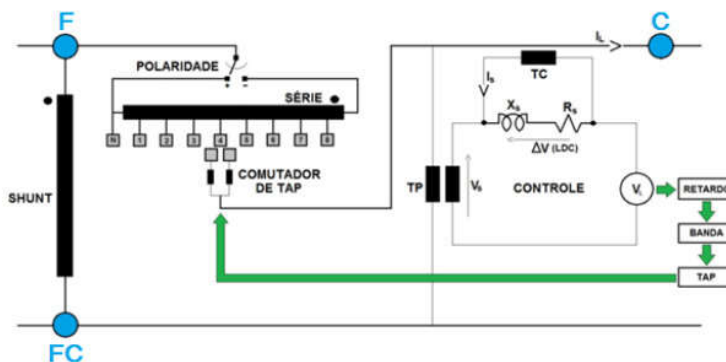
Fonte: Catálogo ITB, 2008 (adaptada).

2.5.2.2 Configuração autotransformador com 32 degraus

Equipamentos trifásicos ou bancos trifásicos, ligados em estrela aterrada, empregados em área com densidade de carga elevada e sua principal aplicação é manter a tensão dentro de valores pré determinados, mesmo com variações de carga na rede de distribuição.

A figura 15 demonstra alegoricamente como são os componentes em um regulador de tensão, sendo possível identificar o tapes de comutação automática, o qual tem 32 degraus, dos quais 16 são utilizados para elevar e os outros 16 para abaixar, portanto, cada tape corresponde a uma variação de 0,65% da tensão e no total até 10%.

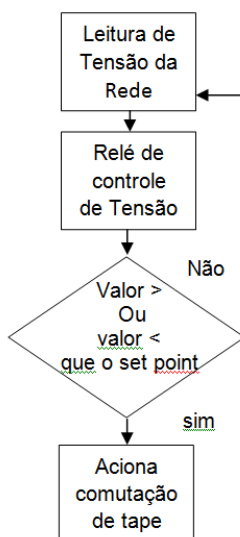
Figura 15- Esquemático do Regulador de Tensão Autotransformador de 32 Degraus



Fonte: DE LIMA, 2014 (adaptada).

O acionamento dos comutadores de tapes é feito por sensibilização de relés de tensão que monitora o nível de tensão no secundário do transformador de potencial – TP, o qual injeta o sinal de tensão para o controle do relé, sendo neste comparado com o valor pré determinado (*set point*) e caso esteja fora da faixa o relé manda o comando de acionamento do comutador de tapes. A figura 16 demonstra o fluxograma de controle dos comutadores de tapes para variações de tensão.

Figura 16- Fluxograma de Controle da Tensão no Regulador



Fonte: autor, 2023.

2.5.2.3 Relé de Controle de tensão

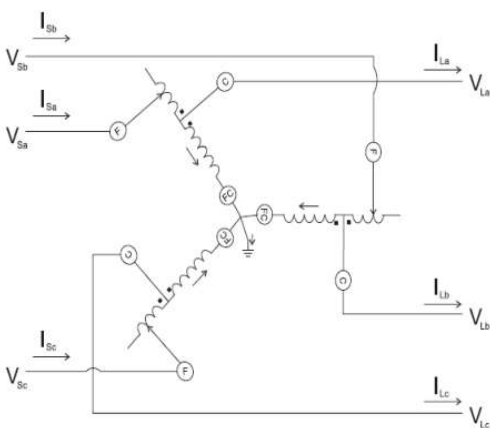
O controle da tensão é realizado tanto nas barras das subestações como os reguladores ao longo do alimentador por meio do relé de controle de tensão ANSI 90, denominado por relé regulador de tensão – AVR (*automatic voltage relay* em inglês). Sua operação se baseia em uma tensão de referencia - V_{ref} e o ajuste da sensibilidade ou banda morta (bandwidth em

inglês), quando ocorre um desvio no valor medido o relé inicia a contagem e se mantido a diferença manda o comando para acionar a mudança de tapes.

2.5.2.4 Banco de Reguladores de Tensão com Conexão Estrela Aterrada

Um bando de reguladores de tensão conectados em estrela se comporta como se cada regulador estivesse independente, sendo a faixa de regulação estimada em 10% tanto para elevar como para abaixar, neste arranjo quando ocorre um desequilíbrio o neutro esco a corrente para o sistema de aterramento (RESENER,2008). A figura 17 demonstra o diagrama elétrico da conexão do banco regulador de tensão.

Figura 17- Diagrama Elétrico de Conexão de Banco Regulador em Configuração Estrela Aterrada



Fonte: BURATTI, 2016.

Na configuração estrela aterrada os controle medi a tensão de fase do lado da carga e os transformadores de corrente a corrente total.

2.6 CONTROLE AUTOMÁTICO DE TENSÃO - CAT

Para atender as variações de tensão frente a solicitação de carga do sistema de distribuição são implementadas basicamente quatro técnicas: Tempo definido, reta de carga, tensão definida e LDC, sendo esta última a implementada neste trabalho.

2.6.1 Tempo Definido

Para usar a técnica de CAT de tempo definido é preciso um estudo do perfil de carga do alimentador, sendo adotado como parâmetros os ciclos de carga leve, moderada, pesada e muito pesada. Dependendo do tipo de carga presente no circuito podem ser utilizado ciclos semanais ou semestrais, caso em que atende a sazonalidade de instalações conectadas ao agronegócio em especial ao período de safra. Com os dados do perfil de carga do alimentador é parametrizado o relé 90 que fará o ajuste automático da tensão por meio do banco regulador.

2.6.2 Reta de Carga

Para usar a técnica de CAT é feito um cálculo para tensão x corrente do alimentador, de tal modo que a tensão de referencia a ser programada no relé 90 terá maior modulo para a corrente de maior carga. Embora se assemelhe ao LDC, mas não leva em consideração os parâmetros de rede, ou seja, a resistência R e a reatância X do alimentador.

A aplicação mais ajustada para esta técnica é em alimentadores que tem perfil de energia reativa muito instável com fator de potência sofrendo grandes amplitudes ao longo do dia. A equação (13) determina a tensão de referência para este tipo de CAT.

$$V_{ref} = \frac{(I_{inst} - I_{min}) \times (V_{max} - V_{min})}{(I_{max} - I_{min})} + V_{min} \quad A$$

equação (13)

Onde:

V_{ref} = Tensão de referencia;

V_{min} = Tensão mínima de Vref;

V_{max} = Tensão máxima de Vref;

I_{min} = Corrente mínima do circuito;

I_{max} = Corrente máxima do circuito;

I_{inst} = Corrente instantânea do circuito;

2.6.3 Tensão Definida

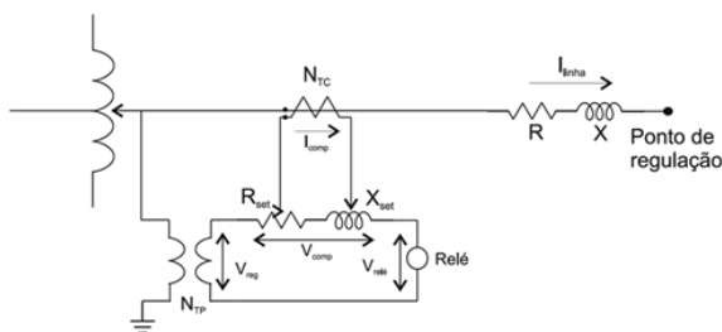
Neste caso o valor de tensão máximo e mínimo, onde a tensão da linha é independente da corrente na carga e do fator de potência, normalmente é aplicada onde é possível a

previsibilidade da carga. Como fator indesejado é que ocorre flutuação na tensão ao longo da curva de carregamento do alimentador, sendo maior no período de carga leve e menor no regime de carga severo.

2.6.4 Compensação por Queda na Linha - LDC

Utiliza um compensado de queda na linha (*Line Drop Compensation –LDC* em inglês), com base nas características de resistência e reatância do alimentador. Para tal ocorre no controle um simulação da impedância partindo do banco regulador ao ponto onde se deseja corrigir a tensão. Como o comportamento das cargas no sistema de distribuição podem ser concentradas ou distribuídas, a resistência (R_{set}) e a reatância (X_{set}) são parametrizado de maneira a garantir o máximo de ganho de tensão durante o período de carga máxima e mantido no período de carga leve. A figura 18 demonstra o esquema elétrico do circuito do compensador de queda de linha.

Figura 18- Diagrama Elétrico do Circuito Compensador de Queda na Linha

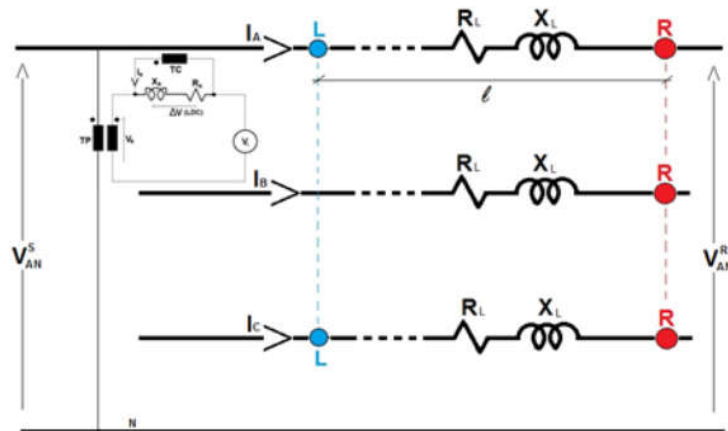


Fonte: BURATTI, 2016.

2.6.4.1 Ajuste de LDC em Banco de Reguladores de Tensão com Conexão Estrela Aterrada

A figura 19 demonstra o esquema elétrico do banco de reguladores utilizando a técnica de CAT por LDC.

Figura 19- Esquema do Circuito LDC com Banco de Regulador em conexão Estrela Aterrada



Fonte: BURATTI, 2016.

Devido a conexão do banco regulador ser estrela aterrada, os reguladores podem ser estudados individualmente, para tanto utilizando o regulador da fase A para desenvolvimento do arcabouço de equações que norteia a estratégia de CAT por LDC para o circuito. Neste sentido para o controle do banco a tensão é prevista com base na equação 14.

$$V_{An}^S - V_{An}^R = \frac{RTP}{RTC} (R_S + jX_S) \times I_A \quad \text{A equação (14)}$$

Onde:

V_{An}^S = Tensão de entrada;

V_{An}^R = Tensão de referência para o banco;

R_S = Resistencia do cabo do alimentador;

jX_S = Reatancia do cabo do alimentador;

I_A = Corrente do alimentador;

Para determinar a regulação a qualquer ponto a jusante do banco regulador é utilizado o critério para distancia em quilômetros, conforme as equações 15 e 16.

$$R_S = \frac{RTC}{RTP} \times L \times r_l \quad \text{A equação (15)}$$

$$X_S = \frac{RTC}{RTP} \times L \times x_l \quad \text{A equação (16)}$$

Onde:

r_l = Resistencia do alimentador em função do comprimento;;

x_l = Reatancia do alimentador em função do comprimento;

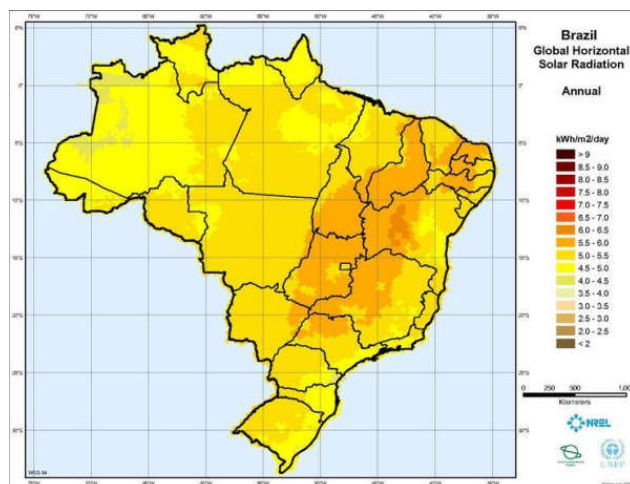
L = Comprimento do alimentador alimentador em km

2.7 DIMENSIONAMENTO DE GERADOR FOTOVOLTAICO - GFV

Entres as energias renováveis presente no Brasil a energia solar de natureza fotovoltaica foi a que experimentou maior crescimento. Nesta modalidade de geração a energia solar incidente é convertida diretamente em eletricidade pelos módulos fotovoltaicos, tendo como vantagem o baixo custo de manutenção e operação, geração de energia silenciosa e com baixo impacto ambiental. O critério adotado para dimensionar um gerador fotovoltaico é normalmente é com base no consumo médio registrado em um período de 01 ano, o qual pode ser aferido em faturas de energia emitidos pelas concessionárias, outro fator a ser considerado é a área disponível para instalação dos módulos, a irradiância (direta e refletida) média no local e a presença de obstáculos que podem sombrear do GFV.

A figura 20 demonstra irradiação média horizontal em diversas áreas do Brasil, ou seja, embora o país seja praticamente localizado em região geográfica favorável, a distribuição e o modo como a irradiação se distribui não é homogênea.

Figura 20- Mapa de Irradiação Media Global do Brasil



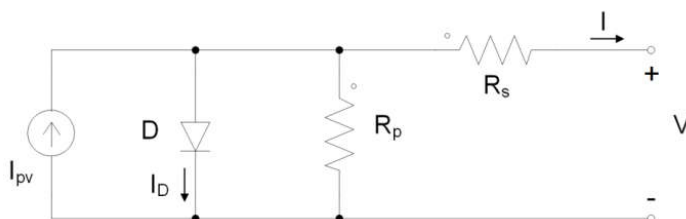
Fonte: SWERA.

2.7.1 Célula Fotovoltaica e Módulos fotovoltaicos

As células fotovoltaicas são responsáveis pela conversão da radiação solar em energia elétrica, valendo-se do efeito fotovoltaico, o qual é descrito como a geração de diferença de potencial ao expor um material semicondutor a luz visível. Na construção dos módulos solares são empregados células de diversos semicondutores, porém prosperam as de cristais de Silício, seja ele policristalino ou monocristalino. A tensão gerada em cada célula é algo próximo de 0,6V, neste sentido os módulos fotovoltaicos são uma combinação de um conjunto de células associadas em série e em paralelo, dependendo da necessidade de potência pico dos sistemas de geração fotovoltaicas os módulos também podem ser associados formando arranjos que fornecem um gama grande de valores de tensão e potencia.

O circuito equivalente de uma célula fotovoltaica é demonstrado na figura 21, sendo a base dos parâmetros elétricos de saída.

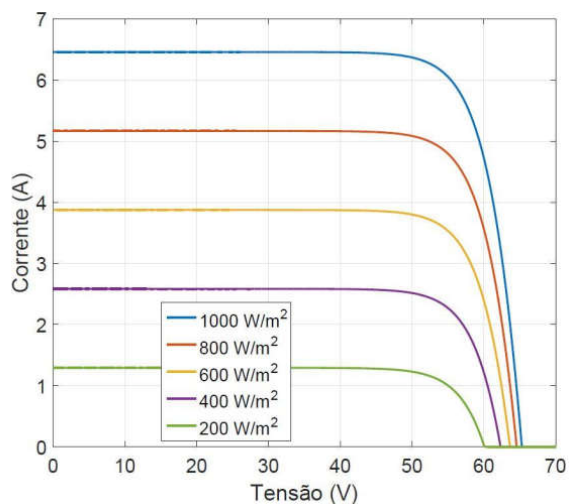
Figura 21- Circuito Equivalente de Uma Célula Fotovoltaica



Fonte: BREU, 2008.

Pelo esquemático do circuito equivalente fica claro que dois fatores afetam o desempenho da célula fotovoltaica: A variação da irradiação solar e a temperatura da célula, graficamente são representados pelas curvas V-I, conforme a figura 22, onde I_{mp} (corrente no ponto de máxima potência) e fortemente afetada pelo gradiente de irradiância sobre o modulo, já V_{mp} (tensão no ponto de máxima potência) sobre pequenas variações.

Figura 22- Curva I-V para módulos fotovoltaicos



Fonte: BREU, 2008.

2.7.2 Gerador Fotovoltaico

Para determinar a potencia de geração fotovoltaica de uma usina fotovoltaica é utilizada a irradiação de plano horizontal do local e o consumo da unidade consumidora em kWh, conforme a equação 17.

$$P_{sfv} = \frac{E \times G_{STC}}{H_{tot} \times TD} \quad \text{A equação (17)}$$

Onde:

P_{sfv} = Potencia do sistema fotovoltaico Wp;

G_{STC} = Irradiancia das condições de teste (Stand Teste Condition);

H_{tot} = Irradiação total no localidade;

TD = Taxa de performance do sistema

A quantidade de módulos fotovoltaicos para atender a solicitação de consumo é definida pela equação 18.

$$N^{\circ}_{mod} = \frac{P_{sfv}}{P_{modulo}} \quad \text{A equação (18)}$$

Onde:

N°_{mod} = Numero de modulos;

P_{modulo} = Potência pico do modulo fotovoltaico (Wp);

Ocorre, entretanto que o resultado desta razão não ser um número inteiro, sendo neste caso necessário o arredondamento para o numero imediato superior, em alguns caso o número

de módulos é acrescido de 10% a 25%, fazendo o que é denominado de *overload* para fins de compensação e garantia da produtividade do sistema fotovoltaico.

2.7.2.1 A influência da Temperatura Sobre os Arranjos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos sofrem influência da temperatura do ponto de vista da tensão de circuito aberto V_{oc} , ou seja, para cada variação de grau Celsius que o módulo em relação a temperatura de ensaio a tensão de circuito aberto pode alterada, o que embora seja muito pequeno em grandes arranjos de usinas pode representar ganhos elevados de tensão nas primeiras horas da manhã. A equação 19 e 20 relaciona o ganho de tensão em módulos fotovoltaicos.

$$V_{max} = 1 - \left(\frac{(25 - T_{min})}{100} \times \beta \right) \times V_{mp} \quad \text{A equação (19)}$$

$$V_{mim} = 1 - \left(\frac{(25 - T_{max})}{100} \times \beta \right) \times V_{oc} \quad \text{eq. (20)}$$

Onde:

V_{min} = Tensão minima ;

V_{max} = Tensão maxima ;

β = Coeficiente de $\frac{V}{\text{°C}}$ do modulo

3 ESTUDO DE CASO DA IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO PROPOSTA

Neste tópico do trabalho será apresentado a implementação da solução adotada para as saídas intempestivas da UFV por violação de tensão no ponto de conexão do acessante, ou seja, será descrito a técnica de regulação automática de tensão praticada, a qual foi concebida após a coleta das amostras de tensão no ponto de conexão da usina solar fotovoltaica.

Será apresentado também as características da UFV de 1,602 MWp, o EBP adotado para atender os critérios estabelecidos pela concessionária e observados no PRODIST e a interface de monitoramento disponibilizada pelo fabricante dos inversores aplicados na planta para observar o comportamento da produtividade da usina.

3.1 A USINA SOLAR FOTOVOLTAICA DE MINIGERAÇÃO

A usina solar fotovoltaica de minigeração foi adquirida pela Rack Indústria e Comercio de Arroz Ltda– RICAL mediante financiamento em rede de banco privada e sua construção realizada pela empresa Noroeste Máquinas e Equipamentos Ltda. Sendo concebida em uma fazenda do Grupo RICAL no município de Pimenteiras do Oeste, zona rural do Estado de Rondônia, no caso a Fazenda Primavera, cuja localização fica no km 18, setor Santa Rosa, linha 11, Gleba Guaporé.

A ficha técnica da UFV tem os seguintes dados:

- a) Potência Instalada: 1625,4 kWp;
- b) Acoplamento à rede de média tensão da concessionária: Por 02 transformadores de 1250 kVA cada;
- c) Tipo de topologia adotado: Geração centralizada;
- d) Números de módulos fotovoltaicos: 3.612 de 450 Wp;
- e) Número de Inversores: 06, sendo 04 de 255 kW e 02 de 250 kW;
- f) Transformador auxiliar: 01 de 45 kVA.
- g) Área do gerador fotovoltaico: 7.224 m²;
- h) Numero de estruturas para módulos: 181 com capacidade de 20 módulos cada.

A figura 23 demonstra a usina fotovoltaica completa, inclusive com a área de acesso e estacionamento técnico.

Figura 23- Usina Solar Fotovoltaica de Minigeração de 1625,4 kWp - RICAL



Fonte: O autor, 2023.

A UFV – RICAL acessa o sistema de distribuição primária da Energisa RO pelo alimentador PIT 34L1, o qual é oriundo da Subestação PIT de propriedade da Energisa RO, localizada em proximidade da divisa dos municípios de Pimenteiras do Oeste e o município de Cerejeiras. Este alimentador de média tensão é trifásico com tensão de operação 34,5kV e todo seu percurso é com rede convencional, sendo a bitola dos cabos de alumínio com alma de aço - CAA no ponto de conexão de 33 mm² - MCM. Embora a UFV tenha 1625,4 kWp de potência instalada, por limitações técnicas a mesma é subdividida em blocos de carga (subsistemas), de tal modo que os inversores fatiam a quantidade total dos módulos empregados em sua construção, a divisão do gerador fotovoltaico é demonstrada no croqui do Anexo I.

O acoplamento da UFV- RICAL com o sistema de distribuição da concessionária PE realizado por uma subestação de elevação, a qual é composta por 02 transformadores que operam em paralelo em uma barra de injeção da usina, sendo a potência de cada transformador 1250kVA e nos secundários destes foi acoplado 03 inversores, dos quais 02 tem potência nominal de 255 kW e 01 250 kW, conforme o diagrama unifilar do anexo II e III.

3.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MEDIA TENSÃO ACESSADO PELA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA DE MINIGERAÇÃO

Para a conexão da uma usina solar fotovoltaica ao sistema da concessionária é necessária que a mesma autorize a viabilidade de conexão, no caso da UFV-Rical como a potência a ser instalada é de 1520 kW em inversores, a Energisa RO solicitou um memorial com algumas proteções a serem implementadas no EBP desenvolvido, de maneira que a operação da usina não causasse atuações da proteções do alimentador e da subestação a montante da mesma, sendo elas:

- a) Instantânea de fase e neutro (50F e 50N);
- b) Temporizada de fase e de neutro (51F e 51N);
- c) Direcional de fase, sentido barra da usina para barra da concessionária (67F);
- d) Sincronismo (25);
- e) Subtensão (27);
- f) Sequencia de fase (47);
- g) Sobretensão de fase (59F);

- h) Subfrequencia (81U);
- i) Sobrefrequencia (81O);
- j) Derivada de frequência sobre e sub frequência (81 DF/DT –ROCOF);
- k) Ângulo de fase (78);
- l) Restrição de tensão (51V);
- m) Desequilíbrio de corrente (46);
- n) Oscilografia (98).

Para o atendimento a esta solicitação a proteção secundária do disjuntor de média tensão foi realizada por relé digital, sendo adotado o modelo da Pextron URP 6000, o qual apresenta as funções ANSI solicitadas pela Energisa Ro e outros recursos.

3.2.1 Parâmetros de Curto Circuito no Ponto de Conexão

Para o desenvolvimento do estudo de proteção a Energisa Ro disponibilizou as características da rede até o ponto de conexão. As tabelas 2 e 3 demonstram os principais parâmetros a serem levados em consideração na concepção do cálculo de ajuste de proteção da UFV.

Tabela 2 – Corrente de Curto Circuito no Ponto de Conexão

ICC (3F)	ICC (2F-T)	ICC (F-T)max	ICC (F-T)min
0,385 (kA)	0,366(kA)	0,242(kA)	0,071(kA)

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 3 – Impedância de Curto Circuito (PU) no Ponto de Conexão

R_1	jX_1	R_0	jX_0
2,7778	3,3409	3,5995	11,8647

Fonte: O autor, 2023.

3.2.2 Parâmetros do Equipamento de Proteção a Montante da UFV

Para que haja seletividade entre o equipamento de proteção da UFV e o equipamento de proteção mais próximo do lado da concessionária, o setor de planejamento de rede desta

informa os parâmetros do equipamento na rede para que sirva de orientação na validação do projeto de proteção e os ajustes necessários para que o relé da UFV não venha a desligar o alimentador quando em uma falta de qualquer natureza. A tabela 4 demonstra resumidamente os parâmetros elétricos do equipamento a montante da UFV no alimentador PIT 34L1.

Tabela 4 – Parâmetros do Relé da Concessionária a Montante do Ponto de Conexão

Relé	Corrente (A)	Curva (IEC)	Dial de Tempo
51F	54	VI	0,11
51N	18	VI	0,18
50F	220	TD	0,05
50N	160	TD	0,05

Fonte: O autor, 2023.

3.3 ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE DA UFV-RICAL

Para atendimento da exigência da Energisa RO, foi viabilizado um estudo de seletividade o qual visa ajustar o dispositivo de proteção da UFV de tal modo que na presença de uma falta, opere apenas o dispositivo mais próximo, evitando assim a saída de grandes blocos de carga e danos aos equipamentos do sistema elétrico. Um bom sistema de proteção tem uma coordenação e confiabilidade como principal meta, evitando saídas intempestivas, desligamentos desnecessários e maior disponibilidade de conexão da UFV com o sistema elétrico da concessionária.

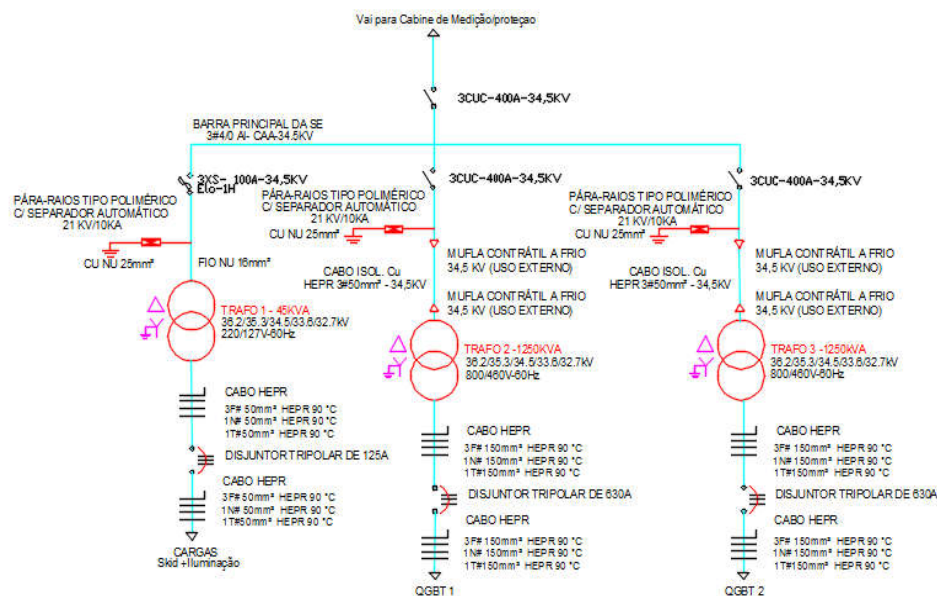
Para realizar o ajuste no relé que aciona o disjuntor de média tensão na cabine de proteção da UFV foi considerado os dados das tabelas 2 e 4 disponibilizados no parecer de acesso pelo setor de planejamento de redes da Energisa, além das características dos transformadores de acoplamento na subestação de elevação da UFV – Rical, bem como as características elétricas da montagem eletromecânica do sistema.

3.3.1 Corrente Nominal dos Transformadores da Subestação de Acoplamento da UFV

A subestação elevatória da UFV- Rical é composta por 02 transformadores ligados em paralelo pelo lado de média tensão, essa configuração visa um melhor confiabilidade do subsistema de acoplamento, pois caso haja faltas, danos ou problemas no barramento de baixa tensão de um dos transformadores é possível a retirada do equipamento defeituosos e manter

cerca de 50% da UFV em funcionamento. Na figura 24 é demonstrado os 02 transformadores de força e o esquema de ligação dos mesmos, além do transformador de serviços da usina.

Figura 24- Diagrama Unifilar do BOS da UFV - RICAL



Fonte: O autor, 2023.

3.3.1.1 Corrente Nominal dos Transformadores da UFV- RICAL

Nominalmente a potência dos 02 transformadores juntos é de 2500 kVA, com tensão de 34,5 kV (V_{FF}), assim a equação 20 determina a corrente nominal que será drenada ou injetada na alimentador.

$$I_{nom} = \frac{S_{trafo}}{\sqrt{3} \times V_{FF}} \quad \text{eq. (20)}$$

Onde:

I_{nom} = Corrente Nominal (A);

S_{Trafo} = Potência nominal da soma dos Transformadores (kVA);

V_{FF} = Tensão entre fase do sistema (kV);

Aplicando os valores na equação 20 é obtido o valor de 41,84 A.

3.3.1.2 Corrente Magnetização dos Transformadores da UFV- RICAL

No processo de energização de transformadores ocorre uma elevada corrente, a qual é chamada de corrente de magnetização (inrush em inglês), como a os transformadores aplicados na UFV- Rical são a óleo sua duração é de aproximadamente 100ms, ou 6 ciclos. Conforme a estratégia de proteção adotada a maneira de determinar a corrente de magnetização pode mudar, neste trabalho será apresentada a recomendada pela Energisa Ro, a concessionária em que a UFV – Rical foi homologada, portanto, a equação 21 demonstra como encontrar o valor.

$$I_{mag} = \frac{1}{\left((\sqrt{3} \times V_{FF}) + \frac{1}{I_{CC3\phi}} \right) \div (S_{trafo} \times 10)} \quad \text{eq. (21)}$$

Onde:

I_{mag} = Corrente Magnetização (A);

$I_{CC3\phi}$ = Corrente de Curto Trifásico no ponto de conexão (KA);

Aplicando os valores na equação 21 é obtido o valor de 212,17 A, este valor deve ser levando em conta na hora de analisar o coordenograma no gráfico bilog, pois o mesmo não pode está acima do ajuste instantâneo da função 50F, para evitar a saída e atuação do relé de maneira intempestiva.

3.3.1.3 Ponto ANSI dos Transformadores da UFV- RICAL

O ponto ANSI é o máximo valor de corrente que o transformador pode suportar por um determinado período antes que o mesmo se danifique permanentemente. Este valor de corrente geralmente é analisado no coordeno grama de proteção como um ponto no qual já aconteceu a atuação da proteção 50F, uma vez que este valor nunca deve ser atingido. No caso dos transformadores utilizados na UFV-RICAL, por estarem fechamento estrela aterrada, o ponto ANI tanto pata fase como neutro são iguais e determinados por meio da equação 22.

$$I_{ANSI} = 0,58 \times \left(\frac{100}{Z\%_{TR}} \right) \times I_{nom} \quad \text{eq. (22)}$$

Onde:

I_{ANSI} = Corrente do Ponto ANSI (A);

$Z\%_{TR}$ = Impedancia residual do transformador (Ω);

Um ponto importante a ser descrito é que na presença de transformadores com potência nominais diferentes o cálculo sofre algumas alterações, além de que transformadores de mesma potencia dificilmente tem mesma impedância residual, o que obriga ao projetista considerar o pior caso. Para a UFV-Rical foi considerado o valor de 197,19 A por um tempo de até 2 segundos como pior caso.

3.3.1.4 Corrente Demandada Pela UFV- RICAL

A RN 482 estabelece que a maior demanda, seja de geração ou de carga é que deve ser considerada e disponibilizada no ponto de conexão. Deste modo a UFV-Rical tem uma potencia instalada de inversores que somados chega a 1520 kW, pela equação 23 é dimensionada a corrente demandada de injeção durante a hora de sol pleno –HSP.

$$I_{dem} = \frac{P_{dem}}{\sqrt{3} \times \cos\theta \times V_{FF}} \quad \text{eq. (23)}$$

Onde:

I_{dem} = Corrente demandada no ponto de conexão (A);

$\cos\theta$ = Fator de Potencia (0,92);

Aplicando os valores na equação 23 é obtido o valor de 27,65 A.

3.3.2 Ajuste no Relé da UFV- Rical

O relé empregado na proteção secundária do disjuntor de média tensão foi o modelo PEXTRON URPE 6000, o qual além das funções instantâneas também conta com as funções de geração distribuída solicitadas na norma da Energisa Ro.

3.3.2.1 Ajuste de Proteção de Sobrecorrente - ANSI 50/51

A unidade instantânea de fase deve ser parametrizada com as seguintes orientações:

- a) A corrente de acionamento desta unidade deve ser maior que a corrente de magnetização dos transformadores, no caso da Energisa Ro ela estabelece que a unidade instantânea de fase seja 10% superior a corrente de magnetização;
- b) A corrente de acionamento deve ser menor que a corrente de curto trifásica no ponto de conexão;
- c) A corrente da unidade instantânea deve ser inferior ao ponto ANSI dos transformadores.

A unidade temporizada de fase leva em conta uma tolerância ou sobrecarga do sistema, o qual ao atingir um valor pré-determinado inicia a contagem de tempo de acionamento da bonina de abertura do disjuntor. Normamente em projetos de proteção esta tolerância é nominalmente igual tolerância da demanda máxima que não incorre em multa de ultrapassagem.

Por se tratar de uma unidade temporizada a mesma obedece a uma curva de atuação para a qual o Instituto de Eletrotécnica - IEC normalizou, através da 60255-3 equações que descrevem curvas de atuação, sendo a mais comum em sistema de distribuição de média tensão a muito inversa – MI, ou seja, para valores de corrente baixos a unidade temporizada levaria muito tempo, conforme as correntes se aproxima do valor da corrente pré determinada para a demanda estabelecida o tempo se torna mais curto. A equação 24 descreve matematicamente a curva MI.

$$I_{ac} = \frac{13,5 \times D_{time}}{M-1} \quad \text{eq. (24)}$$

Onde:

D_{time} = Ajuste de tempo da curva;

M = Relação entre corrente de curto de a de ajuste;

Ainda sobre a unidade temporizada, a mesma não pode atuar durante a energização dos transformadores, ou seja, tem de ser ajustado para um tempo maior que 100 ms e a sensibilidade com o equipamento a jusante do relé deve ser no mínimo de 300 ms. Para as unidades de instantâneo e temporizada de neutro se aplica a mesma lógica, contudo deve ser considerado os valores de ajuste entre 20% e 30% do valor de *pick up* de fase.

3.3.2.2 Ajuste de Proteção Direcional de Corrente - ANSI 67

A unidade de função direcional de corrente atua em um dos sentidos, seja ele direto, quando o fluxo de corrente é da barra da concessionária para barra da subestação de acoplamento do cliente ou reverso quando de inverte o fluxo, mas nunca nos dois sentidos, sendo determinado pelo ângulo de torque máximo. A concepção deste angulo se dá na unidade 67 por meio de 03 TP's, os quais traduzem os fasores de tensão para o relé.

A sensibilidade da unidade direcional 67 quando em sentido reverso deve ser de 30% a 200% da corrente de curto circuito dos inversores, no caso da UFV-Rical o fabricante dos

inversores não informa a contribuição de curto circuito na folha de dados, portanto foi adotado como sendo 50% da corrente usina, conforme a equação 25.

$$I_{UFV} = \frac{P_{UFV}}{\sqrt{3} \times \cos\theta \times V_{FF}} \times \eta \quad \text{eq. (25)}$$

Onde:

I_{UFV} = Corrente da usina (A);

P_{UFV} = Potência da usina (kW);

η = Fator de sobrecorrente da contribuição de curto circuito (A);

Aplicando os valores na equação 25 é obtido o valor de 41,47 A. As unidades temporizadas e instantâneas para esta UFV ficaram com ajuste de 2,9 A para temporizada de fase, curva MI e dial time de 0,05, já a instantânea ficou em 4,14 A, em todos a RTC foi de 10.

3.3.3 Parametrização do Relé Microprocessado PEXTRON URP 6000

A aplicação do relé de minigeração da pextron URP 6000 foi determinante, pois executa todas a funções solicitada pela Energisa RO para projeto além de fornecer uma interface amigável de programação, a qual permite parametrizar com base nos estudos antes mesmo de ter o relé físico. A figura 25 apresenta o relé microprocessado pextron usado na aplicação.

Figura 25- Relé Pextron URP 6000

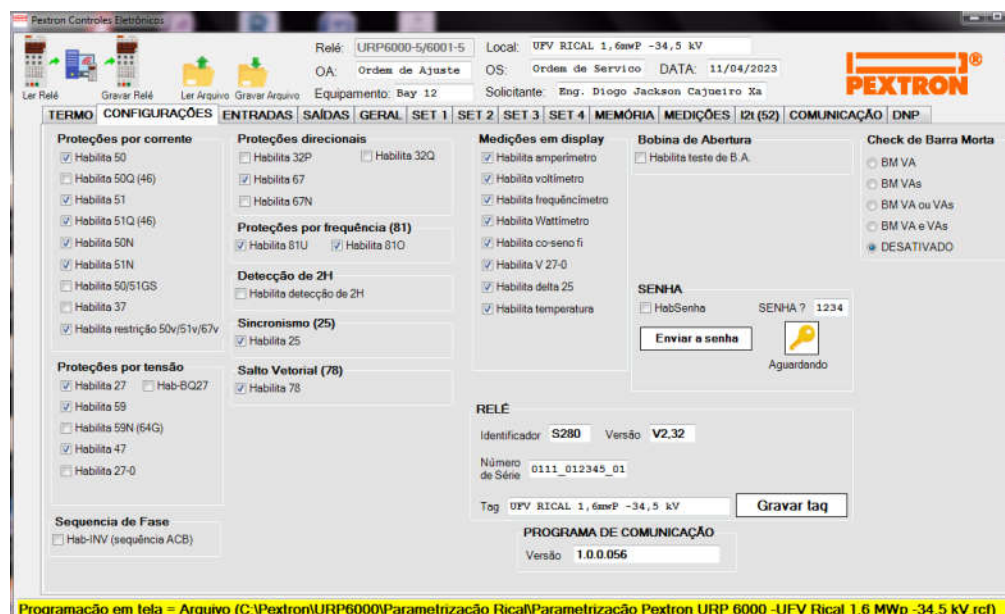


Fonte: Manual Pextron, 2023 (adaptada).

3.3.3.1 Interface de Parametrização do Relé Pextron URP 6000

A parametrização do relé é realizada por uma interface dedicada, sendo disponibilizado o aplicativo para *download* no site do fabricante para múltiplas plataformas. Neste trabalho foi usada a versão URP600x-5A 1.0.5.6 a qual é demonstrada na figura 26.

Figura 26- Interface de Parametrização do Relé Pextron URP 6000



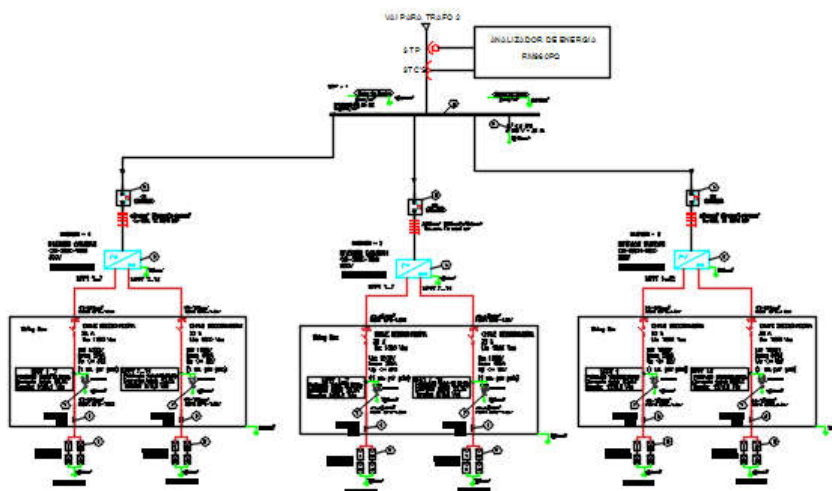
Fonte: O autor, 2023 (adaptada).

Toda a parametrização é realizada marcando as funções ANSI que se deseja implementar, carregando os valores do estudo de proteção, sendo possível escolher 04 diferentes maneiras de parametrizar, bem como escolher as saídas digitais ou analógicas implementadas no comando do disjuntor de média tensão.

3.4 MEDIÇÃO AMOSTRAL NA BARRA DE GERAÇÃO DA UFV-RICAL

Para a coleta da curva de carga, histograma de tensão e outros parâmetros do sistema elétrico de potência alvo do estudo, foi empregada a técnica de medições das solicitações de demanda na barra principal de baixa tensão da subestação de acoplamento, em especial no barramento de paralelismo dos inversores, conforme o esquemático da figura 27.

Figura 27- Medição de parâmetros elétricos da barra de paralelismo dos inversores



Fonte: O Autor.

Na figura 28 é demonstrado o analisador de energia RM960PQ fabricado pela Engro, o qual foi empregado na coleta de dados para fomentar o dimensionamento do banco regulação descrito neste trabalho, para tal foram utilizados dois equipamentos analisadores de energia RM960PQ, sendo plugados durante o mês de maio de 2023 e configurados com duas lógicas de leitura e registro cada um:

- a) A primeira lógica trata da medida de parâmetros de energia ativa, reativa, ângulo de tensão e corrente a cada hora por um período de sete dias;
- b) A segunda lógica registra o perfil da tensão na barra da subestação a cada 10 minutos por um período de sete dias, totalizando 1080 leituras conforme preconiza o PRODIST- MOD 08.

Figura 28- Analisador de Energia RM960PQ



Fonte: Catálogo ENGRO, 2023.

O dia mais crítico das coletas é demonstrado de maneira resumida na tabela 05, parcialmente reproduzida com dados do equipamento plugado ao barramento (o mais crítico) ao final de sete dias de análise. Embora o PRODIST recomende leituras a cada 10 minutos do perfil de tensão, neste trabalho as medições se concentraram nos horários de produção solar, sendo descartadas as medições em outros horários.

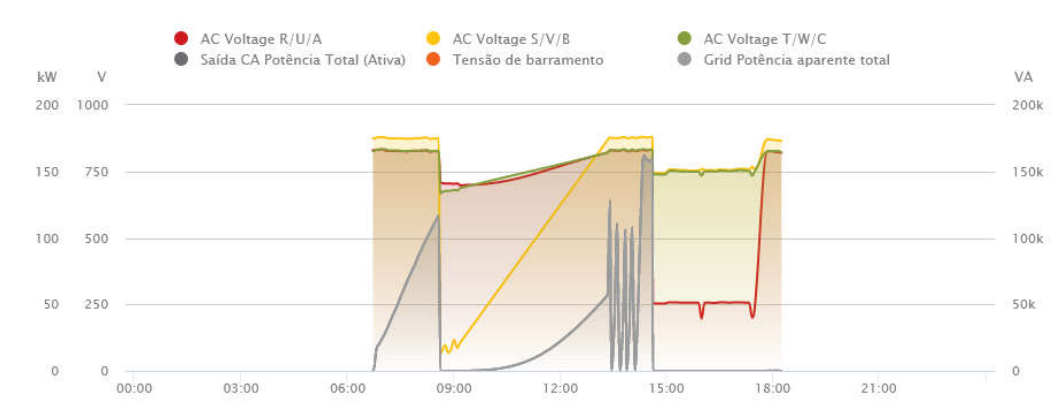
Tabela 5 – Perfil de tensão do barramento 02 da SE de acoplamento da UFV-RICAL

intervalo (Horas)	Tensão Média (V)	Nº de Amostras Validas	Classificação Prodist
06:00 as 07:00	845,8	5	Precária superior
07:00 as 08:00	843,24	12	Precária superior
08:00 as 09:00	694,36	12	Crítica inferior
09:00 as 10:00	495,5	03	Crítica inferior
10:00 as 11:00	0	-	-
11:00 as 12:00	0	-	-
12:00 as 13:00	0	-	-
13:00 as 14:00	844,43	11	Precária superior
14:00 as 15:00	751,52	14	Precária inferior
15:00 as 16:00	587,22	11	Crítica inferior
16:00 as 17:00	858,82	12	Crítica inferior
17:00 as 18:00	679,04	11	Crítica inferior
18:00 as 19:00	838,28	6	33,90

Fonte: O Autor.

A figura 29 demonstra graficamente a baixa produção no dia mais crítico da tabela 05 frente às variações de perfil de tensão, os quais são intimamente ligados aos desligamento dos inversores, afetando negativamente a produção de energia pela UFV-Rical.

Figura 29- Curva de Geração da UFV-RICAL



Fonte: O autor, (adptado do CSI Solar - Canadian 2023).

3.5 DIMENSIONAMENTO DO BANCO REGULADOR

Para determinar a potência do Banco regulador de tensão trifásico foram adotadas as seguintes premissas:

- a) A configuração de fechamento do banco em estrela aterrada, com até 32 degraus;
- b) A tensão de operação no regulador de 34,5 kV;
- c) Tipo de resfriamento a óleo;
- d) Corrente máxima no alimentador limitada pela capacidade do cabo 33 mm² - CAA o qual é de 175 A;
- e) O carregamento máximo somando UFV mais as cargas a jusante do ponto de conexão da mesma, o qual é de 2480 kW;

Para determinar o maior carregamento do trecho do alimentador PIT 34L1, foi empregado a medição de parâmetros elétricos por uma período de 10 dias, de tal modo a construir a curva de carga do trecho do alimentador para fins de dimensionamento do banco regulador a ser empregado. A Tabela 6 demonstra o perfil de carga do alimentador, para o dia mais crítico registrado nos instrumentos analisadores de energia, sendo possível dividir os períodos de maior carregamento, médio carregamento e baixo carregamento. Estes dados serão utilizados para parametrizar o banco regulador de maneira a ajustar o perfil de tensão dentro dos parâmetros que o PRODIST estabelece.

Tabela 6 – Injeção de Potencia Ativa no alimentador PIT 34 L1

Tempo (Horas)	Potência Ativa (kW)	Fator de Potência Antigo	Ângulo do Fator de Potência
1	1180	0,86	30,68
2	1196	0,86	30,68
3	1106	0,86	30,68
4	1096	0,86	30,68
5	1350	0,86	30,68
6	1963	0,86	30,68
7	1418	0,86	30,68
8	1520	0,86	30,68
9	1528	0,84	32,86
10	2320	0,84	32,86
11	2380	0,83	33,90
12	2300	0,84	32,86
13	2480	0,83	33,90
14	2450	0,84	32,86
15	2470	0,83	33,90
16	2320	0,82	34,92

17	2380	0,82	34,92
18	1735	0,83	33,90
19	1418	0,85	31,79
20	1520	0,85	31,79
21	1528	0,84	32,86
22	1320	0,86	30,68
23	1260	0,86	30,68
24	1263	0,86	30,68

Fonte: O Autor.

Ao colher a curva de carga é possível observar que no dia mais crítico a maior solicitação do alimentador ocorre no horário de 13:00, ou seja, dentro do horário de maior produção da UFV- Rical por está no ponto máximo das HSP.

3.5.1 Determinação do kVA do Banco Regulador

Pela equação 23 o banco regulador deve ter potencia nominal superior a 2.695,65 kVA, porém no nível de tensão de 34,5 kV o banco comercial mais próximo e disponível por um fabricante tem a potencia de 5000 kVA, sendo a tensão no regulador de 19,92 kV, pela configuração de conexão adotada, no caso estrela aterrada.

A figura 30 demonstra o banco instalado, já com a estrutura de sustentação convencional em palanque e configurado em estrela aterrada.

Figura 30- Regulador de Tensão -RT Instalado do PIT 34 L1



Fonte: O Autor.

3.6 CONFIGURAÇÃO E OPERAÇÃO DO BANCO REGULADOR

Com base na curva de carga do dia mais crítico para o alimentador e adotando o dia solar como referência para carregamento, permite a divisão do perfil de carregamento do alimentador em 04 cenários, conforme a tabela 7.

Tabela 7 – Classificação do Nível de Carga do Alimentador PIT 34 L1

Tempo (Horas)	Potência Ativa (kW)	Nível de Carregamento
6	1963	Leve
7	1418	
8	1520	
9	1528	
10	2320	Moderado
11	2380	
12	2300	
13	2480	Severo
14	2450	
15	2470	
16	2320	
17	2380	Muito Leve
18	1735	

Fonte: O Autor.

A atuação do banco regulador proposto neste trabalho será concentrada no HSP, período do dia solar cujo valor de potência demanda no alimentador é mais crítico, portanto mais suscetíveis a afundamentos de tensão.

O controle do banco é realizado por meio de rele microprocessado, sem possibilidade de comando remoto devido a indisponibilidade de rede de telefonia móvel no local e a parametrização é realizada por meio de interface amigável do fabricante demonstrada na figura 26 do tópico 3.3.3.1. No Anexo IV é demonstrado o diagrama unifilar do BOS da UFV- Rical já com a inserção do relé a montante do ponto de conexão.

3.7 CORREÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO

A parametrização da função ANSI 90 do relé foi realizada utilizando a técnica de CAT com base no LDC para os cenários previstos da tabela 7, adotando como referência de corrente passante no banco regulador os valores demonstrados na tabela 8, sendo adotado a potência média dos intervalos da tabela 6, bem como o fator de potência média de 0,86.

Tabela 8 – Corrente de Carga do Alimentador PIT 34 L1

Nível de Carregamento	Potência Ativa média (kW)	Corrente (A)
Muito Leve	1607,25	31,27
Leve	2057,3	40,03
Moderado	2333,33	47,30
Severo	2430	44,2

Fonte: O Autor.

A impedância de rede foi determinada pela equação 26, a resistência da rede pela equação 27 e a reatância pela equação 28.

$$Z_{rede} = \frac{V_{carga} - V_{nom}}{I_{carga}} \quad \text{eq. (26)}$$

$$R_{rede} = Z \times \cos\theta \quad \text{eq. (27)}$$

$$X_{rede} = Z \times \sin\theta \quad \text{eq. (28)}$$

Onde:

Z_{rede} = Impedancia da rede (Ω);

R_{rede} = Resistencia da rede (Ω);

X_{rede} = Reatancia da rede (Ω);

θ = angulo da componente da rede ;

Para ajuste dos parâmetros R e X é necessário o cálculo do cenário mais desfavorável ao sistema de distribuição de media tensão, no caso do alimentador PIT 34L1 é o cenário de carga severo, neste sentido as equações 29 e 30 determinam os ajustes dos parâmetros R e X respectivamente.

$$R_{adj\ LDC} = \frac{I_{max} \times R}{R_{TP}} \quad \text{eq. (29)}$$

$$X_{adj\ LDC} = \frac{I_{max} \times X}{R_{TP}} \quad \text{eq. (30)}$$

Onde:

$R_{adj\ LDC}$ = Ajuste do parametro R para a tecnica LDC;

$X_{adj\ LDC}$ = Ajuste do parametro X para a tecnica LDC;

R_{TP} = Relação do sensor de tensão do regulador;

I_{max} = Corrente do maior nível de carregamento;

A queda tensão devido as parâmetros de rede fica determinado pelas equações 31 e 32, já a queda de tensão total é a soma vetorial da queda dos dois parâmetros conforme a equação 33.

$$\Delta VR_{rede} = I_{carga} \times R \quad \text{eq. (31)}$$

$$\Delta VX_{rede} = I_{carga} \times X \quad \text{eq. (32)}$$

$$\Delta V = \sqrt{\Delta VR^2 + \Delta VX^2} \quad \text{eq. (33)}$$

A tensão do ponto de correção da carga é a soma da tensão nominal de fornecimento adicionada a variação (ΔV).

3.7.1 Determinação da Tensão no Ponto de Conexão da UFV pelo Relé 90

Embora seja a todo momento monitorado pelos TC's e pelo TP, tanto o nível de tensão como a corrente pelo lado da carga no banco regulador de tensão, foi inserido um parametrização com base no pior cenário de carga do alimentador PIT34L1. O módulo 8 do PRODIST estabelece uma tensão de até 1,05 do valor da nominal para o limite da fixa adequada e foi considerando no cenário dos cálculos um fator de potencia média de 0,86.

A tabela 9 demonstra os parâmetros inseridos no painel de interface do relé 90.

Tabela 9 – Parâmetros de Configuração do Relé 90 do Banco Regulador

Parâmetro	Valor de Referencia	Unidade
-----------	---------------------	---------

Tensão Mínima	34,5	kV
Tensão Máxima	36,225	kV
Angulo	30	°
Tensão na Carga	36,105	kV
Corrente máxima	44,2	A
R _{TP}	120	-

Fonte: O Autor.

3.7.1.1 Memorial de Cálculo da Tensão no Ponto de Conexão

Determinação da impedância da rede se dá pela equação 26:

$$Z_{rede} = \frac{36105 - 34500}{44,2} = 36,31\Omega$$

Determinação da resistência da rede se dá pela equação 27:

$$R_{rede} = 36,31 \times 0,86 = 31,44\Omega$$

Determinação da reatância da rede se dá pela equação 28:

$$X_{rede} = 36,31 \times 0,5 = 18,15\Omega$$

Determinação do ajuste de resistência com base LDC pela equação 29:

$$R_{adj\ LDC} = \frac{44,2 \times 31,44}{120} = 11,58$$

Determinação da ajuste de reatância com base LDC pela equação 30:

$$X_{adj\ LDC} = \frac{44,2 \times 18,15}{120} = 6,69$$

Determinação das quedas de tensão com base em R e X do sistema:

a) Para R

$$\Delta V_{R_{rede}} = 44,2 \times 31,44 = 1389,64V$$

b) Para X

$$\Delta V_{X_{rede}} = 44,2 \times 18,15 = 802,23V$$

Determinação da tensão no ponto de conexão é determinado pela equação 33:

$$\Delta V = \sqrt{1389,65^2 + 802,23^2} = 1604,6 V$$

A queda de tensão total somada a tensão nominal é de 36104,6 V, porém o relé deve compensar a banda morta da relação de transformação do TP, cujo valor é de 120, portanto no ponto de conexão a tensão é de 36224,06, ou seja, com erro na ordem de 0,00001 do valor calculado de limite do PRODIST.

3.8 RESULTADOS OBSERVADOS

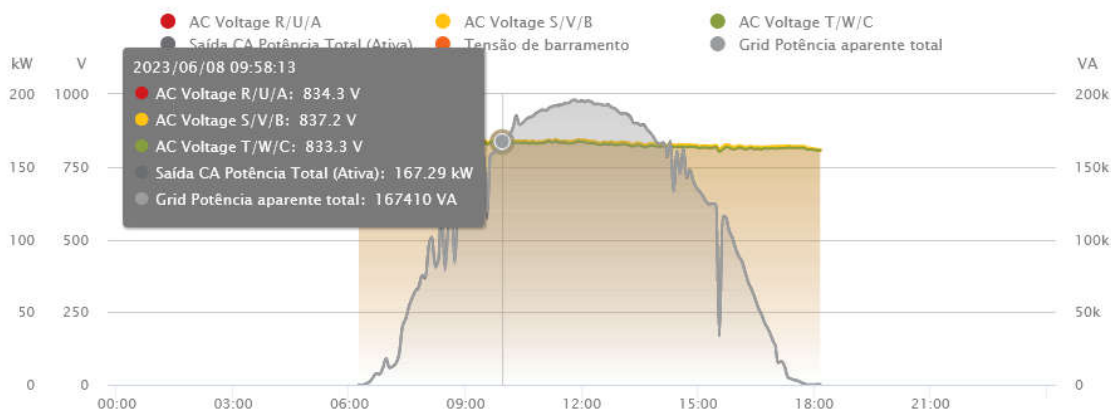
O método de correção do nível de tensão com emprego de CAT, em especial a técnica aqui apresentada o LDC tem como principal vantagem a possibilidade de usar os parâmetros de R e X da rede medidos ou cadastrados nos centros de operação e controles de redes-COR, ou calculados, caso particular da aplicação aqui descrita.

A opção do autor deste trabalho pelo LDC foi com base na literatura já bastante difundida da técnica, apenas feito pequenos ajustes para a aplicação em usinas de microgeração, as quais são muito impactadas pelas variações de tensão em sistemas de média tensão. O LDC aqui aplicado também visava a manutenção do nível de tensão em valores uniformes e com pouca variação, mesmo frente a carga severa do alimentador, além de uma menor quantidade de comutações no banco regulador empregado, portanto, diminuindo ou prolongando a vida útil de tais equipamentos.

A figura 31 demonstra a curva de geração após a entrada em operação do banco regulador no sistema onde a UFV-Rical está conectada, sendo possível visualizar uma maior

contribuição da usina do ponto de vista de injeção de potência na rede de média tensão da Energisa RO se comparado ao cenário demonstrado na figura 29.

Figura 31- Curva de Geração da UFV RICAL após Instalação do RT



Fonte: O autor, (adptado do CSI Solar - Canadian 2023).

Os valores demonstrados são lidos na barra de 800 V, onde os inversores estão conectados em paralelo, embora o regulador de tensão tenha sido instalado no lado de média tensão, através da equação 2 é possível calcular o valor da tensão no primário dos transformadores do BOS da UFV-Rical no momento do registro da figura 31. Como o transformador abaixa de 34,5 kV para 0,8 kV a tensão de fornecimento, logo a RTP do trafo é de 43,125, ou seja, a tensão primária no momento demonstrado na figura 31 é de 36104,25V na barra de 34,5 kV, o que representa 4,65% de tensão acima da nominal e dentro da faixa preconizada pelo PRODIST modulo 08.

4 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A técnica defendida neste trabalho se configura como mais uma opção de baixo custo, já amplamente empregada em sistema de media tensão, porém não para correção de tensão especificamente em UFV, assim o presente tem as seguintes contribuições:

- Documentação de uma aplicação real da técnica de CAT para fins de melhoria em acoplamento de sistemas de minigeração distribuída;
- Metodologia modular de otimização de níveis de tensão em redes de distribuição de média tensão;

- c) Retardo em investimento de alimentadores por parte das concessionárias, liberando os recursos financeiros para outros ativos da rede;
- d) Melhora na produtividade (injeção de energia) para UFV que operam na modalidade compensação remota de energia no SCEE praticado no Brasil.

Para trabalhos futuros o autor deste trabalho propõe:

- a) Utilização de algum nível de inteligência artificial para reconfigurar o relé 90 de tal modo que o sistema responda a perfil de carga do alimentador;
- b) Aplicar a integração por radio ou link de satélite de maneira a compor uma rede elétrica inteligente (*smart grid*) aplicando a técnica de supervisório no modelo SCADA;
- c) Considerar a utilização cascadeada de banco de reguladores de tensão e banco de capacitores em configuração *shunt* de tal modo a permitir melhor nível de correção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – ABSOLAR. **Infográfico de Energia solar Fotovoltaica no Brasil**. 2023. Disponível em: <<http://www. www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em de junho de 2023.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST – MOD 08- Qualidade da energia elétrica**. 2010. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em de junho de 2023

_____. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST – MOD 02- Planejamento e expansão do sistema de distribuição**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em de junho de 2023

_____. **Resolução 482, condições gerais de acesso para microgeração e minigeração distribuída ao sistema de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica.** 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em de junho de 2023.

_____. **Resolução 481, condições gerais de desconto para tarifas de uso do sistema de transmissão e Distribuição.** 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em de junho de 2023.

_____. **Resolução 687, altera a resolução 482 e os módulos 1 e 3 do Procedimento de Distribuição -PRODIST.** 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em de junho de 2023.

_____. **Resolução 1000, estabelece as regras de prestação de serviço público de distribuição de energia elétrica e revoga a 414.** 2021. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em de junho de 2023.

_____. **Resolução 1059, altera a resolução 920, a resolução 856 e a resolução 1000 e da outras providências.** 2023. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em de junho de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR -5282-2004 Capacitores de Potencia em Derivação para Sistemas de Tensão Nominal Acima de 1 kV.** ABNT- Catálogo. Disponível em www.abntcatalogo.com.br. Acessado em 10 de maio de 2016.

Braun-Grabolle, P. **A Integração de Sistemas Solares Fotovoltaicos em Larga Escala no Sistema Elétrico de Distribuição Urbana.** 2010. 260 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Santa Catarina.

ENERGISA. **NDU 015 - Critérios para a Conexão de Acessantes de Centrais Geradoras e Geração Distribuída ao Sistema de Distribuição.** Para Conexão em Média Tensão. Grupo Energisa S.A. [S.l.], p. 122. 2017. Disponível em: <<http://www.energisa.com.br>>. Acesso em de julho de 2023.

BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à Análise de Circuitos Elétricos**, 10ª ed. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2004.

CAMINHA, Amadeu Casal. **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos.** São Paulo. Edgar Blucher. 1977.

CHEN, C. S.; CHO, M. Y. **Energy Loss Reduction By Critical Switches.** IEEE *Transactions on power delivery*, 1993.

DEMÉTRIO, Magnoli; REGINA, Araújo. **Geografia: Paisagem e Território.** São Paulo. Moderna, 1997.

FURASTÉ, Pedro Augusto. **Normas Técnicas para o Trabalho Científico: Explicação das Normas da ABNT**. 15ª Ed. Porto Alegre: s.n., 2006.

*INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS -IEEE. **Lanl Engineering Standard Manual Guide for AC High – Voltage Circuit***. Disponível em www.docsfield.com/ieee.std.100.html. Acesso em de julho de 2023.

*INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS -IEEE. **IEEE Std c3799-2000- Guide For The Protection of Shunt Capacitor Banks***. New York. 2000. Disponível em www.docsfield.com/ieee.std.100.html. Acesso em de julho de 2023.

KUNDUR, P.. **Power Stability and Control**. McGraw-Hill, 1994.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 3ª Ed. Rio de Janeiro. LTC. 2005.

_____. **Instalações Elétricas Industriais**. 8ª Ed. Rio de Janeiro. LTC. 2010.

PINTO, Vladimir Gomes. **Controle de Tensão de Distribuição**. 1ª Ed. Rio de Janeiro. Campus Eletrobrás. 1985.

PIRES, J. C. L. **Desafios da Reestruturação do Sistema Elétrico Brasileiro**. Texto para discussão. Rio de Janeiro, nº 76. 2000.

PRAZERES, Romildo Alves dos. **Curso Técnico em Eletrotécnica, modulo 2, livro 13: Redes de Distribuição de Energia Elétrica e Subestações**. 22ª Ed. Curitiba. Bases Livros didáticos. 2008.

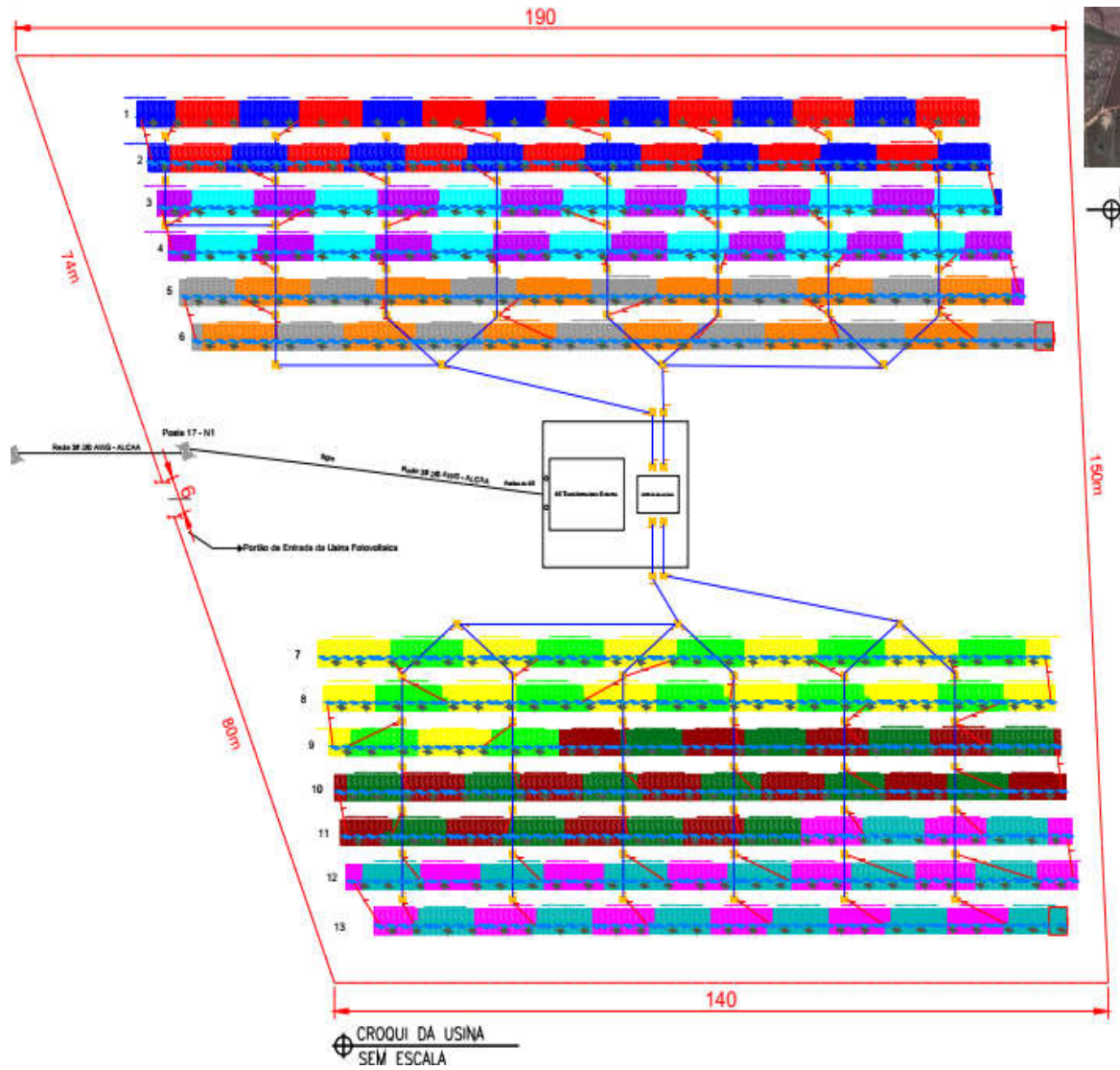
RESENER, M. **Alocação e Ajuste ótimo de Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição**. 2008. 83f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) –Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul –UFRGS, Porto Alegre, 2008. Disponível em http://www.ece.ufrgs.br/~gmasp/publicacoes/projetos_diploao/2008_mariana.pdf. Acesso em junho 2023.

ROBBA, Ernesto João; OLIVEIRA, Carlos José Barioni de; SCHMIDT, Hernan Pietro; KAGAN, Nelson. **Introdução a Sistemas Elétricos de Potencia – Componentes Simétricas**. 2ª Ed. São Paulo. Edgar Blucher. 2000.

ANEXOS

ANEXO – I

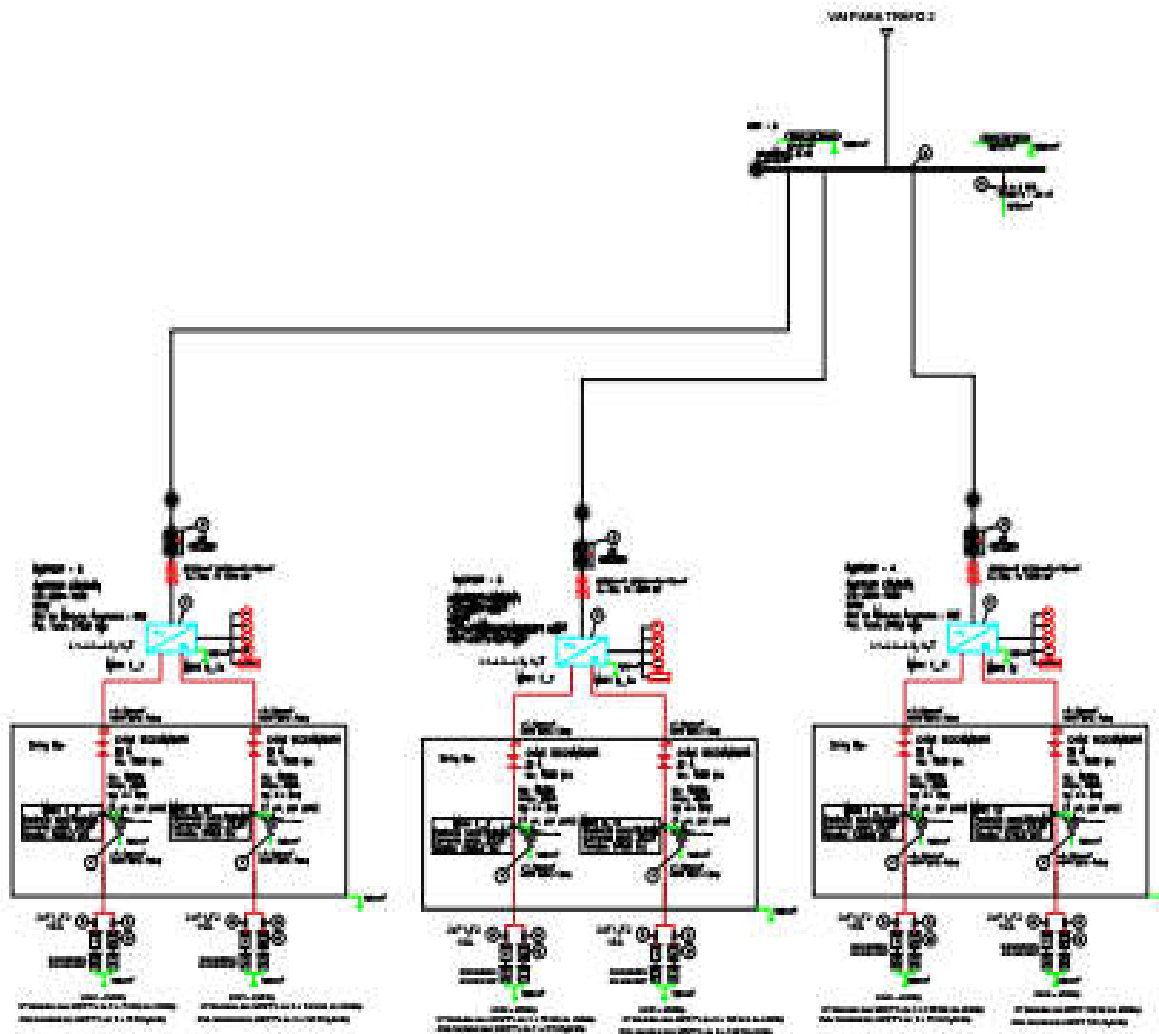
Croqui de Divisão dos Arranjos DC (*String*) dos Inversores



Fonte: O Autor, 2023

ANEXO II

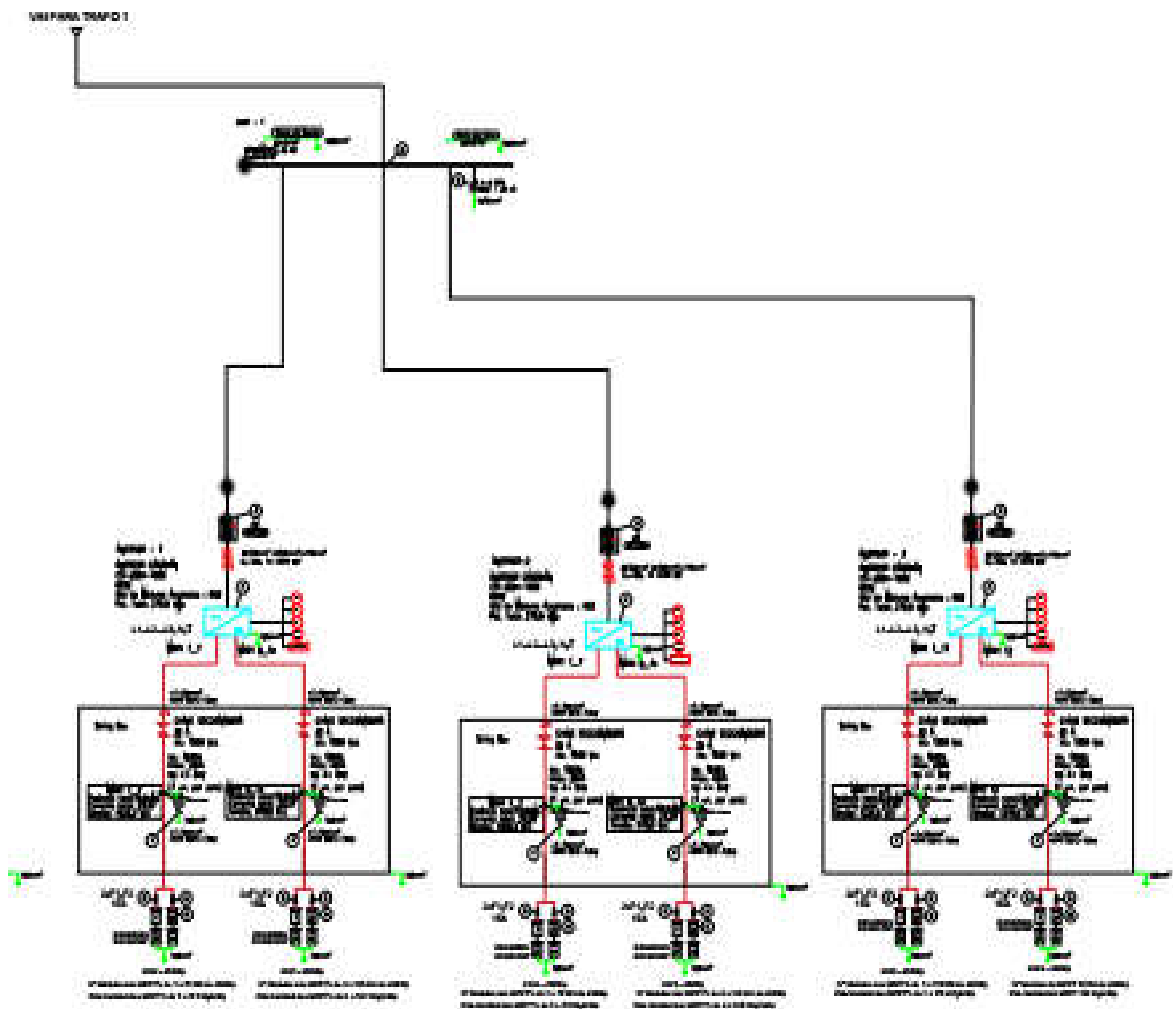
Diagrama Unifilar QBGT 2 dos Inversores



Fonte: O Autor, 2023

ANEXO III

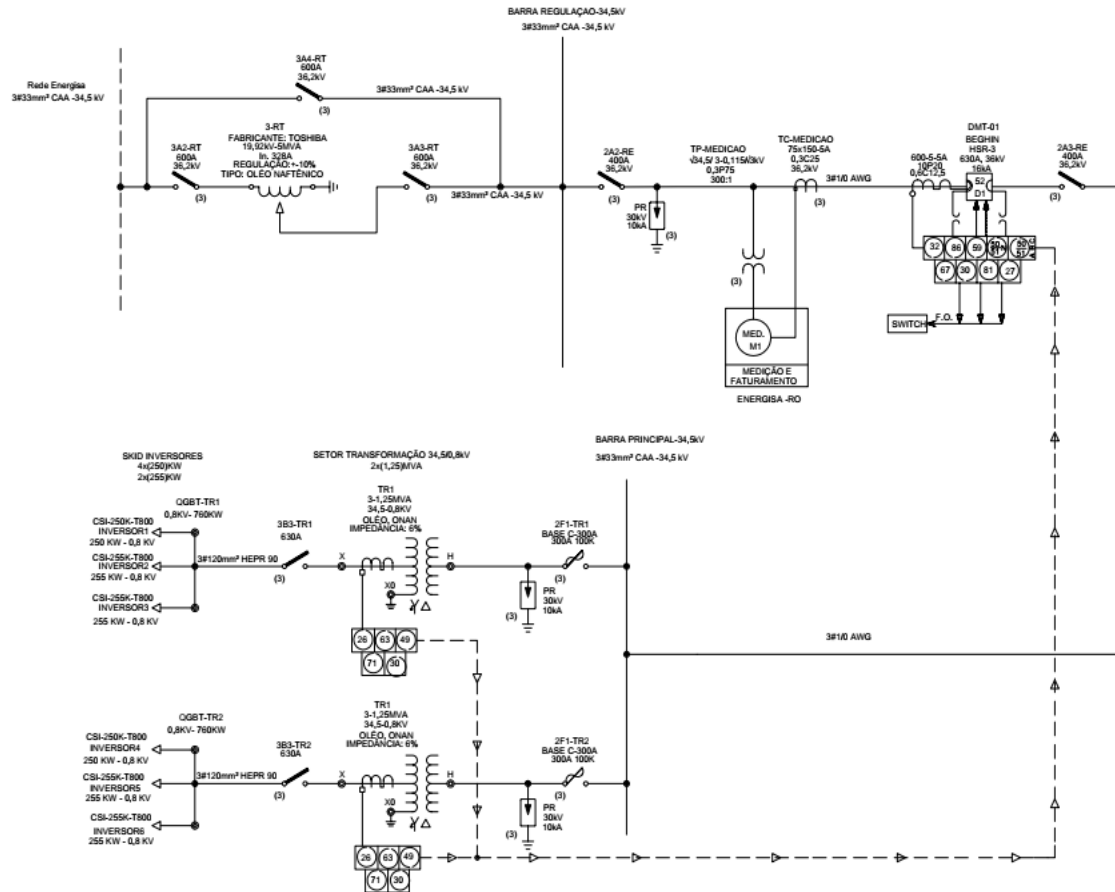
Diagrama Unifilar QBGT 1 dos Inversores



Fonte: O Autor, 2023.

ANEXO – IV

Diagrama Unifilar do BOS da UFV- RICAL Com o Regulador de Tensão



Fonte: O Autor, 2023.