

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM/RS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

CARLOS EDUARDO SALVI

**CONTROLE DE TENSÃO PRIMÁRIO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO RURAL
COM USO DE REGULADORES DE TENSÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ERECHIM-RS

2021

CARLOS EDUARDO SALVI

**CONTROLE DE TENSÃO PRIMÁRIO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO RURAL
COM USO DE REGULADORES DE TENSÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Campus de Erechim-RS.

Orientador: Prof. Me. Sérgio Bordignon

ERECHIM-RS

2021

CARLOS EDUARDO SALVI

**CONTROLE DE TENSÃO PRIMÁRIO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO RURAL
COM USO DE REGULADORES DE TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Campus de Erechim.

Erechim-RS, 10 de dezembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Sérgio Bordignon (Presidente/Orientador)

Uri – Campus de Erechim-RS.

Prof. Me. Anderson José Balbino (Examinador)

Uri – Campus de Erechim-RS

Prof. Dr. Cassio Luciano Baratieri (Examinador)

Uri – Campus de Erechim-RS

Dedico este trabalho a minha família que sempre acreditou no meu potencial, e me apoiaram para que eu alcançasse os meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, pela vida, pela sabedoria, por estar junto a mim e minha família todos os dias, e por ter me conduzido da melhor maneira a este sonho realizado.

Agradeço à minha família, que sempre esteve ao meu lado, sempre acreditaram no meu potencial, e me incentivaram em todos estes momentos para que eu alcançasse o meu objetivo.

Agradeço muito minha esposa e meu filho, que por muitas vezes não pude dar a atenção necessária em função dos meus estudos, mas que sempre me apoiaram e me deram forças da melhor maneira.

Agradeço a permissionária e aos meus colegas de trabalho por ter compartilhado de conhecimento e informações, que agreguei ao meu trabalho de conclusão de curso e ao longo desses anos.

Ao Prof. Me. Sérgio Bordignon, um muito obrigado pelos ensinamentos e dedicação para realização deste trabalho.

E por fim agradeço a todos os meus amigos e colegas de Faculdade que fizeram parte desta difícil jornada.

O sucesso não é um acidente. É trabalho duro, perseverança, aprendizagem, estudo e sacrifício.

(Edson Arantes do Nascimento)

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo realizar um estudo do controle de tensão primária, com o uso de reguladores de tensão em um alimentador de média tensão rural, com a finalidade de garantir que os níveis de tensão estejam em conformidade ao estabelecido pelo módulo 8 do PRODIST. Para a realização da análise foram obtidos junto a permissionária "X", dados e características referente ao alimentador usado no estudo de caso, tais como sua topologia, tipo de condutor, grandezas elétricas como tensão e potência. Os resultados gerados das análises e simulações, foram por meio de software, onde se fez possível verificar o comportamento dos níveis de tensão ao longo do trecho da rede. Constatou-se que alguns trechos deste alimentador estão em desacordo com os parâmetros estabelecidos pela ANEEL, se fazendo necessário melhorias e adequações ao longo da rede. Portanto, foram realizadas novas simulações e estudos de alternativas para solucionar este problema evidenciado, e garantir a qualidade da energia entregue aos seus consumidores em níveis de tensão adequados.

Palavras-chave: Reguladores de Tensão, Níveis de Tensão, Alimentador e Qualidade de Energia.

ABSTRACT

The present paper aimed to carry out a study of primary voltage control, using voltage regulators in a rural medium voltage feeder, in order to ensure that voltage levels comply with the provisions of module 8 of PRODIST. To carry out the analysis, data and characteristics related to the feeder used in the case study, such as its topology, type of conductor, electrical quantities such as voltage and power, were obtained from Company "X". The results generated from the analyzes and simulations were by means of software, which made it possible to verify the behavior of the voltage levels along the stretch of the network. Where it was found that some sections of this feeder are in disagreement with the parameters established by ANEEL, that which will be necessary improvements and adjustments along the network. Therefore, new simulations and studies of alternatives were carried out to solve this problem and to ensure the quality of energy delivered to its consumers at adequate voltage levels.

Keywords: Voltage Regulators, Voltage Levels, Feeder, Energy Quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema do sistema Elétrico de Potência - SEP	18
Figura 2 - Capacidade instalada e projeção de geração (2021/2025).....	19
Figura 3 - Sistema de Transmissão Brasileiro.....	20
Figura 4 - Subestação de Distribuição de Energia	22
Figura 5 - Rede de distribuição aérea convencional	23
Figura 6 - Rede de distribuição aérea compacta.....	24
Figura 7 - Rede de distribuição aérea isolada	25
Figura 8 - Sistema Radial Simples	27
Figura 9 - Sistema Radial com Recurso.....	27
Figura 10 - Diagrama unifilar do sistema em Anel na mesma barra aberto	28
Figura 11 - Disposição dos terminais na tampa do regulador	36
Figura 12 - Estrutura em poste para instalação de BRT 32 degraus.....	37
Figura 13 - Instalação de banco de Autobooster em estrutura simples de poste	38
Figura 14 - Esquema simplificado do controle do regulador de tensão.....	39
Figura 15- Ligação delta aberto de dois reguladores monofásicos em linha trifásica	40
Figura 16 - Esquema simplificado da ligação em delta aberto	40
Figura 17 - Diagrama fasorial de tensão da ligação em delta aberto	41
Figura 18 - Ligação delta de três reguladores monofásicos em linha trifásica	42
Figura 19 - Esquema simplificado da ligação em delta fechado.....	42
Figura 20 - Diagrama fasorial de tensão da ligação em delta fechado.....	43
Figura 21 - Ligação estrela de três reguladores monofásicos em linha trifásica com neutro solidamente aterrado.....	44
Figura 22 - Esquema simplificado da ligação em estrela aterrado	44
Figura 23 - Diagrama fasorial de tensão da ligação em estrela aterrado	45
Figura 24 - O circuito utilizado para fazer o estudo de caso	48
Figura 25 – Comportamento de carga do AL – Floriano Peixoto.....	49
Figura 26 - Circuito com o Regulador de Tensão em linha no sistema	51
Figura 27 – Local onde se encontra instalado o BRT 72,6 kVA	52
Figura 28 – Circuito sem o Regulador de Tensão em linha no sistema	52
Figura 29 - Gráfico em percentual dos níveis de Tensão.....	53
Figura 30 - Perfil de Tensão do AL - Floriano Peixoto.....	53

Figura 31 - Níveis de Tensão após o deslocamento do BRT.....	55
Figura 32 - BRT deslocado e instalação do segundo BRT	56
Figura 33 - Comportamento de carga do ramal onde será instalado o novo BRT.....	57
Figura 34 - Local proposto para instalação do novo BRT.....	57
Figura 35 - Local proposto para deslocar o BRT de 72,6 kVA.....	58
Figura 36 - Gráfico do perfil de Tensão com os dois BRT em linha no sistema.....	59
Figura 37 - Percentual de Carregamento dos BRT.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Extensão das Linhas de Transmissão no SIN, em Km	21
Tabela 2 - Tensões Nominais padronizadas entre 1 KV e 69 KV	32
Tabela 3 - Corrente Admissível – CAA	33
Tabela 4 - Corrente Admissível - CA	33
Tabela 5 - Corrente Admissível - CA	34
Tabela 6 - Correspondência entre nomenclatura de terminais AT ABNT e ANSI	35
Tabela 7 - Exemplos de Reguladores de Tensão Monofásicos (NBR 14724)	46

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
NOS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PU	Por Unidade
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de Aço
NBR	Norma Brasileira
SIN	Sistema Interligado Nacional
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
FECOERGS	Federação das Cooperativas do Rio Grande do Sul
BRT	Banco de Reguladores de Tensão
AL	Alimentador
ANSI	American National Standards Institute
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
LDC	Line-Drop Compensation
TP's	Transformadores de Potencial
TC's	Transformadores de Corrente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Estado da Arte	17
2.2 Setor Elétrico Brasileiro	18
2.3 Geração de Energia	19
2.4 Transmissão de Energia	20
2.5 Distribuição de Energia	21
2.5.1 Redes de Distribuição Aéreas	22
2.5.2 Redes de Distribuição Aérea Convencional	22
2.5.3 Redes de Distribuição Aérea Compacta.....	23
2.5.4 Redes de Distribuição Aérea Isolada	24
2.5.5 Redes de Distribuição Urbanas.....	25
2.5.6 Redes de Distribuição Rurais	25
2.6 Sistema dos Alimentadores de Distribuição de Energia Elétrica	26
2.6.1 Sistema Radial Simples.....	26
2.6.2 Sistema Radial com Recurso	27
2.6.3 Sistema Radial em Anel	28
2.7 Valores por unidade pu	29
2.8 Agência Nacional de Energia Elétrica - (ANEEL)	30
2.9 Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - (PRODIST)	30
2.9.1 Níveis de Qualidade de Energia.....	31
2.9.2 Níveis de Tensão	31
2.9.3 Critérios de Projeto em Níveis de Tensão da FECOERGS.....	32
2.10 Reguladores de Tensão	34
2.11 Identificação de terminais de Média Tensão	35
2.12 Tipos de Reguladores de Tensão	36
2.13 Principais componentes de um Regulador de Tensão	38
2.14 Possibilidades de conexão	39
2.14.1 Delta Aberto	39

2.14.2 Delta Fechado	42
2.14.3 Estrela Aterrado	44
3 METODOLOGIA.....	47
3.1 Estudo de Caso	47
3.2 Análise do comportamento de corrente de carga AL - Floriano Peixoto	48
3.3 Software usado para Simulações e Análises	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1 Alternativas de melhorias	54
4.1.1 Alternativa 01 - Regulador existente deslocado	54
4.1.2 Alternativa 02 - Instalação de mais um Banco de Reguladores de Tensão	55
4.2 Viabilidade Técnica e Econômica	60
5 CONCLUSÃO	61
5.1 Perspectivas Futuras	62
REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

O setor elétrico brasileiro passou por uma grande mudança nos últimos anos, se tratando principalmente da qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias e permissionárias de energia. Portanto, essa qualidade é fundamental e as empresas prestadoras de serviços devem buscar métodos para otimizar seus sistemas.

A ANEEL, através do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), que regulamenta o setor elétrico principalmente em seu Módulo 8, diz respeito a qualidade do produto e do serviço, especificando as conformidades dos níveis de tensão em regime permanente. Este módulo tem em vista o nível da qualidade e as condições técnicas dos alimentadores das distribuidoras. Diante dessa prerrogativa de qualidade, as empresas devem de forma adequada e eficiente, buscar através de métodos e estudos técnicos, a otimização da qualidade do produto. (MADRUGA, 2011).

Nos alimentadores rurais, por serem extensos, é comum concentrarem cargas em suas extremidades. Essas características construtivas e operacionais indesejáveis, não exime as distribuidoras de energia de manter os níveis de tensão dentro dos valores normatizados pelo órgão regulador. Assim sendo, deve-se garantir a qualidade da energia, com controle mais eficientes de reativos e de níveis de tensão. (MADRUGA, 2011).

Nessa perspectiva, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo sobre o controle de tensão primário de uma rede de distribuição rural com o uso de reguladores de tensão, através do método analítico descritivo.

Será abordado no início do trabalho, o Sistema Elétrico de Potência (SEP), que se refere a geração, transmissão e distribuição de energia até o consumo, com mais ênfase e estudo nas redes de distribuição de energia, alusivos ao referido trabalho, mostrando os tipos e seus principais componentes e características referentes a topologia. Também serão abordados, a respeito do órgão regulador, a (ANEEL) Agência Nacional de Energia Elétrica, juntamente com o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) Módulo -8, que trata sobre a qualidade da energia elétrica e seus níveis de tensão estabelecidos e normatizados. Seguindo será abordado, a caracterização, os esquemas de ligação, sua importância e o funcionamento dos Reguladores de Tensão, nos alimentadores de média tensão.

E por fim, o estudo de caso mostrando a topologia do alimentador usado para análise, juntamente com o banco de Reguladores de Tensão ligados a ele, as simulações e os gráficos gerados através do fluxo de potência via software SINAPgrid e o software USEALL, disponibilizados pela permissionária “X”, com suas referidas conclusões e comparações as normas estabelecidas pela ANEEL, bem como as expectativas futuras para normalização dos problemas evidenciados. Dessa maneira, colaborando para que se tenha um fornecimento de energia de qualidade aos seus consumidores.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar os Níveis de Tensão em Rede de Média Tensão Rural, e uso de Reguladores de Tensão com a finalidade de obter níveis adequados para os consumidores.

1.1.2 Objetivos específicos

- Apresentar os componentes que compõem o sistema de Distribuição de Energia em Média Tensão;
- Realizar simulações computacionais para analisar a situação atual quanto aos níveis de tensão em uma rede de distribuição em específico;
- Estudar metodologia de um estudo de caso para instalação de reguladores de tensão;
- Sistematizar a execução de estudos visando a regularização da rede a níveis desejados e normatizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A energia elétrica, desde o seu surgimento, vem exercendo um papel muito importante e fundamental para toda a sociedade com grande relevância devido ao aumento da demanda de seu uso para trabalhos do nosso dia a dia, do nosso bem-estar, conforto, tecnologia, nas indústrias e em nossas casas. Com isso, aumentou-se a dependência na utilização da energia elétrica, e conseqüentemente a ocorrência de possíveis falhas que podem surgir no sistema. (BLATT, 2016).

2.1 Estado da Arte

Nessa perspectiva, foram encontrados alguns autores que abordam o assunto estudado no presente trabalho, que contribuem com este estudo de caso.

Conforme Szuvovivski (2008), em seu trabalho de Alocação simultânea de bancos de capacitores e reguladores de tensão em sistemas de distribuição usando algoritmos genéticos e fluxo de potência ótimo, teve como objetivo implementar um algoritmo computacional para a alocação de banco de capacitores (BCs) e reguladores de tensão (RTs) em sistemas de distribuição, afins de minimizar as penalizações por violação de tensão, os custos de perda de potência ativa, das quedas de tensão e dos custos dos equipamentos alocados.

Em Pereira (2009), é apresentado um método de alocação de Reguladores de Tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica radiais. Seu trabalho teve como objetivos a melhoria do nível de tensão, minimizar os custos de investimento e as perdas de potência ativa. Seus métodos foram demonstrados em duas etapas que seria a seleção, instalação e ajustes dos *tap* dos RT; reduzir o número de RT inicialmente alocados, realocando-os até que seja obtido as melhores condições econômicas. Assim concluiu que, seu método apresentou uma melhora considerável no sistema de distribuição e uma eficiência nos resultados e nas possíveis soluções práticas.

Em seu trabalho, Blatt (2016) intitulado Proposta de instalação de regulador de tensão em uma rede de distribuição primária a partir da análise do perfil de tensão, realizou um estudo que propôs a instalação de reguladores de tensão afim de garantir que os níveis de tensão estejam em conformidade ao estabelecidos pela ANEEL, onde realizou medições ao longo de um alimentador que já possui dois bancos de reguladores, de forma a identificar as informações referentes as grandezas elétricas, assim se obteve análises do perfil de queda de tensão ao longo do trecho, concluindo que estes equipamentos conforme os cálculos de queda de tensão, estão bem alocados atendendo os níveis normativos .

Já Madrugá (2011), o trabalho apresenta a Otimização de níveis de Tensão nas redes de distribuição considerando a alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão, tem como objetivo o estudo ao longo dos alimentadores, essa alocação e ajustes desses equipamentos ao ponto ideal da instalação, afim de manter o perfil de tensão dentro dos níveis adequados de qualidade de energia. Foi usado ao

longo do trabalho um algoritmo com técnicas computacionais para otimizar os níveis de tensão no sistema de distribuição, assim obtendo o melhor custo benefício na alocação desses equipamentos.

Nessa perspectiva, Alves (2012) propôs a Alocação Ótima de Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Radiais usando uma Formulação Linear Inteira Mista, com o intuito de resolver o problema de alocação de reguladores de tensão ao longo dos alimentadores primários de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais, melhorando o perfil de tensão e minimizando as perdas de potência ativa e os custos de instalação dos RT's. A apresentação se deu em 4 capítulos, onde descreveu as equações e exibiu os resultados e a eficiência da técnica de solução proposta.

2.2 Setor Elétrico Brasileiro

O setor elétrico brasileiro é dividido em quatro segmentos: geração, transmissão, distribuição e consumo. A seguir, na figura 1, é possível observar o esquema do sistema elétrico de potência.

Figura 1 - Esquema do sistema Elétrico de Potência - SEP

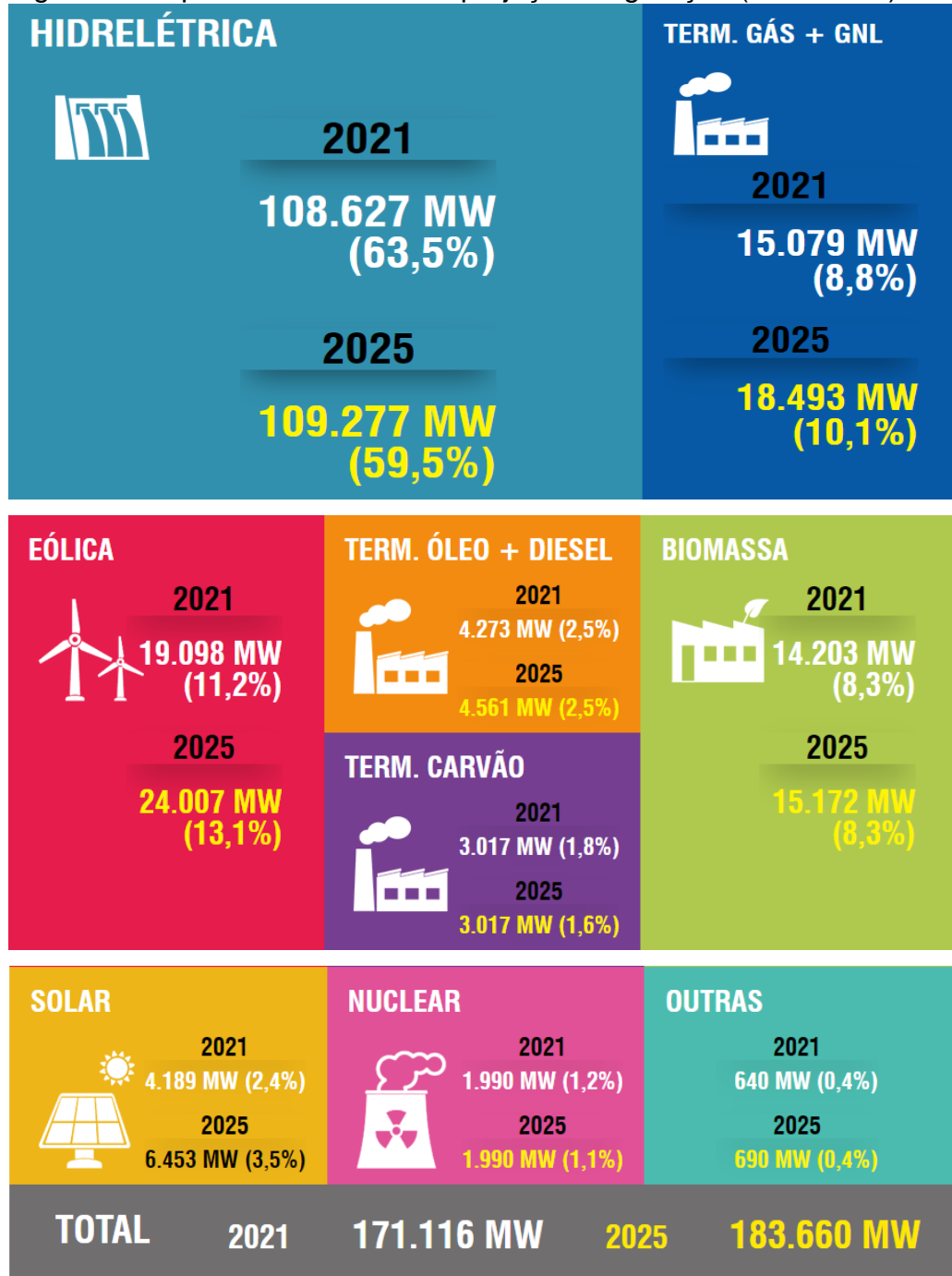


Fonte: (CAMPOS, 2019)

2.3 Geração de Energia

No que diz respeito a geração de energia, o sistema abrange diversos setores como as indústrias, o comércio e as residências em geral. Na figura 2 pode-se acompanhar a capacidade instalada em 2021 e as estimativas até 2025:

Figura 2 - Capacidade instalada e projeção de geração (2021/2025)



Fonte: (ONS, 2021)

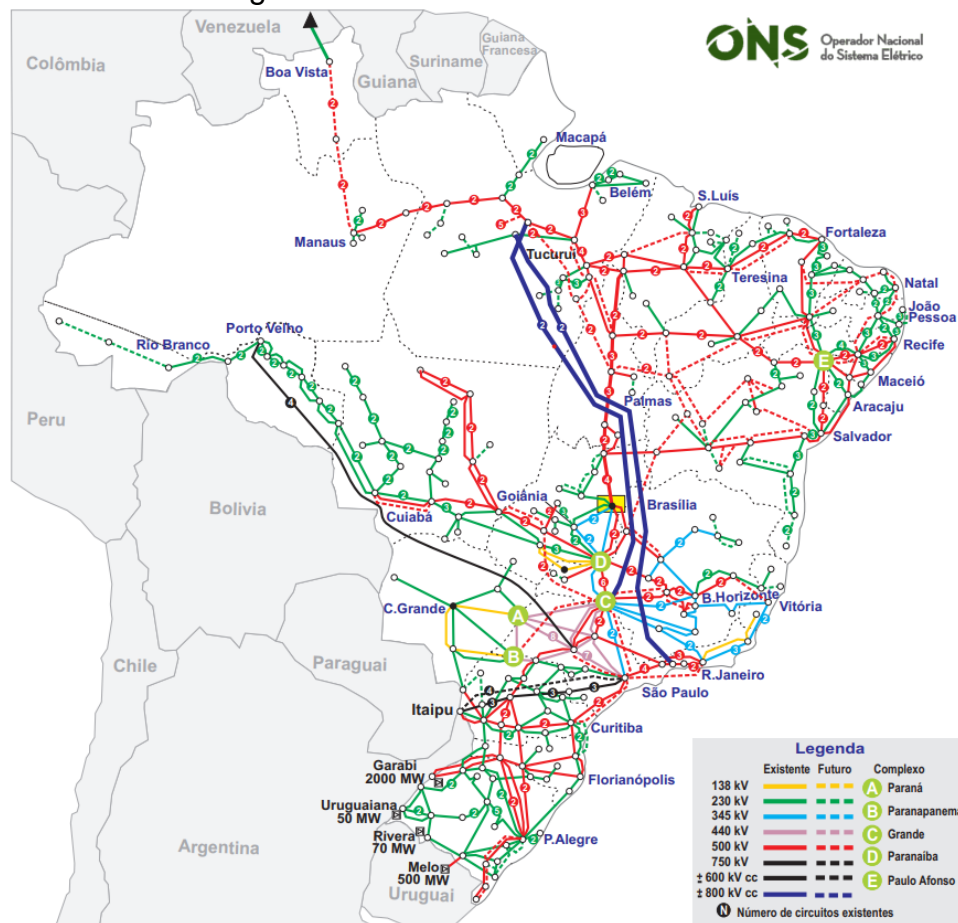
2.4 Transmissão de Energia

A Rede de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), com tensões de 138 kV a 750 kV, tem as funções de: transmissão de energia gerada pelas usinas para os grandes centros de carga, até as cidades, a integração entre os elementos do sistema elétrico para ter estabilidade e confiabilidade da rede, e ainda, a integração energética com países vizinhos.

No Brasil, existem aproximadamente 150 mil km de linhas de transmissão, na maior parte da transmissão derivada da energia em corrente alternada (CA), e uma parte significativa em linhas de corrente contínua (CC), que transportam altas tensões até as subestações para fazer o trabalho de rebaixar a tensão a níveis de tensão para as redes de distribuição.

Diante disso, na figura 3 acompanha-se a configuração do sistema de transmissão brasileiro. Através dela podemos verificar que o Sistema de Transmissão é todo interligado e possui vários níveis de tensão nominal.

Figura 3 - Sistema de Transmissão Brasileiro



Fonte: (ONS, 2021)

Em contrapartida, a tabela 1 exibe a extensão das linhas de transmissão no Brasil instaladas no sistema e suas extensões previstas até 2024 em Km.

Tabela 1 - Extensão das Linhas de Transmissão no SIN, em Km

	2019	2024	
	Linhas de Transmissão em Operação	Linhas de Transmissão Previstas	% no SIN
800 kV CC	9204 km	9204 km	5,07%
600 kV CC	9544 km	9544 km	5,26%
750 kV	1722 km	1722 km	0,95%
500 kV	51121 km	74558 km	41,07%
440 kV	6911 km	7130 km	3,93%
345 kV	9515 km	11031 km	6,08%
230 kV	53739 km	68339 km	37,65%
Total	141756 km	181528 km	

Fonte: (ONS, 2019)

2.5 Distribuição de Energia

A distribuição de energia se caracteriza como o segmento do setor elétrico dedicado ao rebaixamento da tensão elétrica proveniente do sistema de transmissão, a conexão de centrais geradoras e ao fornecimento de energia elétrica ao consumidor.

O sistema de distribuição de energia é composto pela rede elétrica e pelo conjunto de instalações e equipamento elétricos, conforme dados da ANEEL eles operam em níveis de alta tensão (superior a 69 kV e inferior a 230 kV), média tensão (superior a 1 kV e inferior a 69 kV) e baixa tensão (igual ou inferior a 1 kV).

O Brasil nos dias de hoje, possui 105 distribuidoras de energia elétrica, sendo 54 concessionárias, 38 permissionárias e 13 cooperativas de eletrificação rural, que atuam sob autorização do governo e estão em processo de regularização para serem fiscalizadas e normatizadas pela ANEEL. (ANEEL, 2021).

Nesse caso, a figura 4, ilustra uma subestação de Distribuição de Energia, onde recebem a energia em altas tensões e rebaixam em média tensão para serem distribuídas no sistema elétrico com a ajuda de transformadores de distribuição, até chegarem aos níveis adequados aos consumidores.

Figura 4 - Subestação de Distribuição de Energia



Fonte: (ALUGAGERA, 2019)

2.5.1 Redes de Distribuição Aéreas

As cidades e o meio rural, são constituídos em sua maioria por redes de distribuição aéreas em seus sistemas de distribuição de energia, por apresentarem de menor custos de construções, menor custo de manutenção, em relação a outros sistemas como os subterrâneos. Existem três tipos de redes: redes de distribuição aérea convencional, rede de distribuição aérea compacta e rede de distribuição aérea isolada.

2.5.2 Redes de Distribuição Aérea Convencional

Redes de distribuição aérea convencional, feitas e compostas por condutores nus; construídas em postes de madeira, postes de concreto do tipo duplo “T” ou circulares; isoladores; cruzetas; transformadores; equipamentos de proteção do sistema; chaves de manobra; para-raios; e os cabos são de alumínio, esses tipos de redes ficam desprotegidos contra influências do meio ambiente, como árvores, pássaros, chuvas e ventos, como ilustrada na figura 5.

Figura 5 - Rede de distribuição aérea convencional



Fonte: (ABRADEE, 2021)

2.5.3 Redes de Distribuição Aérea Compacta

A Rede de distribuição aérea compacta, feitas por cabos protegidos, surgiu como uma solução para que as concessionárias pudessem distribuir a energia com melhor nível de qualidade aos seus consumidores e maior confiabilidade ao sistema. Essa rede é formada por um conjunto de cabos de alumínio protegidos ou cobertos, fixados em estruturas de braços metálicos e espaçadores de fases feitos com material polimérico que sustentam os cabos por um cabo de aço usado como guia e servem também como neutro no sistema. A utilização deste tipo de rede, reduz consideravelmente os custos com manutenção, as falhas com interrupções de energia e a necessidade de podas de árvores além de fornecer uma compactação da configuração da rede.

Nessa prerrogativa, a figura 6 mostra uma rede de distribuição de média tensão aérea compacta, alocadas em postes de concreto do tipo cônicos.

Figura 6 - Rede de distribuição aérea compacta



Fonte: (BITTENCOURT, 2016)

2.5.4 Redes de Distribuição Aérea Isolada

As redes de distribuição aérea isolada, associadas a circuitos de média e baixa tensão, utilizam neste tipo de rede condutores isolados, blindados e trançados em torno de um cabo mensageiro (neutro) que faz a sustentação. Esses cabos são chamados de multiplexados, essas redes isoladas tem um custo muito elevado e são recomendados para projetos especiais onde apresenta este método como única solução. As redes isoladas têm como aspecto importante a redução com custos de manutenção, onde suas falhas são muito reduzidas. (RIBEIRO, 2008).

Nesse viés, na figura 7, pode-se observar a rede de distribuição aérea isolada, atribuídas na área rural em postes de concreto.

Figura 7 - Rede de distribuição aérea isolada



Fonte: (BITTENCOURT, 2016)

2.5.5 Redes de Distribuição Urbanas

Nas redes de distribuição urbana, de modo geral o neutro é interligado na malha terra da subestação, portanto, o neutro do transformador é solidamente aterrado. Esse sistema apresenta duas situações na rede de distribuição urbana: na primeira situação, quando se apresenta uma carga de densidade alta, com isso o sistema possui uma grande quantidade de alimentadores de pequena extensão.

Na segunda situação, quando se apresenta uma carga de densidade baixa, com isso o sistema possui poucos alimentadores de razoável extensão. Para que essa rede de distribuição entre em operação, independente da extensão ou da carga, é necessário a instalação de proteções em todos os trechos da rede. (LEME, CUNHA, et al., 2013).

2.5.6 Redes de Distribuição Rurais

As redes primárias de distribuição rural têm como configuração adotada a radial simples, procurando nessa configuração, projetar o seu eixo principal, o mais próximo possível do centro de carga. Os ramais monofásicos deste alimentador alcançam extensões por vezes muitos grandes, possibilitando o baixo custo de sua construção

por ser de modo simplificado, e reduz as atividades de operação e manutenção. O sistema utilizado nas redes de distribuição rural é o trifásico com neutro multiaterrado com ramais de derivações fase-neutro monofásicos. O sistema monofásico fase-neutro é usado por todas concessionárias de energia no Brasil, algumas concessionárias têm alimentadores rurais com sistema trifásico sem neutro, com enrolamentos estrela aterrado a partir do secundário de transformadores de potência, possibilitando um sistema fase-fase ou sistemas monofilares com retorno por terra, em transformadores monofásicos. (SILVA, 2006).

2.6 Sistema dos Alimentadores de Distribuição de Energia Elétrica

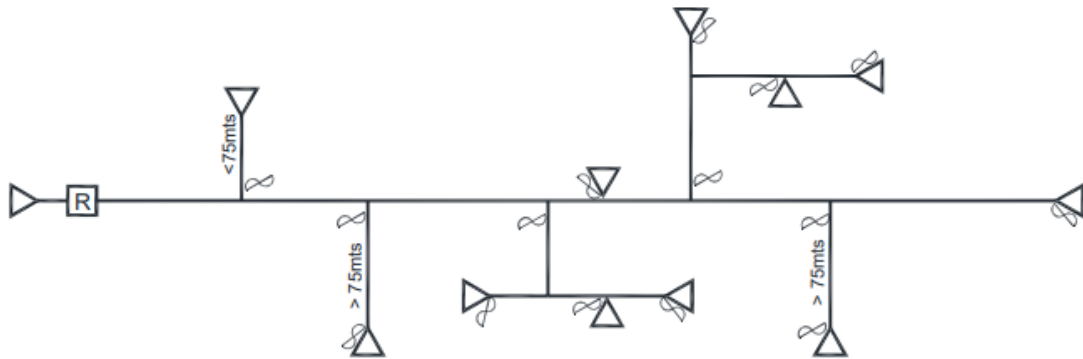
A configuração da rede aérea primária será definida conforme a confiabilidade a ser adotado em um projeto de rede de distribuição. O sistema radial simples, radial com recurso e radial em anel, serão apresentadas nessa seção mostrando suas características referentes a construção dos alimentadores de média tensão.

2.6.1 Sistema Radial Simples

No caso do Sistema Radial Simples, um sistema mais simples e de menor custo, sua alimentação é feita apenas por uma extremidade, geralmente mais utilizados em áreas de baixa densidade de carga, principalmente nas rurais onde os circuitos tomam direções distintas, onde a distribuição da carga tem suas próprias características, assim sendo inviável o estabelecimento de pontos de interligação, caracterizando pela existência de uma única fonte para cada parcela de carga. Sua desvantagem quando há um defeito no sistema, ele demanda de um maior tempo para restabelecer a energia, assim o circuito todo fica desligado ou pelo menos o trecho além do ponto da falha. (CABO, BLOCOS, *et al.*, 2000).

Conforme mostra a figura 8, a configuração do sistema radial simples e chaves fusíveis para proteção podem ser melhor compreendidas.

Figura 8 - Sistema Radial Simples



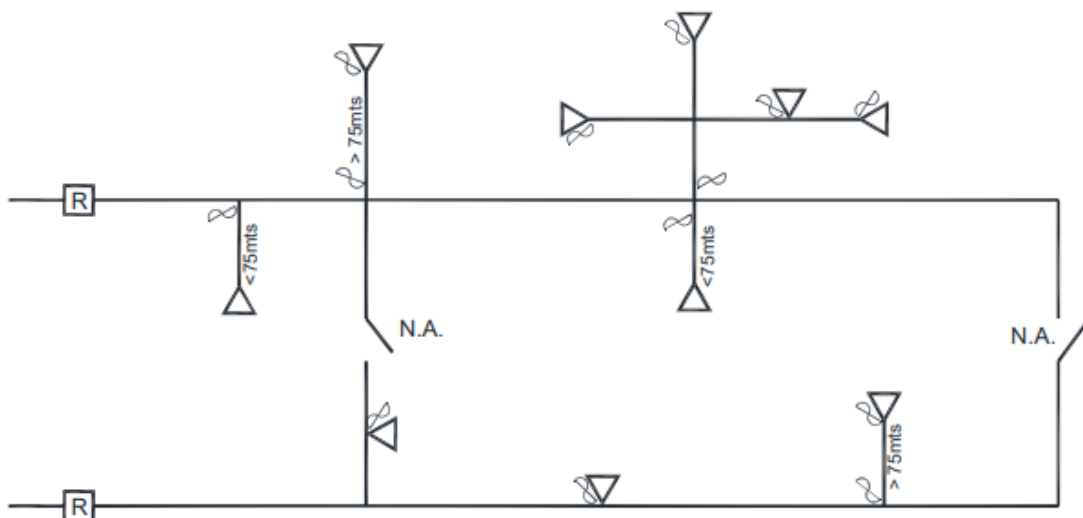
Fonte: (ELEKTRO REDES S.A., 2018)

2.6.2 Sistema Radial com Recurso

O sistema radial com recurso tem uma configuração de fácil operação e expansão, pode ser utilizado em locais com média densidade de carga e tem um desempenho regular para a continuidade do serviço. Ele oferece recurso extra para atendimento de carga, realizado pelo recurso de interligação de emergência, ele restabelece os ramais não afetados pelas interrupções, porém os trechos devem ser desenergizados para execução de manobras para serem transferidos para outro alimentador devido a configuração das fases. (MENGARDA, 2012).

Abaixo, na figura 9, pode-se observar a configuração do sistema radial com recurso e chaves fusíveis para proteção.

Figura 9 - Sistema Radial com Recurso

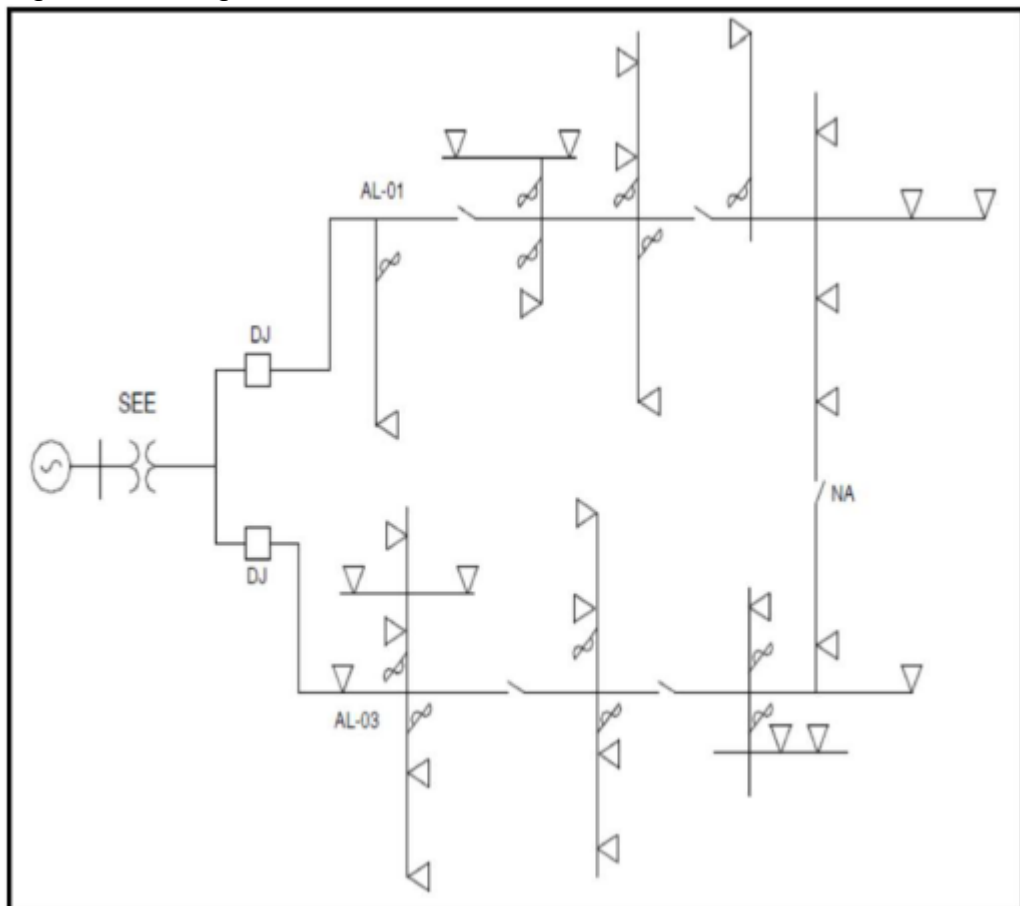


Fonte: (ELEKTRO REDES S.A., 2018)

2.6.3 Sistema Radial em Anel

O sistema radial em anel tem um custo mais elevado que o radial, por necessitar de mais equipamentos de manobra e proteção, maior bitola em seus condutores para trabalhar com folgas e permitir transferências de alimentação. Esse sistema permite a alimentação da rede ao seu consumidor por duas fontes alternativamente, podendo ser da mesma subestação (SE) ou de uma SE diferente, podendo ser operado em suas manobras de forma manual, com maior tempo de interrupção de energia e maior tempo na restauração do serviço, ou através de comando automático, que exige manutenção frequente e eleva o preço da instalação dos equipamentos. O diagrama de um sistema radial em anel é mostrado conforme a figura 10. (MENGARDA, 2012).

Figura 10 - Diagrama unifilar do sistema em Anel na mesma barra aberto.



Fonte: (BALOCH, 2017)

2.7 Valores por unidade pu

O uso dos chamados valores em pu que é a abreviatura de sistemas *por unidade*, é comum em cálculos de sistemas de potência, assim sendo uma forma de exprimir as grandezas elétricas de modo normalizado, a partir de valores já estabelecidos. Com as diferentes tensões de operação nos sistemas de potências, devido a presença de diferentes geradores e transformadores, o que torna o cálculo complexo. Desse modo, o uso da grandeza em pu ou em percentual se tornam mais simples. O valor pu é dado pela relação entre o valor real da grandeza e o valor de base. (PINTO, 2014).

As grandezas elétricas como tensão, corrente, impedância (resistência e reatância), potência ativa, reativa e aparente, podem ser obtidas unindo duas dessas grandezas. Essa base será desenvolvida pela seguinte equação (VIANA FILHO, 2010):

$$VALOR_{pu} = \frac{VALOR_{real}}{VALOR_{base}}$$

Os valores de base das grandezas por (SATO; FREITAS, 2015):

Os valores de base são grandezas escalares e geralmente convencionam-se:

- S_B – potência de base, em MVA;
- V_B – tensão de base, em kV;
- I_B – corrente de base, em A;
- Z_B – impedância de base, em Ω .

Usando como valores de base a potência e a tensão, compõem-se as seguintes fórmulas (SATO; FREITAS, 2015):

$$I_b = \frac{1000S_b}{\sqrt{3}V_b}$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b}$$

2.8 Agência Nacional de Energia elétrica - (ANEEL)

Os objetivos principais da ANEEL são de fiscalizar e regular a produção, transmissão, comercialização e distribuição de energia elétrica no Brasil, e ainda como atribuições de conceder, autorizar ou permitir instalações e serviços de energia elétrica. (CPFL SOLUÇÕES, 2021).

A ANEEL tem o papel de implementar políticas no setor, realizar leilões e concessões, fazer a gestão de contratos, estabelecer regras para o serviço de energia, criar metodologia para o cálculo de tarifas, fiscalizar o fornecimento da energia e mediar conflitos. (CPFL SOLUÇÕES, 2021).

A Resolução Nº 505 da ANEEL de novembro de 2001 (Revogada pela Resolução Normativa ANEEL nº 395 de 15.12.2009), define tanto os indicadores que quantificam a violação dos limites de tensão como os níveis de tensão de atendimento, entre outras coisas.

2.9 Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - (PRODIST)

A ANEEL então iniciou o processo de análise dos procedimentos da distribuição, o PRODIST, com o intuito de desenvolver um conjunto de documentos que disciplinasse para todos os aspectos técnicos relacionados ao sistema de distribuição de energia elétrica. Procedendo das diversas atividades da distribuição de energia elétrica, o PRODIST foi dividido em módulos, destacando aspectos de planejamento, operação, entre outros, o módulo 8, tratando da Qualidade da Energia Elétrica, que tem como tema a qualidade do produto e do serviço prestado. (PEREIRA, 2009).

Documentos elaborados pela ANEEL o PRODIST, normatiza e padroniza as atividades técnicas atribuídas ao desempenho e funcionamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica. (ANNEEL 2021).

O PRODIST é dividido em 11 Módulos:

- ✓ Módulo 1 – Introdução
- ✓ Módulo 2 – Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição

- ✓ Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição
- ✓ Módulo 4 – Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
- ✓ Módulo 5 – Sistemas de Medição
- ✓ Módulo 6 – Informações Requeridas e Obrigações
- ✓ Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição
- ✓ Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica
- ✓ Módulo 9 – Ressarcimento de Danos Elétricos
- ✓ Módulo 10 – Sistema de Informação Geográfica Regulatório
- ✓ Módulo 11 – Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares

No trabalho apresentado terá como objetivo o controle do nível de tensão, que está regulamentado pelo Módulo 8 do PRODIST – Qualidade de Energia.

2.9.1 Níveis de Qualidade de Energia

Especificamente aos níveis de tensão com relação ao atendimento, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL informou por intermédio da resolução normativa Nº 345/2008 de 31 de dezembro de 2008, que a Qualidade de Energia Elétrica - QEE seria determinada pelo Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8, onde o sistema elétrico deve atender os níveis de tensão preestabelecidos, estando sujeitos a fiscalizações e multas. (BLATT, 2016).

As concessionárias de energia devem operar no sistema de distribuição, dentro dos limites definidos pelo Módulo 8 do PRODIST, fazendo estudos técnicos afim de apresentar soluções econômicas e viáveis nos seus alimentadores, visando atender os problemas de níveis de tensão neles apresentados, este estudo técnico é indispensável devido a demanda não ser constante, sempre levando em conta ao longo do período a sua variação de carga. (SZUVOVIVSKI, 2008).

2.9.2 Níveis de Tensão

Uma das principais responsabilidades das distribuidoras de energia elétrica, é manter o fornecimento de energia com uma faixa de tensão adequada aos seus consumidores, com ações e investimentos para manter os níveis de tensão em regime adequados e estáveis. O setor elétrico nos últimos anos teve um grande crescimento, tendo a energia como um fator de extrema importância para as distribuidoras de

energia elétrica e seus consumidores, sendo assim os órgãos reguladores do sistema elétrico passaram a ter mais atenção com a qualidade de energia nos níveis de tensão.

Com esse crescimento no setor elétrico, os órgãos responsáveis passaram a se preocupar com o fornecimento contínuo e de boa qualidade aos consumidores, tendo em vista a necessidade de padronização e criação de normas, resoluções e procedimentos que mostram os padrões adequados para o setor elétrico. (PEREIRA, 2009).

Os níveis de tensão passaram com isso a ter definições em seus limites, com classificação como precários ou críticos, assim criando indicadores DRP e DRC, que mostram a duração relativa da transgressão precária e crítica, o tempo em que a tensão fornecida pode permanecer fora das faixas permitidas são definidos por esses indicadores. (BLATT, 2016).

Os valores permitidos, nos alimentadores de tensão para as variações de tensão em regime, são mostrados na tabela 2.

Tabela 2 - Tensões Nominais padronizadas entre 1 KV e 69 KV

Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão Contratada (TCO)
Adequada	$0,93.TCO \leq TL \leq 1,05.TCO$
Precária	$0,90.TCO \leq TL < 0,93.TCO$
Crítica	$TL < 0,90.TCO$ ou $TL > 1,05.TCO$

Fonte: (SZUVOVIVSKI, 2008)

Para projetos de construção de novas redes ou de melhorias, as concessionárias de distribuição de energia elétrica devem seguir, no mínimo, padrões estabelecidos pela ANEEL, sendo que a grande parte das concessionárias adotam também seus próprios critérios ou padrões de projetos, muitas vezes com normas internas mais rígidas até que as exigidas pelo órgão regulador. (BLATT, 2016).

2.9.3 Critérios de Projeto em Níveis de tensão da FECOERGS

A Federação das Cooperativas de Energia, Telefonia e Desenvolvimento Rural do Rio Grande do Sul (FECOERGS), adota como padrão de projeto em níveis de tensão, que a queda máxima da tensão na rede primária não pode ser superior a 7%,

valor que compreende o barramento da subestação e/ou o ponto de conexão com a distribuidora e o ponto mais desfavorável, onde se encontra o último consumidor primário ou o último transformador de distribuição.

A FECOERGS adotou para os seus cálculos, que é válido a todas as permissionárias, um fator de potência de 0,8 na rede primária. Nas redes projetadas, quando houver previsão de ampliação, a carga prevista na rede deve ser incluída no cálculo elétrico. (BLATT, 2016).

O carregamento do condutor não pode ser superior a 70% do limite térmico do cabo, a 40°C, para o cálculo de queda de tensão da rede primária.

A tabela 3 mostra a configuração dos cabos com a corrente admissível para o condutor nu – CAA com temperatura de 40°C.

Tabela 3 - Corrente Admissível – CAA

Bitola - AWG		Imáx - A
Condutor Nu	4	125
	2	160
	1/0	220
	2/0	250
	3/0	290
	4/0	330
	336,4 MCM	426

Fonte: (FECOERGS, 2014)

Na tabela abaixo observa-se a configuração dos cabos com a corrente admissível para o condutor nu – CA com temperatura de 40°C.

Tabela 4 - Corrente Admissível - CA

Bitola - AWG		Imáx - A
Condutor Nu	2	152
	1/0	203
	2/0	235
	3/0	271
	4/0	314
	336,4 MCM	419

Fonte: (FECOERGS, 2014)

Na rede primária com condutor coberto, para o cálculo de queda de tensão, o carregamento do condutor não pode ser superior a 70% do limite térmico do cabo, a 40°C.

A tabela 5 apresenta a configuração dos cabos com corrente admissível para o condutor coberto – CA.

Tabela 5 - Corrente Admissível - CA

Condutor Coberto	Classe de Tensão - 15 kV	
	Secção Nominal (mm ²)	Imáx - A
	35	187
	50	225
	70	282
	95	345
	120	401
	150	456
	185	525
	Classe de Tensão - 25 kV	
35	186	
50	224	
70	280	
95	342	
120	397	
150	450	
185	519	

Fonte: (FECOERGS, 2014)

2.10 Reguladores de Tensão

Os reguladores de tensão são instalados nos alimentadores para medir e corrigir as quedas de tensão das linhas de distribuição, provocadas pela corrente da carga sobre impedância própria de linha, assim minimizando os efeitos e melhorando os níveis de tensão, para uma melhor qualidade de energia aos consumidores.

O regulador de tensão RT é um equipamento usado em redes urbanas ou rurais, ele é um equipamento designado a manter o nível de tensão na rede de

distribuição, regulando a tensão em cada fase do alimentador, mantendo em valores pré-estabelecido dentro dos limites seguros de operação nos pontos de carga. Os reguladores de tensão RT são de muita utilidade para as empresas fornecedoras de energia, para que se obtenha uma boa qualidade na distribuição de energia elétrica. (BLATT, 2016).

Sabe-se que o aumento de 1% na tensão de um consumidor resulta num acréscimo de faturamento de cerca de 1,5% (ALVES, 2005). Desta forma, torna-se economicamente interessante para as concessionárias resolver os problemas de subtensão do sistema de distribuição de energia de forma contínua em todas as horas do dia e isto pode ser realizado com auxílio dos RTs. (SZUVOVIVSKI, 2008).

O regulador de tensão é um autotransformador em óleo isolante com enrolamento série do lado da fonte, equipado com comutador de derivação em carga que, em conjunto com o reator, possibilita 33 derivações, 16 para cima, 16 para baixo e a posição neutra. Ele regula a tensão de linha corrigindo desvios de até 10% com passos de $\pm 5\%$, $\pm 6,25\%$, $\pm 7,5\%$, $\pm 8,75\%$ e $\pm 10\%$ da tensão nominal. (PEREIRA, 2009).

2.11 Identificação de terminais de Média Tensão

Os terminais de média tensão de acordo com o padrão ABNT, são identificados conforme nomenclatura descrita na tabela 6.

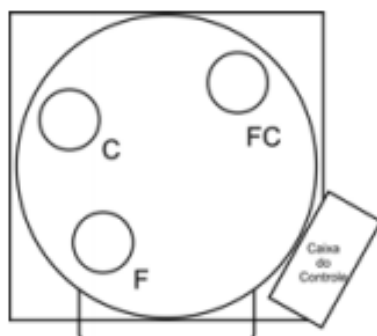
Tabela 6 - Correspondência entre nomenclatura de terminais AT ABNT e ANSI

TERMINAIS	NOMENCLATURA	
	ABNT	ANSI
FONTE	"F"	"S"
CARGA	"C"	"L"
NEUTRO	"FC"	"SL"

Fonte: (ITB- EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS, 2013)

O padrão ANSI de nomenclatura pode ser utilizado se for especificado, na tampa do regulador com pintura em baixo relevo. Na figura 11, ilustra a disposição dos terminais na tampa do regulador.

Figura 11 - Disposição dos terminais na tampa do regulador



Fonte: (ITB- EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS, 2013)

2.12 Tipos de Reguladores de Tensão

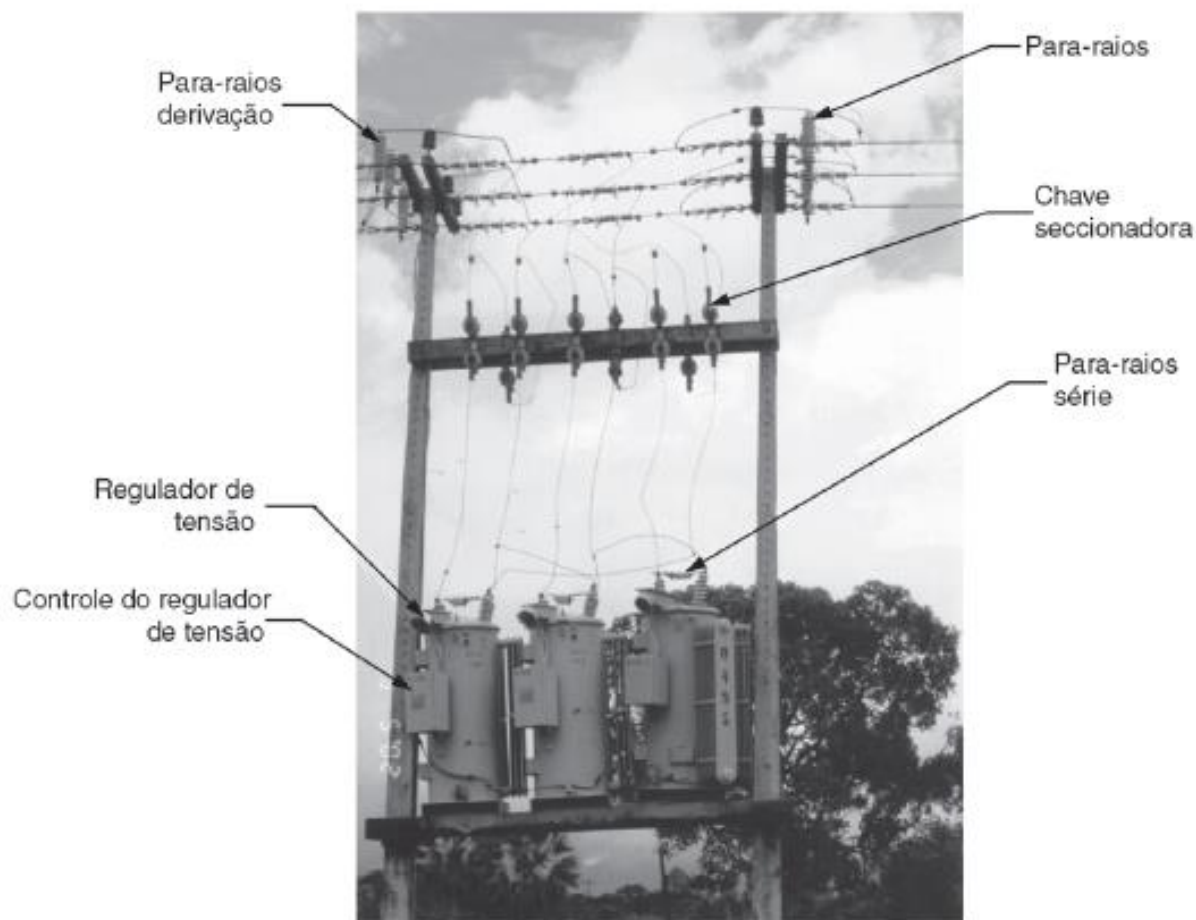
Segundo por Madruga (2011), as características referentes aos reguladores de tensão. Destacando os reguladores 32 degraus tipo B, como sendo os mais utilizados em sistemas de distribuição:

Basicamente existem três tipos de reguladores de tensão: Autobooster, Line-Drop Compensation – LSC e 32 degraus. Autobooster – são equipamentos mais simples, fabricados em unidades monofásicas com 4 degraus e para variação de tensão de $\pm 6\%$ e 10% . Line-Drop Compensation LDC – permite controlar a tensão em pontos remotos do alimentador, pontos estes localizados a jusante do ponto de instalação do LDC. 32 degraus – equipamentos que podem elevar ou reduzir a tensão do sistema. Existem dois tipos: A e B. O Tipo B pode regular $\pm 10\%$. O Tipo A pode regular $+9,1\%$ e $-11,1\%$. O regular de tensão mais utilizado em sistemas de distribuição é o 32 degraus, Tipo B. (MADRUGA, 2011).

Os reguladores de tensão de 32 degraus são geralmente utilizados em redes de distribuição rural de grandes extensões, em pontos do sistema para uma queda de tensão muito elevada, onde essa tensão em carga máxima alcance o limite inferior da faixa de variação de tensão estabelecida pela concessionária ou pela ANEEL. (MAMEDE FILHO, 2019).

Na figura 12 mostra a montagem dos reguladores de tensão de 32 degraus, que geralmente são instalados em postes de concreto armado ou madeira, em estrutura dupla.

Figura 12 - Estrutura em poste para instalação de banco de reguladores 32 degraus

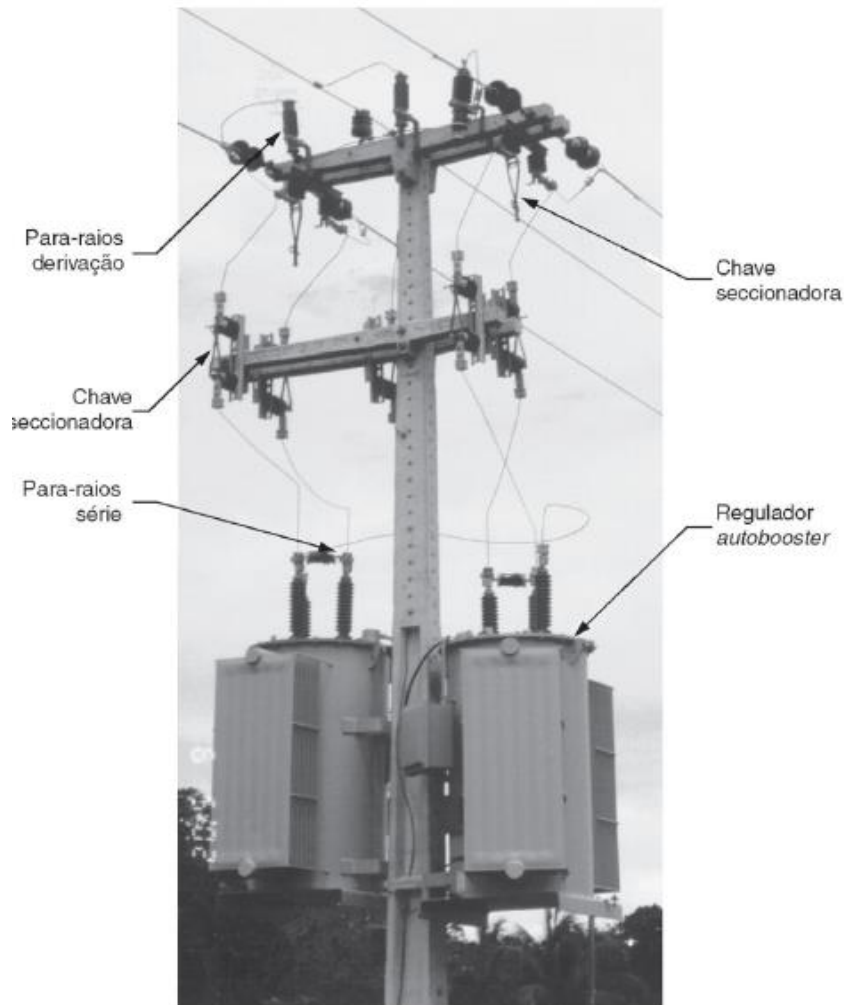


Fonte: (MAMEDE FILHO, 2019)

Os reguladores de tensão *Autobooster* são bastante utilizados em redes de distribuição rural, em lugares do sistema onde a baixa densidade de carga e alimentadores longos, fazendo com que ele compense a queda da tensão. Este tipo de equipamento interfere no nível de tensão somente num só sentido, ele é regulado para baixar a tensão (raramente usados), ou regulado para aumentar a tensão (mais utilizado). (MAMEDE FILHO, 2019).

A figura 13 compreende a instalação de um banco de reguladores *Autobooster*, onde sua montagem se faz em estrutura simples de poste de concreto armado.

Figura 13 - Instalação de banco de Auto booster em estrutura simples de poste



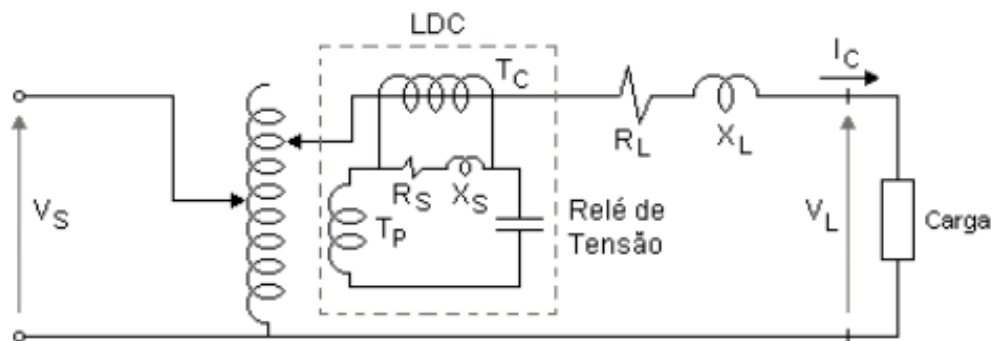
Fonte: (MAMEDE FILHO, 2019)

2.13 Principais componentes de um regulador de Tensão

- ✓ Chave reversora de polaridade;
- ✓ Controle Automático:
 - Ajuste do nível de tensão;
 - Compensador de Queda de Tensão – LDC (*Line Drop Compensator*);
 - Retardo de Tempo.

A figura 14 ilustra o esquema de controle do regulador de tensão, onde o relé de tensão acopla o compensador de queda de tensão (LDC), onde na rede elétrica se verifica as oscilações de corrente e tensão.

Figura 14 - Esquema simplificado do controle do regulador de tensão



Fonte: (PEREIRA, 2009)

V_S - tensão de entrada no regulador de tensão;

TP - Transformador de potencial;

TC - Transformador de corrente;

R_L , X_L - resistência e reatância da rede até o ponto de controle da tensão;

R_S , X_S - ajustes para a compensação de tensão resistiva e reativa;

I_C , V_L - a corrente e a tensão no ponto de controle da tensão (carga).

2.14 Possibilidades de conexão

O regulador pode trabalhar em circuitos monofásicos, bifásicos ou, em banco, nos circuitos trifásicos. No caso de circuitos trifásicos há possibilidade de três tipos de ligação:

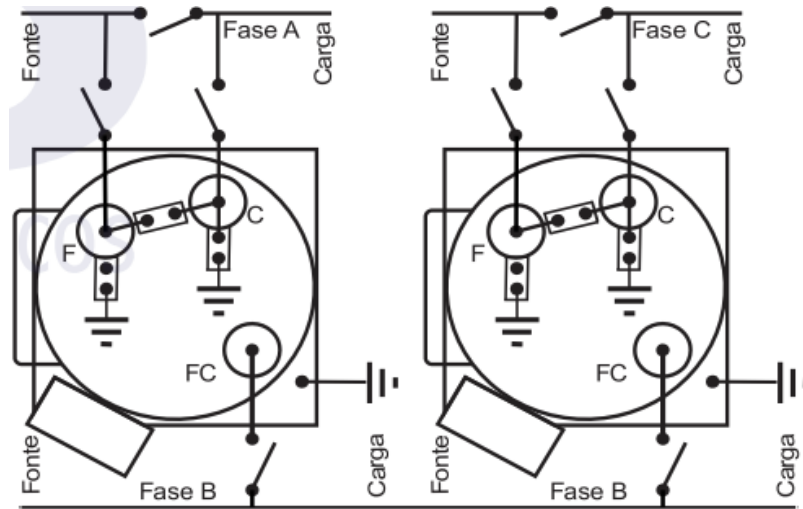
- Dois reguladores ligados em delta aberto;
- Três reguladores ligados em delta fechado;
- Três reguladores ligados em estrela aterrada.

2.14.1 Delta Aberto

Características:

- Ligação conforme figura 15;
- A corrente é medida apenas em 2 das 3 fases;
- Tensão nominal do regulador é igual à tensão nominal entre fases da rede;
- Regulação $\pm 10\%$ da tensão entre fase e neutro em sentido direto de fluxo de potência;
- Para uma carga puramente resistiva, a defasagem entre a corrente e a tensão medidas no regulador será -30° para um dos reguladores e $+30^\circ$ para o outro.

Figura 15 - Ligação delta aberto de dois reguladores monofásicos em linha trifásica



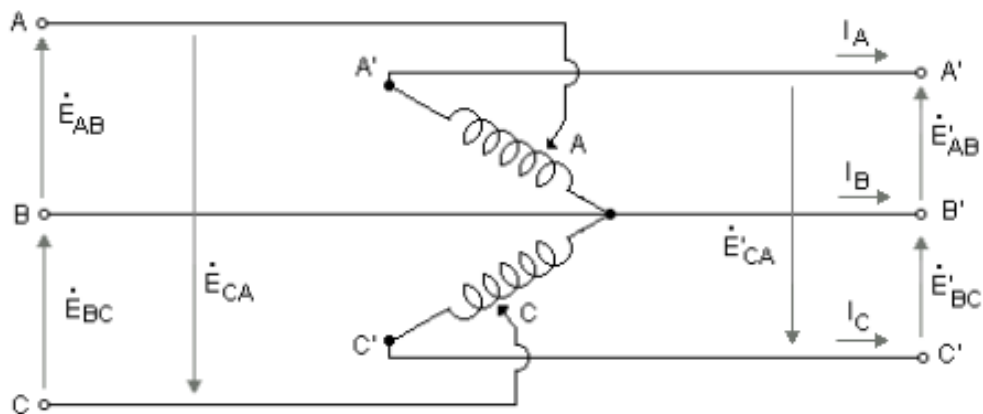
Fonte: (ITB- EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS, 2013)

Na figura 16, apresenta-se o esquema de ligação de dois reguladores de tensão monofásicos em delta aberto, onde tem-se:

$E_{AB}^{\circ}, E_{BC}^{\circ}, E_{CA}^{\circ}$ - tensão de entrada (linha) no regulador;

$E_{AB}^{\circ'}, E_{BC}^{\circ'}, E_{CA}^{\circ'}$ - tensão de saída (linha) do regulador.

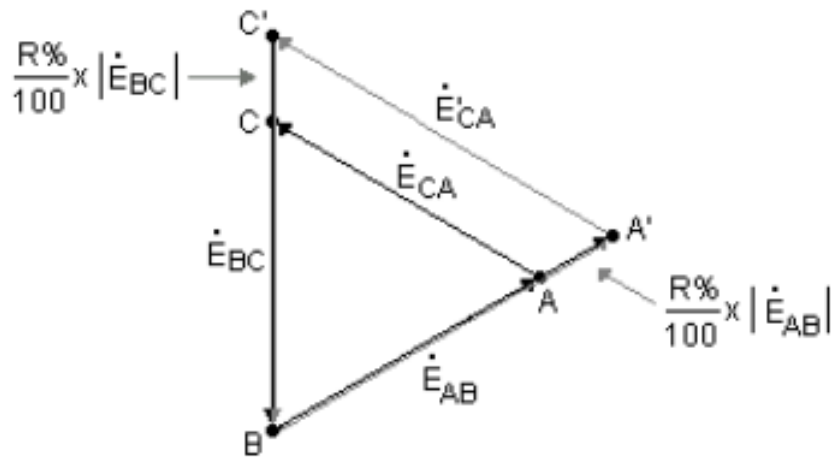
Figura 16 - Esquema simplificado da ligação em delta aberto



Fonte: (PEREIRA, 2009)

A figura 17 demonstra o diagrama fasorial de tensão dos reguladores monofásicos ligados em delta aberto.

Figura 17 - Diagrama fasorial de tensão da ligação em delta aberto



Fonte:(PEREIRA, 2009)

Em um aumento percentual das tensões EBC e EAB para EBC e EAB, causa um aumento de tensão ECA para ECA. Para obter o kVA suficiente de regulação, usando dois reguladores em delta aberto, devem ser tomados na seleção dos kVA nominais dos reguladores de tensão maiores cuidados. Assim a tensão de entrada do regulador é a tensão de linha e não a tensão de fase de dois reguladores que são ligados entre fases.

$$P_R^{1\phi} = \frac{R\%}{100} \cdot |\overset{\circ}{E}| \cdot |\overset{\circ}{I}| \quad (\text{kVA})$$

$|\overset{\circ}{E}|$ - tensão de linha nominal do sistema;

$|\overset{\circ}{I}|$ - corrente de linha;

$\sqrt{3} \cdot |\overset{\circ}{E}| \cdot |\overset{\circ}{I}|$ - potência do circuito (kVA).

$$P_R^{1\phi} = \frac{R\%}{100} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot |\overset{\circ}{E}| \cdot |\overset{\circ}{I}|}{\sqrt{3}} = \frac{R\%}{\sqrt{3} \cdot 100} \cdot kVA_{\text{circuito}}$$

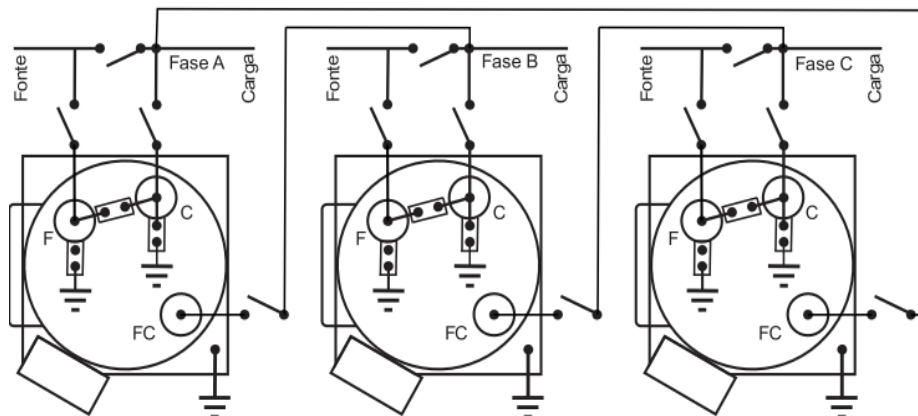
Ligados em delta aberto os reguladores monofásicos usam a faixa de $\pm 10\%$, o kVA nominal para cada unidade é igual o kVA do circuito trifásico dividido por $10 \cdot \sqrt{3}$. (PEREIRA, 2009).

2.14.2 Delta Fechado

Características:

- Ligação conforme figura 18;
- A corrente é medida nas 3 fases, contudo pode apresentar erro de até 5,35% em função da derivação feita no terminais " C " ou " L " para a referência de um dos demais reguladores do banco;
- Tensão nominal do regulador é igual à tensão nominal fase da rede;
- Regulação $\pm 15\%$ da tensão fase para operação em fluxo direto de potência;
- Para uma carga puramente resistiva, a defasagem entre a corrente e a tensão medidas no regulador será -30° para todos reguladores ou $+30^\circ$ para todos os reguladores.

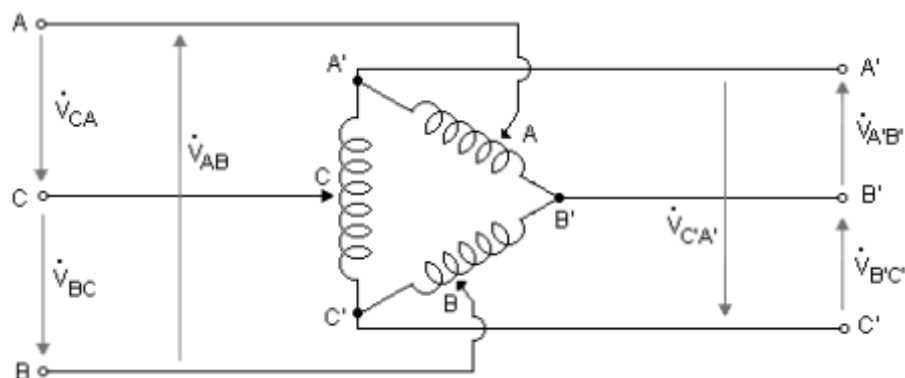
Figura 18 - Ligação delta de três reguladores monofásicos em linha trifásica



Fonte: (ITB- EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS, 2013)

Utilizando três reguladores monofásicos, a figura 19 ilustra o esquema de ligação em delta fechado, onde tem-se:

Figura 19 - Esquema simplificado da ligação em delta fechado



Fonte: (PEREIRA, 2009)

A regulação de 1,5 entre a faixa de regulação do banco e dos reguladores individuais, onde a razão 1,5 não é exata, sendo assim aproximada com menores faixas de regulação para os RT's, é ilustrada no diagrama fasorial da tensão da figura 20.

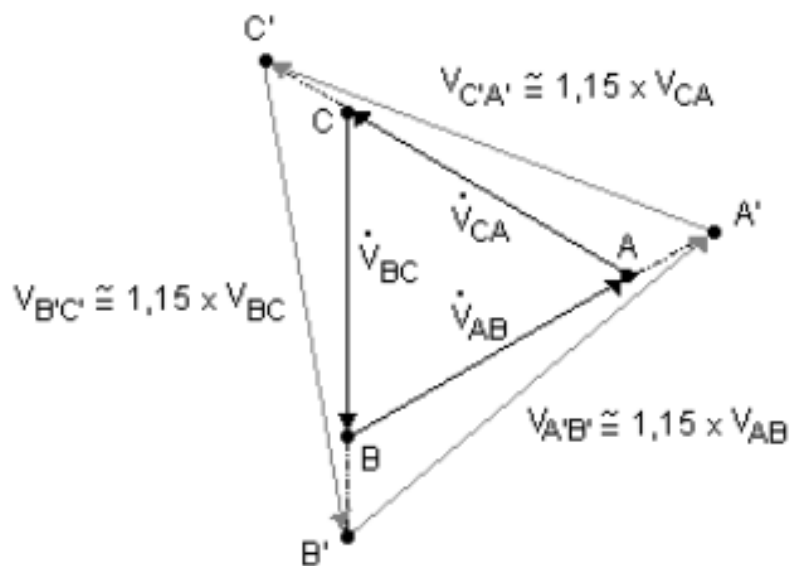
Em delta fechado a regulação R% do banco de reguladores é:

$$R\% = \frac{|\overset{\circ}{V}_{A'B'}| - |\overset{\circ}{V}_{AB}|}{|\overset{\circ}{V}_{AB}|} \cdot 100$$

Levando em consideração uma faixa de $\pm 10\%$ a regulação dos reguladores individuais, ligado em delta fechado a regulação R% será igual a:

$$R\% = \frac{1,15 \cdot |\overset{\circ}{V}_{AB}| - |\overset{\circ}{V}_{AB}|}{|\overset{\circ}{V}_{AB}|} \cdot 100 \Rightarrow R\% = 15\%$$

Figura 20 - Diagrama fasorial de tensão da ligação em delta fechado



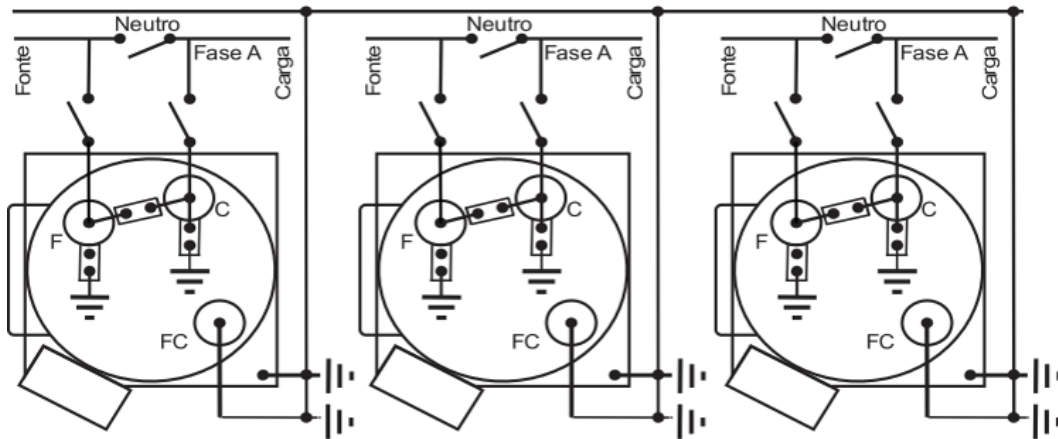
Fonte: (PEREIRA, 2009)

2.14.3 Estrela Aterrado

Características:

- Ligação conforme figura 21;
- Tensão nominal do regulador é igual à tensão nominal fase neutro da rede;
- Regulação efetiva $\pm 10\%$ da tensão entre fase e neutro em sentido direto de fluxo de potência;
- Para uma carga puramente resistiva, a defasagem entre a corrente e a tensão medidas no regulador será 0° (zero grau).

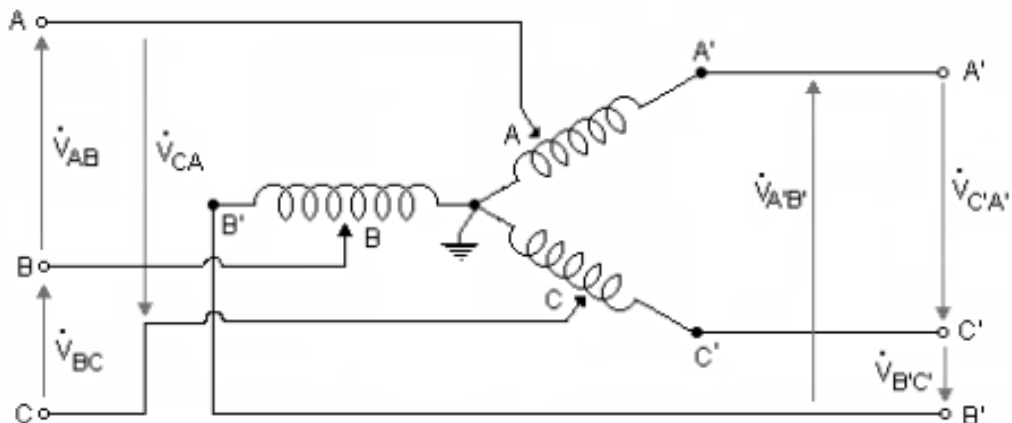
Figura 21 - Ligação estrela de três reguladores monofásicos em linha trifásica com neutro solidamente aterrado



Fonte: (ITB- EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS, 2013)

A figura 22, ilustra o esquema da ligação em estrela aterrado utilizando três reguladores monofásicos, onde tem-se:

Figura 22 - Esquema simplificado da ligação em estrela aterrado



Fonte: (PEREIRA, 2009)

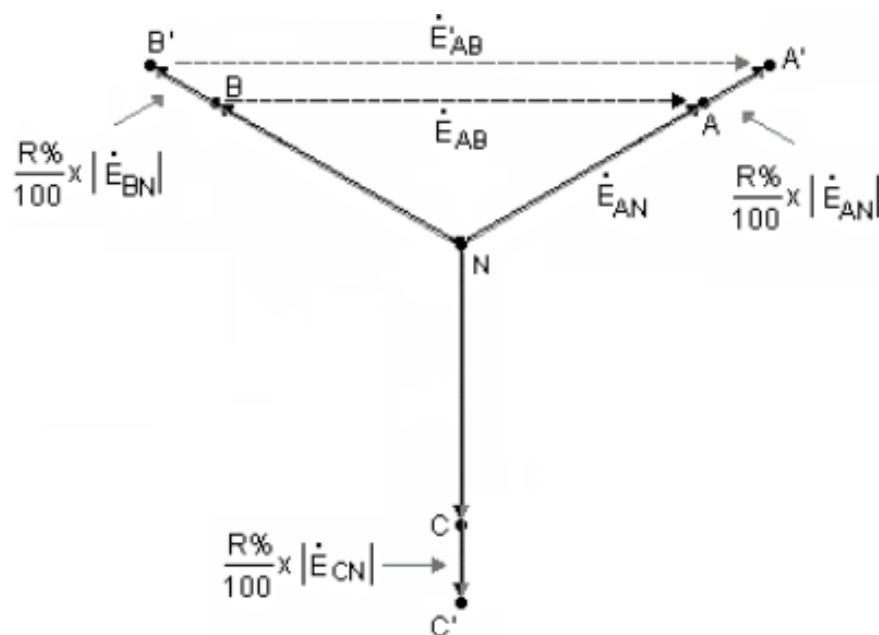
Na figura acima, tem-se:

$V_{AB}^o, V_{BC}^o, V_{CA}^o$ - tensão de entrada no regulador;

$V_{A'B'}^o, V_{B'C'}^o, V_{C'A'}^o$ - tensão de saída do regulador.

Observa-se na figura 23, que o aumento na regulação em uma fase ocasionada pelo regulador monofásico alocado nesta fase, aumentará a tensão de linha da rede.

Figura 23 - Diagrama fasorial de tensão da ligação em estrela aterrado



Fonte: (PEREIRA, 2009)

Para que se evite o excesso de comutações nos reguladores, utilizando banco de reguladores ligado em estrela aterrado, deverá se fazer necessário também, a fonte ser em estrela aterrado, assim a corrente de neutro ocasionada pelos possíveis desequilíbrios de carga do banco, seja deslocado para a terra, portanto, para a fonte. (PEREIRA, 2009).

Padronizado pela norma técnica, NBR 11809/1992 – “Regulador de Tensão” da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a tabela 7, mostra alguns exemplos de reguladores de tensão monofásicos, indicando suas características principais utilizadas para a seleção e instalação do RT na rede de distribuição. Na tabela 7 demonstra exemplos de Reguladores de tensão monofásicos.

Tabela 7 - Exemplos de Reguladores de Tensão Monofásicos (NBR 14724)

Tensão do regulador (V)	Tensão suportável nominal de impulso atmosférico pleno (kV)	Potência nominal (kVA)	Corrente de linha com faixa de regulação de $\pm 10\%$ (A)
7620	95	38,1	50
		57,2	75
		76,2	100
		114,3	150
		167	219
		250	328
		333	438
13800	95	69	50
		138	100
		207	150
		276	200
		414	300
14400	150	72	50
		144	100
		216	150
		288	200
		333	231
		432	300
19920	150	100	50
		200	100
		333	167
		400	201
23000	150	230	100
		460	200

Fonte: (PEREIRA, 2009)

3 METODOLOGIA

Na elaboração do presente trabalho o método utilizado foi o estudo de caso, que visou uma análise do controle de tensão com uso de reguladores de tensão em redes de distribuição de MT rurais, para uma melhor qualidade e níveis adequados de tensão na distribuição de energia seguindo os critérios normatizados pela Aneel.

Os dados correspondentes para realização desse estudo de caso, foram obtidos junto a Permissionário de distribuição de energia “X”, na qual realizaram-se análises de queda de tensão em um alimentador. Nesse caso, grande parte dos consumidores são rurais e junto a eles dois pequenos municípios com cargas comerciais e industriais, e demandam de consumo maiores em horários considerados de picos, das 17:00 horas às 21:00 horas, onde ocorrem nesse alimentador as maiores oscilações nos níveis de tensão, à níveis adequados, precários e críticos.

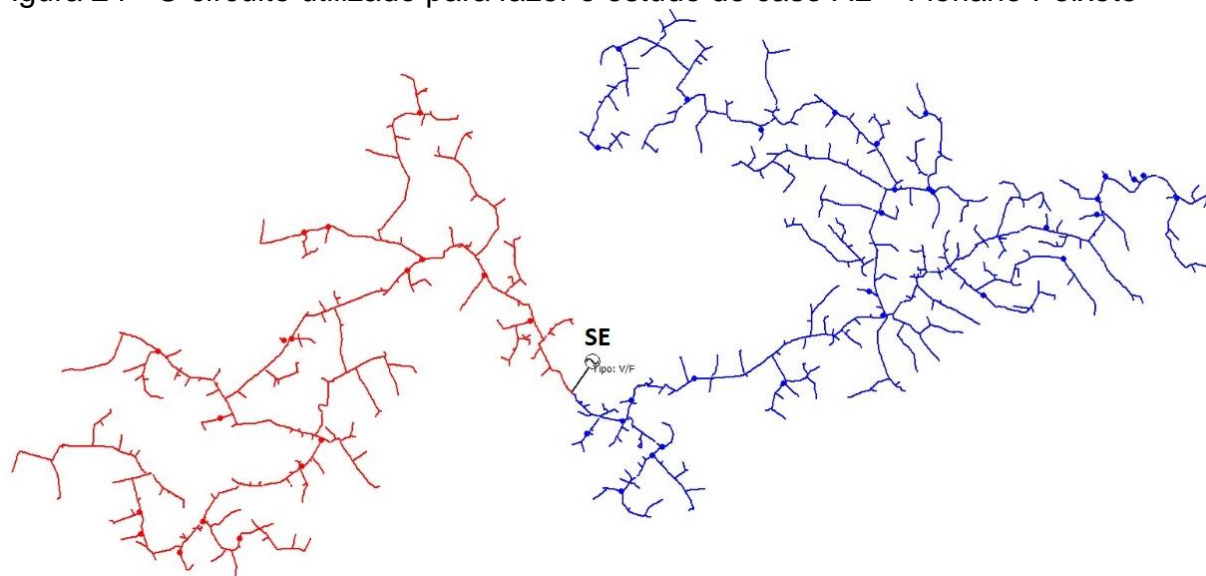
3.1 Estudo de Caso

A subestação com tensão de operação 13,8 KV que liga o alimentador usado para o estudo de caso, localiza-se na cidade de Estação-RS, nela está atribuído equipamentos como cabine de medição, com uso de Transformadores de Potencial (TP's) e Transformadores de Corrente (TC's) , chaves fusíveis, chaves facas para manobras, para-raios, banco de capacitores e religadores automáticos e telecomandados, ligados 01 equipamento para cada alimentador, num total de 03 alimentadores, AL-Ipiranga do Sul, AL-Floriano Peixoto e o AL-Renner.

O alimentador denomina-se AL-Floriano Peixoto, sua topologia é do tipo radial, com aproximadamente 312 quilômetros de extensão, com condutor de alumínio CAA 1/0 em sua troncal principal, e seus ramais distribuídos com condutores de alumínio CAA 02 e CAA 04, alimentando equipamentos transformadores trifásicos, bifásicos, monofásicos e 01 religador telecomandado em um de seus ramais. Nesse caso, o alimentador é atuante em áreas urbanas e rurais nos municípios de Estação, Getúlio Vargas, Floriano Peixoto, e somente em áreas rurais nos municípios de Erechim, Áurea, Centenário e Charrua, atendendo em torno de 1320 consumidores, sendo eles residenciais urbanos, comerciais, industriais, órgãos públicos, residenciais rurais, silos, aviários, irrigantes, produtores de leite entre outros. Essas características foram obtidas juntamente a Permissionária de distribuição de energia, também como as

medições e análises dos níveis de tensão, e a caracterização dos equipamentos do alimentador e do Regulador de Tensão. Nessa perspectiva, a figura 24 ilustra a subestação e seus alimentadores conectados a ela, com o AL-Floriano Peixoto em azul, distribuído a direita da subestação.

Figura 24 - O circuito utilizado para fazer o estudo de caso AL – Florianio Peixoto



Fonte: (USEALL – MIG, 2021)

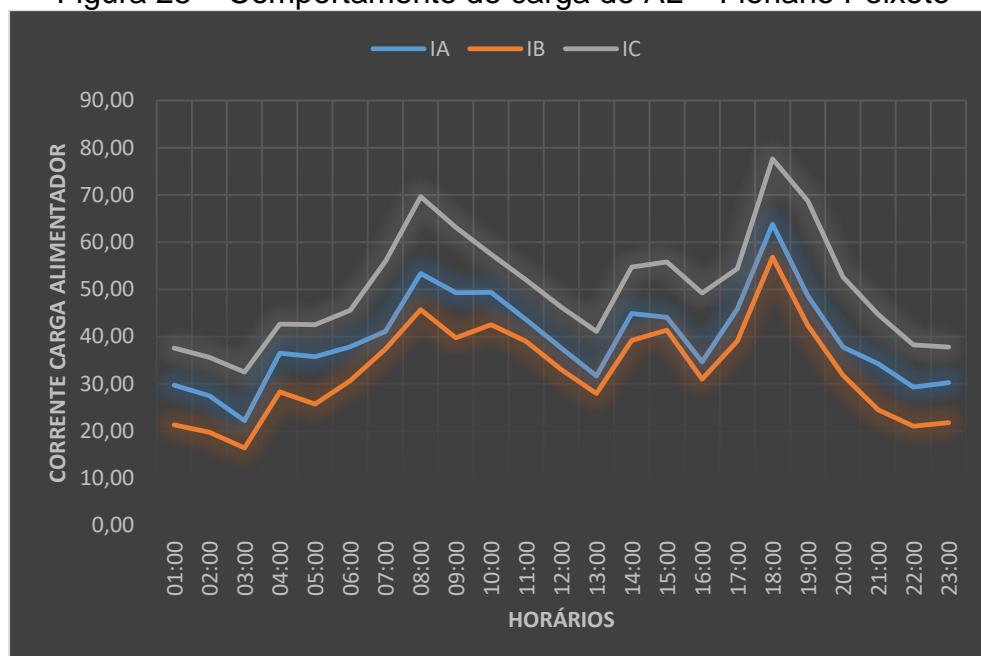
3.2 Análise do comportamento de corrente de carga AL- Florianio Peixoto

O gráfico na figura 25, apresenta o comportamento de corrente de carga no AL-Florianio Peixoto num período de um dia útil de semana, onde a carga deste alimentador tem um comportamento típico de uma rede rural, e grande parte dos consumidores têm suas atividades voltadas para a produção de leite, chiqueirões e aviários, onde se faz o uso de equipamentos, como motores de forrageiras, equipamentos de ordenha, refrigeração, tratadores, higienizadores, entre outros, esses equipamentos acabam sendo utilizados para suas atividades em dois períodos durante o dia, com maior carga na parte da manhã entre os horários de 6:30 horas as 9:30 horas, e na parte da tarde entre os horários de 17:00 horas as 21:00 horas.

A potência máxima medida no AL – Florianio Peixoto neste dia ficou em 3,26 MVA, e a potência mínima registrada em torno de 0,65 MVA. Esses valores de corrente e potência, foram obtidos pelo registrador de média tensão do Religador automático e telecomandado instalado junto à subestação alimentadora, este

equipamento além de ser usado para manobras e proteção na rede, mede grandezas elétricas como tensão, corrente e potência.

Figura 25 – Comportamento de carga do AL – Floriano Peixoto



Fonte: (Elaborado pelo autor)

3.3 Software usado para Simulações e Análises

As simulações referentes ao estudo de caso se deram pelo *software* chamado SINAPgrid, após o levantamento de todos os dados do alimentador usado no referido trabalho.

O *software* SINAPgrid é um produto desenvolvido pela empresa SINAPSIS, que atua em diversas frentes do mercado de energia e setores adjacentes, com soluções personalizadas de acordo com as necessidades de eficiência e rentabilidade, além de atender as exigências regulatórias do setor elétrico com áreas de atuação no planejamento, operação, engenharia e proteção, estudos regulatórios e inovação, qualidade de energia, automação, redes elétricas inteligentes (Smart Grid), mobilidade elétrica, redes subterrâneas, relacionamentos e engajamento com o cliente, gestão de ativos, geração distribuída e perdas técnicas e regulatórias.

O *software* SINAPgrid é uma plataforma para estudos de redes elétricas, que permite análises e simulações através de cálculos elétricos. A plataforma integra-se aos sistemas corporativos das empresas, criando um gêmeo digital da rede elétrica a partir do qual os usuários podem avaliar os impactos do aumento de demanda ou da

inclusão de um gerador, entre outras atividades. O programa conta com recursos que permitem sua utilização tanto na área de planejamento, como na de operação de sistemas de distribuição e de transmissão de energia elétrica. (Sinapsis,2021).

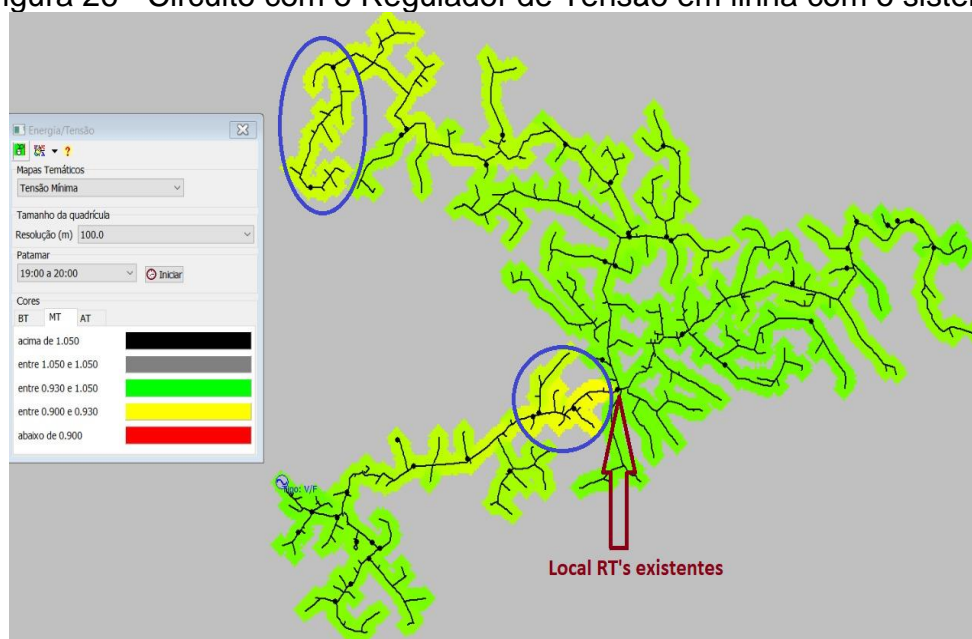
O SINAPgrid faz a modelagem e a análise das redes de distribuição de energia elétrica, para pontos de medição, monitoramento, controle, automação e geração presentes em qualquer nível de tensão, em uma única plataforma (Modelagem+Simulação+Análise).

O *software* executa o cálculo de fluxo de potência em redes com cargas equilibradas ou desequilibradas através de dois métodos, sendo eles o método de *Gauss* e o método de *Newton-Raphson*, usando os modelos de cargas definidos, sendo estes o de corrente constante, potência constante e impedância constante.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O circuito usado no estudo de caso é ilustrado na figura 26, onde encontra-se alocado um banco de Reguladores de Tensão 32 degraus trifásico em linha com o sistema. Após executarmos através do *software SINAPgrid* o fluxo de potência, o resultado da simulação indica que, alguns locais desse circuito usado para o estudo, encontram-se com níveis de tensão inadequados previstos pelo modulo 8 do PRODIST - ANEEL. Os locais em destaque, mostram-se com níveis de tensão considerados precários, entre 0,90 e 0,93 pu conforme já apontados na tabela 2, e também apresenta o local exato que se encontra instalado um banco de reguladores de tensão trifásico com potência nominal de 72,6 KVA e corrente de linha de 100 A, ligado em Estrela aterrado com faixa de regulação de $\pm 10\%$, onde nota-se a diferença dos níveis de tensão destacados em verde no circuito, após a correção realizadas pelos RT's.

Figura 26 - Circuito com o Regulador de Tensão em linha com o sistema



Fonte: (SINAPgrid)

A figura 27 ilustra o exato local onde se encontra instalado o Banco de Reguladores de Tensão de 72,6 kVA hoje ligado ao alimentador, na localidade da Linha Bassanesi próxima a cidade de Floriano Peixoto, às margens da rodovia que interliga a cidade ao município de Getúlio Vargas. O BRT está ligado a um local estratégico de fácil acesso as manutenções efetivas e preventivas dos equipamentos.

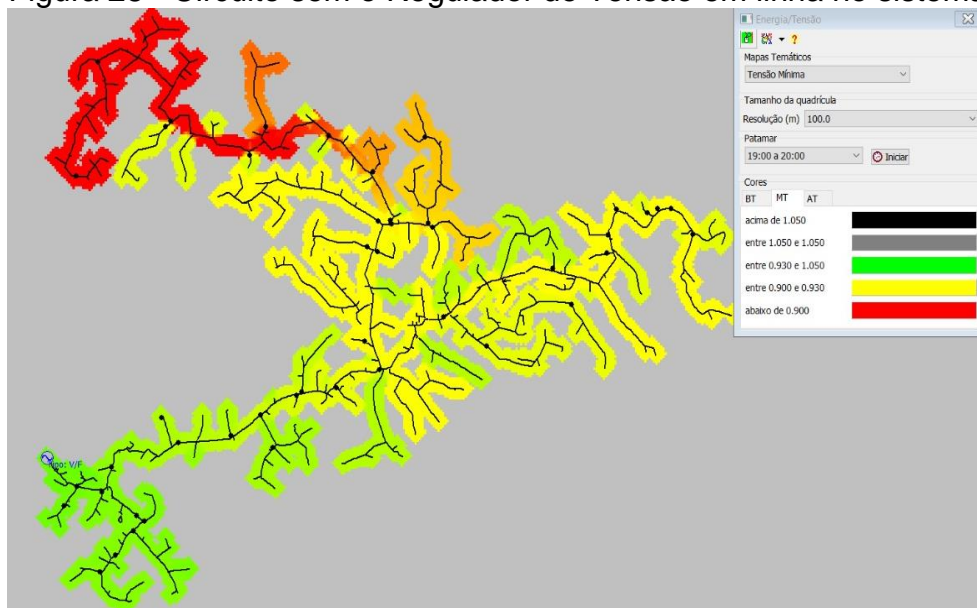
Figura 27 – Local onde se encontra instalado o BRT 72,6 kVA



Fonte: (Elaborado pelo Autor)

A seguir, na figura 28, observa-se como seria os níveis de tensão ao longo do alimentador, sem o banco de reguladores de tensão ligado no trecho. Diante disso, foi então executado o fluxo de potência novamente pelo software SINAPgrid, para efeitos de análises verificar onde se acentua os piores níveis de tensão nesse alimentador. Nessa nova análise, observou-se claramente onde se encontram ao longo do trecho, as piores situações de afundamento da tensão, chegando numa grande parte do alimentador a níveis precários e até mesmo a níveis críticos destacados em vermelho abaixo de 0,90 pu.

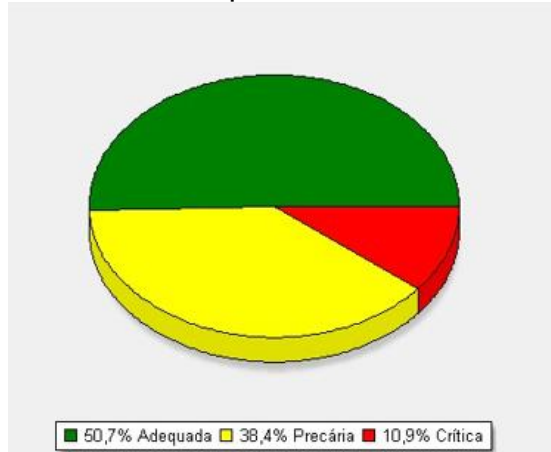
Figura 28 - Circuito sem o Regulador de Tensão em linha no sistema



Fonte: (SINAPgrid)

Na figura 29, o gráfico ilustra os níveis de tensão adequados, precários e críticos em percentual do alimentador, notando-se, que praticamente metade da rede de distribuição estaria em desacordo com a normas previstas no PRODIST, e que acarretaria a sanções impostas pelo órgão regulador trazendo problemas aos equipamentos dos consumidores ligados nestes locais.

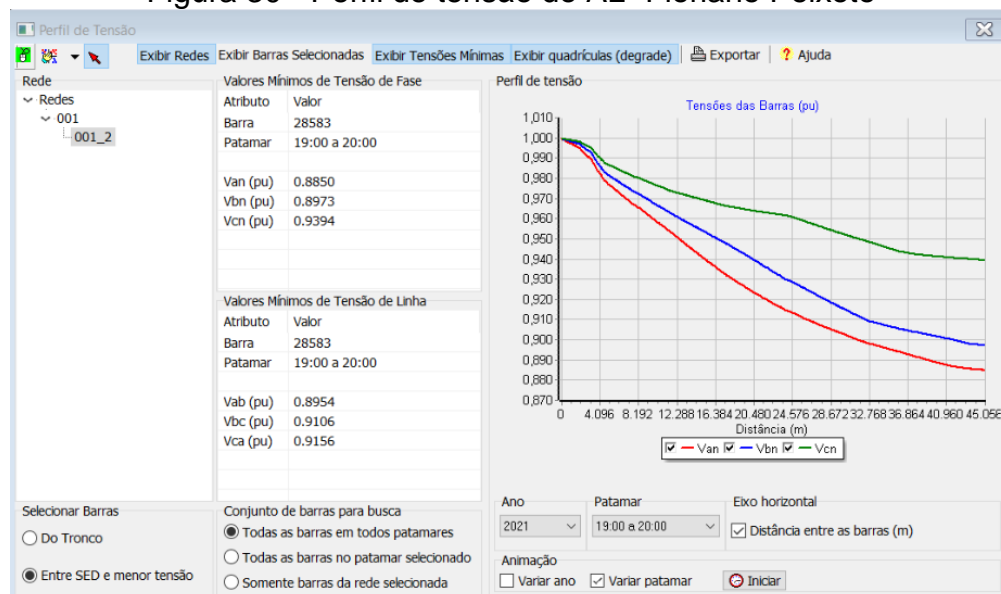
Figura 29 - Gráfico em percentual dos níveis de tensão



Fonte: (SINAPgrid)

Nesse sentido, a figura 30, demonstra o gráfico referente ao perfil de tensão por fase ao longo do alimentador com valores em “pu”. Foi referenciado como a pior situação, os horários entre 19:00 horas a 20:00 horas, onde nota-se as fases Vbn e Vcn em desequilíbrio de tensão no sistema, acentuadas para os níveis precários até 0,90 pu e críticos menor de 0,90 pu.

Figura 30 - Perfil de tensão do AL- Floriano Peixoto



Fonte: (SINAPgrid)

Para efeitos de estudo, agregado ao trabalho, é de suma importância esta análise, onde nota-se os exatos locais que ocorrem no alimentador os piores agravamentos nas tensões, devido a vários fatores, que pode ser o fato desses locais apresentarem maiores cargas, até mesmo a distância da subestação onde alimenta a rede, ou o condutor não supre a carga que alimenta esses consumidores, ocasionando este afundamento dos níveis de tensão e o desequilíbrio das fases.

4.1 Alternativas de melhorias

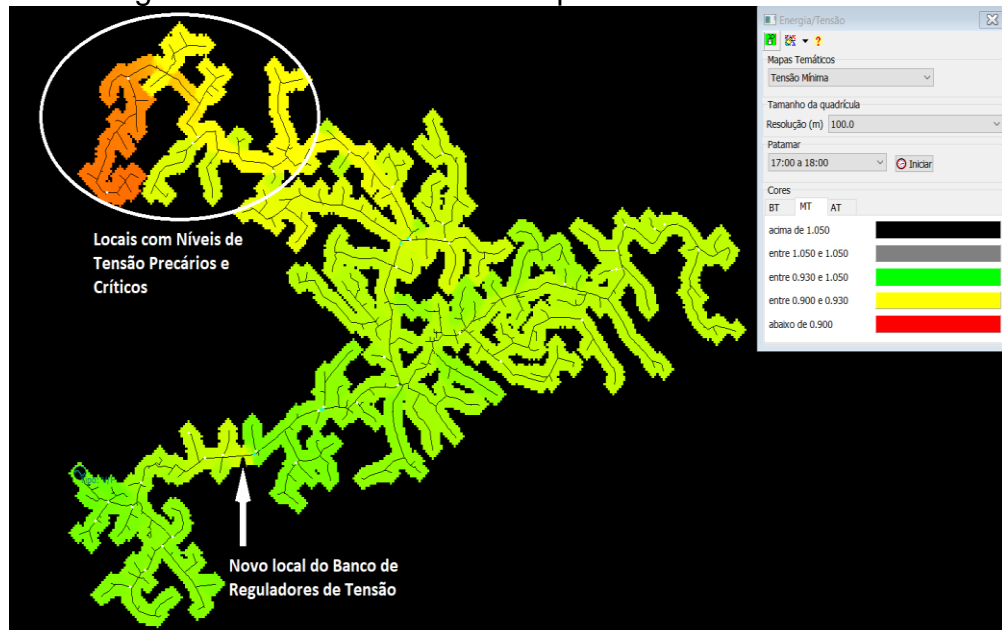
Após realizada a análise dos resultados obtidos com as simulações no software, foram estudadas alternativas para melhorar os índices de níveis de tensão, apresentadas a seguir.

4.1.1 Alternativa 01 – Regulador existente deslocado

Conforme ilustrado anteriormente na figura 26, o AL - Floriano Peixoto apresenta trechos em alguns horários, com níveis de tensão fora dos limites estabelecidos e padronizados no Módulo 8 do PRODIST.

Na figura 31, apresenta-se a primeira alternativa para regularizar este problema, onde foi deslocado o Banco de Reguladores de Tensão com potência de 72,6 KVA trifásico existente na rede. Este trecho é composto por um cabeamento 1/0 CAA, a esquerda onde se mostrava em destaque um dos trechos deste alimentador, com níveis precários de tensão abaixo de 0,93 pu até 0,90 pu, e mais próximo a 7100 metros da subestação que alimentado o AL – Floriano Peixoto. Foi simulado novamente o fluxo de potência com o software SINAPgrid, e houve a solução daquele primeiro trecho da rede aos níveis desejados, porém acabou agravando outro trecho do alimentador a níveis precários destacados em amarelo e a níveis críticos abaixo de 0,90 pu destacados em vermelho, onde anteriormente se encontrava a níveis precários. Se fazendo assim a necessidade de novas alternativas e estudo para normalizar a rede num total, e chegar aos níveis desejados.

Figura 31 - Níveis de Tensão após o deslocamento do BRT

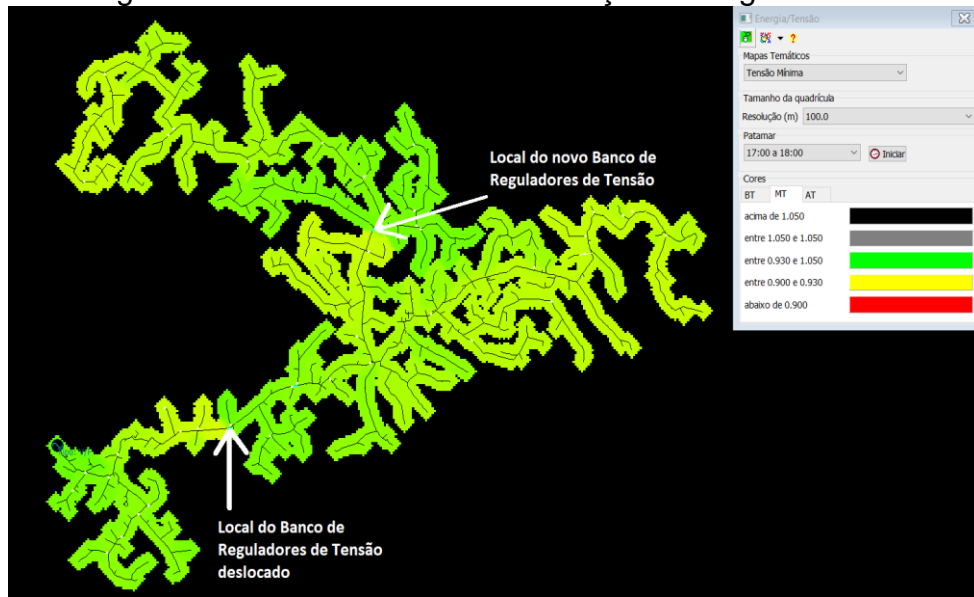


Fonte: (SINAPgrid)

4.1.2 Alternativa 02 – Instalação de mais um Banco de Reguladores de Tensão

Na alternativa 02, se manteve o deslocamento do Banco de Reguladores de Tensão com potência de 72,6 kVA trifásico apresentado na alternativa 01, e se instalou ao longo do alimentador que é composto neste trecho com cabeamento 04 CAA, mais um Banco de Reguladores de Tensão trifásico 32 degraus, com potência de 38,1 kVA e corrente de linha de 50 A, ligado também em Estrela aterrado com seus locais indicados conforme mostra a figura 32, e a 14800 metros do BRT de maior potência. Foi então simulado novamente o fluxo de potência através do software SINAPgrid, onde nota-se que esta alternativa soluciona o problema apresentado anteriormente ao longo deste trabalho, chegando aos níveis desejáveis de tensão destacados em verde entre 0,93 pu e 1,05 pu considerados adequados, assim atendendo o que está previsto pela norma e entregando aos seus consumidores um perfil de energia de qualidade.

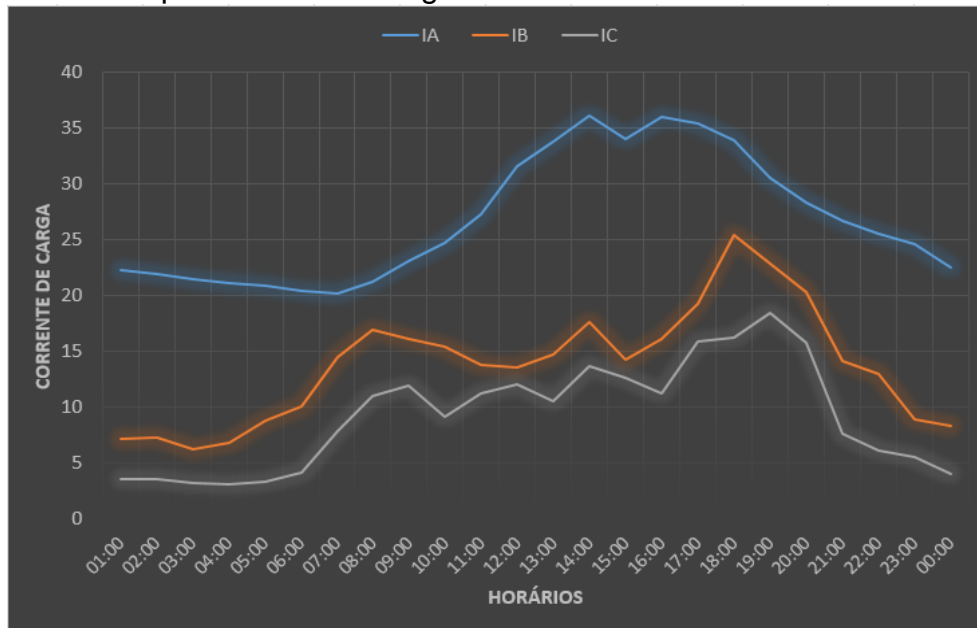
Figura 32 - BRT deslocado e instalação do segundo BRT



Fonte: (SINAPgrid)

O gráfico da figura 33, mostra o comportamento de carga do ramal onde será instalado o novo BRT trifásico de 38,1 kVA. Esses valores de corrente foram obtidos pelo religador automático que se encontra instalado no ramal que deriva o trecho que será instalado o novo BRT, em um dia útil de semana num período de 24 horas de análise, onde nota-se a fase A mais sobrecarregada que as fases B e C, afetando diretamente o equilíbrio dos níveis de tensão neste trecho do alimentador, onde há um número grande de consumidores produtores de leite, silos de armazenamento de grãos e aviários, que utilizam equipamentos como motores, termômetros, aquecedores, equipamentos de precisão, sistemas eletrônicos, sistemas de proteção, entre outros, que necessitam qualidade aos níveis de tensão, se fazendo assim de suma importância a instalação de um BRT, para que se faça o reequilíbrio aos níveis desejados, e que não acabe acarretando em grandes problemas nos equipamentos desses consumidores, gerando à permissionária os chamados de reclamações e indenização por queima dos mesmos.

Figura 33: Comportamento de carga do ramal onde será instalado o novo BRT



Fonte: (Elaborado pelo Autor)

A figura 34 ilustra o local proposto para instalação do novo Banco de Reguladores de Tensão 38,1 KVA, na localidade de Lajeado Pavão município de Floriano Peixoto, em um local próximo a estrada de fácil acesso a instalação e futuras manutenção nos equipamentos.

Figura 34 – Local proposto para instalação do novo BRT



Fonte: (Elaborado pelo Autor)

Sendo assim, na figura 35, observa-se o local proposto para o deslocamento do Banco de Reguladores de Tensão 72,6 kVA que estava instalado na Linha Bassanesi, para o novo local na Linha Sogearme próximo ao município de Getúlio Vargas, às margens da rodovia que interliga com o município de Floriano Peixoto, num local de fácil acesso para instalação dos equipamentos e suas devidas manutenções.

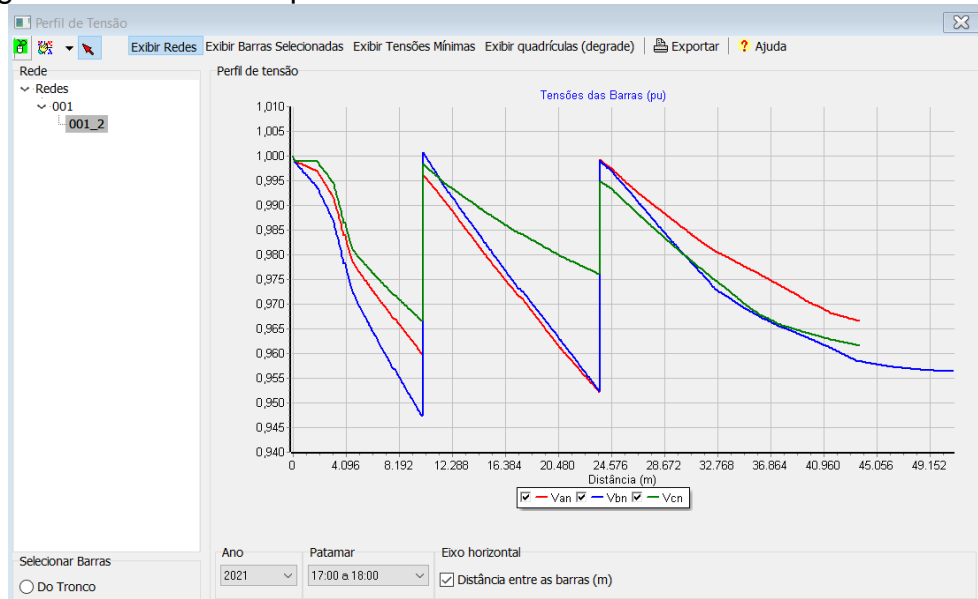
Figura 35 – Local proposto para deslocar o BRT de 72,6 kVA



Fonte: (Elaborado pelo Autor)

Na figura 36, observa-se o comportamento dos níveis de tensão com valores em “pu” ao longo do alimentador, com os dois Bancos de Reguladores de Tensão em linha no sistema. Após a realização da alternativa 02 sugerida que previa o deslocamento do Banco de Reguladores de Tensão existente, e a implantação de mais um Banco de Reguladores de Tensão, para a normalização aos níveis desejados no alimentador, nota-se que o perfil de tensão nesta alternativa atende a norma prevista no Módulo 8 - PRODIST, estando dentro dos valores considerados adequados entre 0,93 pu e 1,05 pu em todos os momentos.

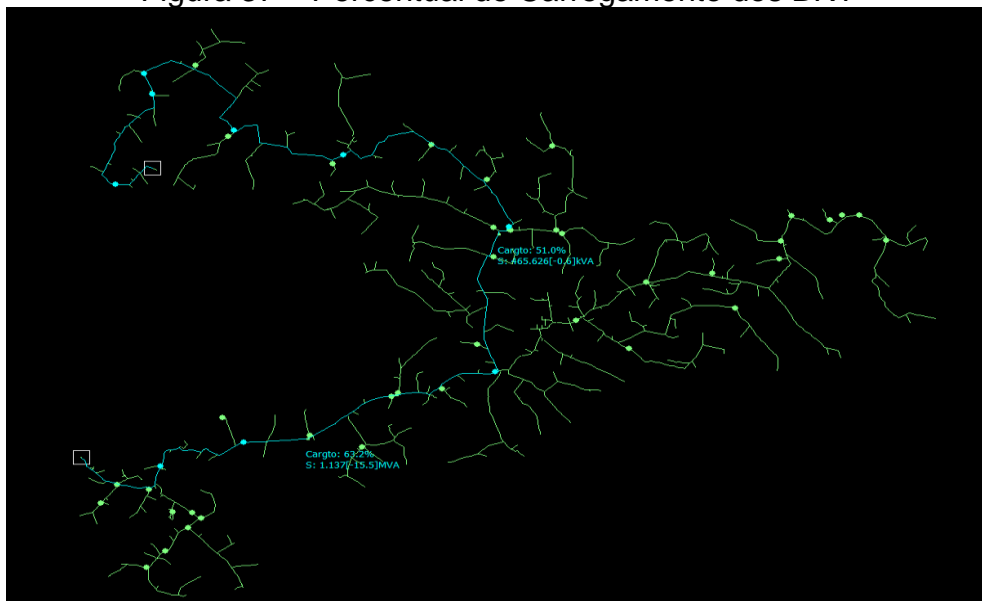
Figura 36 - Gráfico do perfil de tensão com os dois BRT e linha no sistema



Fonte: (SINAPgrid)

Na figura 37, apresenta-se o carregamento da carga em percentual dos dois Banco de Reguladores de Tensão em linha no sistema. Esses dados foram obtidos através do software SINAPgrid, onde nota-se que os dois Banco de Reguladores de Tensão trabalham com folga de carregamento. O BRT deslocado de 72,6 kVA, trabalhará com um carregamento de 63,2% de sua corrente nominal de 100 A, em regime máximo nos horários de maior concentração de carga, já o novo BRT de 38,1 kVA, trabalhará com um carregamento de 51% de sua corrente nominal de 50 A, ajudando assim no funcionamento desses equipamentos e para futuros aumento de carga no alimentador.

Figura 37 – Percentual de Carregamento dos BRT



Fonte: (SINAPgrid)

4.2 Viabilidade Técnica e Econômica

Com as alternativas de melhorias dos níveis de tensão apresentadas neste trabalho, com o deslocamento do Banco de Reguladores de Tensão 72,6 kVA hoje existente no alimentador, e a implementação de mais um Banco de Reguladores de Tensão 38,1 kVA ao longo do alimentador, os resultados estudados atendem os limites previsto pela norma. Junto a este trabalho foram elaboradas análises e levantamentos da viabilidade técnica econômica e custos destas obras de melhoria junto à permissionária.

Os custos de deslocamento do BRT existente e a instalação do novo BRT, se torna a melhor solução técnica e econômica para a permissionária, pois além de adequar o alimentador aos níveis desejados de tensão, é de fácil instalação estes equipamentos, não necessita de vários desligamentos de energia que acarreta em grandes transtornos aos consumidores, a perda de faturamento, aumento dos índices de continuidade dos serviços de fornecimento de energia elétrica o DEC - (duração equivalente de interrupção por consumidor) e o FEC - (frequência equivalente de interrupção por consumidor), os custos não são elevados com equipes e manobras de desligamentos, não necessitando de acesso de caminhões em lavouras, pois as instalações desses equipamentos foram sugeridas próximos as estradas. Comparados a instalação desses equipamentos a um recondutoramento no alimentador ou uma adição de fase em trechos onde não há redes trifásicos se torna muito mais econômico e viável a permissionária.

É relevante levar em conta a elaboração desta obra sugerida no trabalho, o curto prazo de solucionar o problema apresentado, chegando aos níveis desejados de tensão e fornecer uma energia de qualidade aos seus consumidores em todos os horários que apresentaram problemas de afundamento de tensão e sobretensão.

5 CONCLUSÃO

No estudo realizado ao longo deste trabalho, foram demonstradas características geralmente usadas nas redes de distribuição de média tensão rural, tais como suas topologias, os critérios de projetos em níveis de tensão, as normas referentes a níveis de tensão estabelecidos pelo órgão regulador. Além disso, foram apresentados os tipos e características dos reguladores de tensão e sua funcionalidade.

Durante a sua realização, foram utilizados dados junto à permissionária de energia "X", referentes a um alimentador de média tensão rural denominado AL-Floriano Peixoto, que ao longo de seu trecho encontra-se instalado um banco de reguladores de tensão trifásico, onde se faz o controle da tensão na rede. A análise feita para verificação dos níveis de tensão, foram através de simulações via software, onde se obteve os resultados da atual situação que se encontra esse alimentador e comparado esses resultados obtidos, com os valores normativos pelo órgão regulador.

Desse modo, nota-se que os valores apresentados no AL-Floriano Peixoto com o uso de reguladores de tensão instalados atualmente no local, não atendem em alguns trechos da rede mostrados neste trabalho, aos níveis estabelecidos como adequados pelo órgão regulador, se fazendo necessários melhorias e adequações para sanar esse problema evidenciado, afim de garantir aos seus consumidores uma energia de qualidade.

Foram então elaboradas alternativas para que se faça a melhoria dos níveis de tensão no AL – Floriano Peixoto, e realizou-se levantamentos, medições e novas simulações que contribuíram para que chegasse a alternativa que contribui para regularizar este problema evidenciado. Nesse caso, foi apresentada a necessidade de deslocamento do BRT trifásico existente atualmente para um novo local, e a necessidade da instalação de mais um BRT ao longo do alimentador, mostrados e evidenciados nas alternativas 01 e 02.

Estas alternativas propostas apresentaram resultados satisfatórios e positivos, que conseguem manter os níveis de tensão adequados conforme estabelecidos pelo PRODIST – Módulo 8 da agência reguladora ANEEL, assim garantindo uma energia de qualidade aos seus consumidores.

5.1 Perspectivas futuras

Para um melhor aprimoramento do trabalho realizado até então, seria de grande valia fazer necessário juntamente a permissionária “X”, o levantamento de mais informações técnicas e realizar medições mais minuciosas ao longo do alimentador. Também o estudo da viabilidade de recondutoramento em alguns trechos da rede onde se faça necessário e o equilíbrio das cargas no alimentador, adequando já a rede a um futuro aumento de carga.

Seria também de suma importância se fazer uma análise dos impactos ocasionados pelas gerações de energia solar distribuídas nas redes de distribuição, que vem em um crescimento de instalações muito grande tanto nos consumidores na área urbano como nos consumidores do meio rural.

Sugere-se que em função destas alterações, seja feito um estudo relacionado também a coordenação e seletividade das proteções deste alimentador.

REFERÊNCIAS

- ABRADEE. **Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia>>. 2021.
- ALUGAGERA. **Subestações Elétricas**. Disponível em: <<http://www.alugagera.com.br/noticias/o-que-e-subestacao-eletrica>>. 2019.
- ALVES, R. P. **Alocação ótima de reguladores de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica radiais usando uma formulação linear inteira mista**. -. 2012.
- ANEEL. **Regulação dos Serviços de Distribuição**. 2021.
- BALOCH, Q. B. **Operação do Sistema de Distribuição de Energia e despacho de cargas entre Alimentadores considerando menor índice de Perdas**. 2017. 92–105 f. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUI, 2017.
- BITTENCOURT, J. P. **Automação das redes de distribuição**. UNIS MG. Varginha-MG. 2016.
- BLATT, J. J. F. **Proposta de instalação de regulador de tensão em uma rede de distribuição primária a partir da análise do perfil de tensão**. 2016.
- CABO, R., BLOCOS, T., CABEAMENTO, T., *et al.* **Sistema de Distribuição Secundária**. 2000.
- CAMPOS, C. R. **Redes Subterrâneas de Energia Elétrica no Brasil**. 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.17407.56484.
- CPFL SOLUÇÕES. **ANEEL entenda o que é e o que ela faz**. [S.d.]. Disponível em: <https://cpflsolucoes.com.br/aneel-entenda-o-que-e-e-o-que-ela-faz/>. 2021.
- ELEKTRO REDES S.A. **Norma ND. 25 - Projetos de Redes Aéreas Isoladas de Distribuição de Energia Elétrica. Revisão 08**. 2018.
- FECOERGS. **Orientação técnica - distribuição otd 035.01.01 critérios de elaboração de projetos**. 2014.
- ITB- EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS. **Manual do Regulador RAV-2 com controle CTR-2**. Birigui-SP, 2013.
- LEME, D. M., CUNHA, M. A. da, PITOCCO, T. A., *et al.* **Sistema de Proteção da Rede de Distribuição de Energia Elétrica**. 2013.
- MADRUGA, E. . **Otimização de níveis de tensão nas redes de distribuição considerando a alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão**. 2011.
- MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

MENGARDA, J. S. **Cálculo da Energia não distribuída através da aplicação de curvas de carga diárias**. 2012. 1–15 f. Universidade Regional do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI, 2012.

ONS. **Evolução da Capacidade Instalada no SIN - DEZ2021/ DEZ2025**. 2021. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>.

PEREIRA, C. A. **Alocação Ótima de Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição de Engenharia Elétrica**. 2009.

PINTO, Milton de Oliveira. **Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

RIBEIRO, A. L. **Benefícios Da Rede De Distribuição Aérea Compacta 15kV**. 2008.

SATO, Fujio; FREITAS, Walmir. **Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia Elétrica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SILVA, M. R. **Avaliação Alternativa para Eletrificação Rural no Contexto dos Programas de Universalização do Atendimento de Energia no Brasil**. 2006.

SINAPgrid. **Manual Geral – Módulos Básicos e Especiais**. Versao 3.0 [S.1.: s.n.], 2021.

SZUVOVIVSKI, I. **Alocação simultânea de bancos de capacitores e reguladores de tensão em sistemas de distribuição usando algoritmos genéticos e fluxo de potência ótimo**. 2008.

VIANA FILHO, Josemar de Souza. **Coordenação e seletividade da proteção elétrica do terminal portuário do pecém com a entrada da carga da correia transportadora**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceara, 2010.